



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Quantifizierung der Chloridbelastung von tausalzexponierten Stahlbetonbauwerken

Quantification de la charge en chlorure sur les structures en béton armé exposées au sel de déverglaçage

Quantification of chloride load on reinforced concrete structures exposed to deicing salt

ETH Zürich, Institut für Baustoffe (IfB)

Dr. Patrick Pfändler
Prof. Dr. Ueli Angst
Benjamin Urben

SUPSI, Istituto Materiali della Costruzione (IMC)

Dr. Christian Paglia

TFB AG

Dr. Yves Schiegg
Dr. Jan Bisschop

Valtest AG

Philipp Truffer

Tecnotest AG

Aldo Rancati

IMP Bautest AG

Dr. Pietro Luraschi (ab Projektstart bis 30.08.2023)
Dr. Lucas Michel (ab 01.02.2024 bis Projektende)

**Forschungsprojekt BGT_20_03B_01 auf Antrag der Arbeitsgruppe BGT –
Brücken, Geotechnik und Tunnel
September 2025 | 1801**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet. Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière. Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima. Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee. Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)

Quantifizierung der Chloridbelastung von tausalzexponierten Stahlbetonbauwerken

Quantification de la charge en chlorure sur les structures en béton armé exposées au sel de déverglaçage

Quantification of chloride load on reinforced concrete structures exposed to deicing salt

ETH Zürich, Institut für Baustoffe (IfB)

Dr. Patrick Pfändler

Prof. Dr. Ueli Angst

Benjamin Urben

SUPSI, Istituto Materiali della Costruzione (IMC)

Dr. Christian Paglia

TFB AG

Dr. Yves Schiegg

Dr. Jan Bisschop

Valtest AG

Philipp Truffer

Tecnotest AG

Aldo Rancati

IMP Bautech AG

Dr. Pietro Luraschi (ab Projektstart bis 30.08.2023)

Dr. Lucas Michel (ab 01.02.2024 bis Projektende)

**Forschungsprojekt BGT_20_03B_01 auf Antrag der Arbeitsgruppe BGT –
Brücken, Geotechnik und Tunnel**

September 2025 | 1801

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Prof. Dr. Ueli Angst

Dr. Christian Paglia (Stv.)

Mitglieder

Dr. Patrick Pfändler

Benjamin Urben

Dr. Yves Schiegg

Dr. Jan Bisschop

Aldo Rancati

Philipp Truffer

Dr. Pietro Luraschi (bis 30.08.2023)

Dr. Lucas Michel (ab 01.02.2024 bis Projektende)

Begleitkommission

Präsident

Walter Waldis

Mitglieder

Dr. Stefan Etter

Dr. Martin Käser

Dr. Kerstin Lang

Dr. Fabrizio Moro

Dr. Heidi Ungricht

Prof. Felix Wenk

Antragsteller

Prof. Dr. U. Angst

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von
<https://www.mobilityplatform.ch/>
heruntergeladen werden.

September 2025

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis	15
Abkürzungsverzeichnis	16
Zusammenfassung	17
Résumé	25
Summary	33
1 Einleitung	41
1.1 Ausgangslage	41
1.2 Projektziele und Abgrenzungen	42
2 Sachstand	45
2.1 Winterdienst auf Nationalstrassen	45
2.2 Folgen der Chloridbeaufschlagung von Bauwerken	46
2.3 Chlorideinwirkungen im Normenwesen	46
2.4 Chloridbelastung von Betonbauwerken durch Tausalze	47
2.4.1 Tausalze	47
2.4.2 Chloridprofile als Antwort des Betons auf die Chlorideinwirkung	48
2.4.3 Langzeitauslagerungen von Betonprüfkörpern in Schweden	49
2.4.4 Langzeitauslagerungen von Betonprüfkörpern in der Schweiz	49
2.4.5 Chloridprofile entlang einer deutschen Autobahn	50
2.4.6 Weitere Literaturhinweise zur Oberflächenchloridkonzentration	51
2.4.7 Literaturformeln zur Abschätzung der Oberflächenchloridkonzentration	51
2.5 Lebensdauermodellierung und Oberflächenkonzentration C_s	53
2.6 Schlussfolgerungen aus dem Sachstand und Lösungsansatz	55
3 Methodik	57
3.1 Erstellung der Datenbank	57
3.1.1 Konzept der Datenbank	58
3.1.2 Überblick über die Parameter der Datenbank ..	60
3.1.3 Erläuterung der einzelnen Parameter	63
3.1.3.1 Chloridkonzentrationen	63
3.1.3.2 Messverfahren	63

3.1.3.3	Art der Probenentnahme	63
3.1.3.4	Bemerkung	63
3.1.3.5	Bauwerksart	63
3.1.3.6	Bauwerksteil	63
3.1.3.7	Bemerkung	64
3.1.3.8	Baujahr (Mittelwert)	64
3.1.3.9	Höhe über Meer	64
3.1.3.10	Koordinaten	64
3.1.3.11	Bewittert	65
3.1.3.12	Orientierung der Exposition	65
3.1.3.13	Horizontale Distanz zur Chloridquelle	66
3.1.3.14	Vertikale Distanz zur Chloridquelle	66
3.1.3.15	Strassenart	67
3.1.3.16	Durchfahrtsgeschwindigkeit	67
3.1.3.17	Verkehrsbelastung	67
3.1.3.18	Meteorologische Daten	67
3.1.3.19	Daten zum Taumitteleinsatz	68
3.1.3.20	Himmelsrichtung (Orientierung der Fläche)	68
3.1.3.21	Winkel relativ zur Vertikalen	69
3.1.3.22	Neigung des Bauwerksteils im Grundriss relativ zur Fahrspur	69
3.1.3.23	Exposition nach Norm (XC)	70
3.1.3.24	Exposition nach Norm (XD)	70
3.1.3.25	Längsneigung	70
3.1.3.26	Verkehrsregime	70
3.1.3.27	Distanz zum Portal	70
3.1.3.28	Weitere Bemerkungen	71
3.1.3.29	Oberflächenschutzsystem	71
3.1.3.30	Oberflächenschutzsystem – Qualitative Einschätzung	71
3.1.3.31	Abdichtungssystem	71
3.1.3.32	Abdichtungssystem – Qualitative Einschätzung	72
3.1.3.33	Betondruckfestigkeit	72
3.1.3.34	Haftzugfestigkeit	72
3.1.3.35	Zementart nach Norm (nach Plan)	72
3.1.3.36	Zementgehalt	72
3.1.3.37	w/z-Wert	72
3.1.3.38	Weitere Betoneigenschaften	73
3.1.3.39	Betonüberdeckung nach Plan	73
3.1.3.40	Betonüberdeckung gemessen (Mittelwert)	73
3.1.3.41	Betonüberdeckung gemessen (Standardabweichung)	73
3.1.3.42	Karbonatisierungstiefe Mittelwert	73
3.1.3.43	Karbonatisierungstiefe Minimal	73
3.1.3.44	Karbonatisierungstiefe Maximal	73

3.1.3.45	Zusammenfassung der Datenbankkonzeption	73
3.2	Datenauswertung und Datenanalyse: Einbezug von Statistik, KI und Expertenwissen	74
3.2.1	Datenvorverarbeitung	75
3.2.1.1	Fehlende Werte	75
3.2.1.2	Ausreisser	75
3.2.1.3	Standardisierung, Plausibilisierung und Umwandlung von Datentypen	75
3.2.2	Anwendung des Diffusionsmodells und Generierung von Zielvariablen	76
3.2.2.1	Grundlagen und Herausforderungen..	76
3.2.2.2	Entwicklung einer robusten Fittingroutine	78
3.2.2.3	Exemplarische Durchführung des Fittings	79
3.2.2.4	Bewertung des Fittings.....	83
3.2.2.5	Analyse des Fittingroutinen	86
3.2.2.6	Bewertung der Fittingroutinen	87
3.2.3	Datenauswertung	87
3.2.3.1	Meteorologische Daten	88
3.2.3.2	Verkehrsdaten	90
3.2.3.3	Streusalzeinsatz auf ausgewählten Strecken.....	91
3.2.4	Datenanalyse	93
3.2.4.1	Datenvorbereitung	93
3.2.4.2	Zielvariablen für das überwachte Lernen	95
3.2.4.3	Zielsetzung der Datenanalyse	97
3.2.4.4	Methodisches Vorgehen.....	97
3.2.4.5	Feature Engineering.....	98
3.2.4.6	Modellselektion und Trainingsstrategie.....	98
3.2.4.7	Fehlermetriken.....	99
3.2.4.8	Ergebnisinterpretation, Analyse der Modellgüte	100
3.2.4.9	Expertenwissen	100
3.3	Entwicklung eines Ingenieuransatzes	101
4	Ergebnisse	103
4.1	Datenbank der Chloridprofile.....	103
4.1.1	Verteilung der Bauwerkstypen und Profilmzahlen	103
4.1.2	Chloridprofile	104
4.1.2.1	Verteilung des Chloridgehaltes	104
4.1.2.2	Räumliche Verteilung der Chloridprofile in der Schweiz gruppiert nach Bauwerksart.....	105

4.1.2.3	Anzahl Tiefenstufen der Chlorid-profile	105
4.1.2.4	Messverfahren und Art der Probenentnahme für die Chlorid-profile	106
4.1.2.5	Verteilung des maximalen Chloridgehaltes auf unterschiedliche Bauwerke	106
4.1.2.6	Zeitliche Verteilung der Chloridgehalte	108
4.1.2.7	Log-Normalverteilung der Chloridgehalte auf den Tiefenstufen ..	109
4.1.3	Verteilung der Bauwerksteile in den Bauwerksarten	111
4.1.4	Bemerkungen	111
4.1.5	Orientierung der Exposition	112
4.1.6	Verteilung nach Baujahr	116
4.1.7	Verteilung der Höhe über dem Meeresspiegel..	117
4.1.8	Auswertung der Expositionsklassen	117
4.1.8.1	Horizontale Distanz zur Chlorid- quelle	119
4.1.8.2	Höhe über OK Fahrbahn	120
4.1.8.3	Strassenart.....	122
4.1.8.4	Durchfahrtsgeschwindigkeit.....	122
4.1.8.5	Bewittert	122
4.1.8.6	Zementgehalt, -art und W/Z-Wert	123
4.1.8.7	Meteorologische Daten.....	124
4.1.8.8	Verkehrsdaten	126
4.1.8.9	Winkel relativ zur Vertikalen.....	130
4.1.8.10	Winkel des Bauwerks im Grundriss relativ zur Fahrspur	130
4.1.8.11	Längsneigung	130
4.1.8.12	Verkehrsregime	130
4.1.8.13	Distanz zum Portal	131
4.1.8.14	Bemerkungen.....	132
4.1.8.15	Oberflächenschutzsystem und qualitative Einschätzung	133
4.1.8.16	Abdichtung und qualitative Einschätzung	134
4.1.8.17	Betondruckfestigkeit	135
4.1.8.18	Haftzugfestigkeit	136
4.1.8.19	Betonüberdeckung nach Plan.....	136
4.1.8.20	Gemessene Betonüberdeckung	136
4.1.8.21	Karbonatisierungstiefe Maximalwert	137
4.2	Datenauswertung und Datenanalyse	138
4.2.1	Erstellung der Zielvariablen.....	138
4.2.2	Statistische Analyse	139

4.2.2.1	Korrelation der Zielvariablen mit den numerischen Parametern.....	140
4.2.2.2	Statistische Analyse mit den kategorischen Parametern	150
4.2.2.3	Fazit.....	152
4.2.3	Feature Engineering	153
4.2.4	Maschinelles Lernen.....	157
4.2.4.1	Selektion von Grundmodellen	157
4.2.4.2	Entscheidungsbaum als Regression..	159
4.2.4.3	HistGradientBoostingRegressor als Regression.....	162
4.2.4.4	Einfaches neuronales Netzwerk als Regression.....	163
4.2.5	Fazit	164
4.2.6	Expertenwissen	165
4.2.6.1	Definition einer Zielvariablen	165
4.2.6.2	Mögliche Konzepte für ein Ingenieurmodell zur Vorhersage der Chloridbeaufschlagung	166
4.2.6.3	Wichtigkeit der Parameter in der Datenbank.....	166
4.2.6.4	Weitere Auswertungen.....	168
4.2.6.5	Fazit.....	169
5	Ingenieurmodelle	171
5.1	Überprüfung existierender Modelle	171
5.1.1	Prognose der Oberflächenchloridkonzentration nach Lay	171
5.2	Vorschläge für Ingenieuransätze aus diesem Projekt.....	174
5.2.1	Vorschlag für Zustandsbeurteilung bestehender Bauwerke	174
5.2.2	Vorschlag für probabilistische Lebensdauermodellierung.....	176
6	Forschungsbedarf	179
6.1	Fitting der Chloridprofile	179
6.2	Datenbank und Modelle zur Vorhersage der Chloridkonzentration	180
6.2.1	Datenbank	180
6.2.2	Datenanalyse und Modelle des maschinellen Lernens.....	181
6.3	Ausweitung auf andere Bauwerke und Baustoffe	182
	Literaturverzeichnis	183
	Datenverwendung.....	188
	Projektabschluss.....	189

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Dreidimensionale Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Ersatzoberflächenkonzentration C_s , Δx in Abhängigkeit der horizontalen und vertikalen Entfernung zur Strasse von Infrastrukturbauwerken. (Modell von Schiessl und Lay)	52
Abbildung 2: Schematische Darstellung eines gemessenen Chloridprofils (gelb, orange) und der gefitteten Kurve (blau), aus welcher unter anderem die Oberflächenkonzentration C_s abgeleitet werden kann. In Anlehnung an [2], [40]. ...	54
Abbildung 3: Gegenüberstellung die angenommene Bedeutung für die spätere Datenanalyse und mutmasslicher Beschaffungsaufwand für unterschiedlichen Parameter der Datenbank.	59
Abbildung 4: Beispiel zum Herauslesen der LV 95 Koordinaten (blau markiert) von der Homepage mao.geo.admin.ch des Bundes und der Höhe über Meer (Elevation).	65
Abbildung 5: Bestimmung der Orientierung der Exposition bei Stützen in (a) und in (b) bei Konsolköpfen.	66
Abbildung 6: Beispiele zur Bestimmung des horizontalen Abstandes zum gesalzene Fahrstreifen und des Bauwerks (resp. Bauwerksteils) in (a) für ein Stützmauer und in (b) für ein Galerie.	66
Abbildung 7: Örtliche Verteilung der Zählstationen der Schweizerischen Automatischen Strassenverkehrszählung (SASVZ).	67
Abbildung 8: Nationalstrassen mit eingezeichneter Region im Nordwesten der Schweiz mit vorhandenen Streudatenangeben über die Jahre 2019 bis 2024.	68
Abbildung 9: Beispiele zur Bestimmung der Orientierung der Fläche gegenüber der Windrose.	69
Abbildung 10: Definition des Winkels relativ zur Vertikalen.	69
Abbildung 11: Definition der Neigung des Bauwerksteils im Grundriss relativ zur Fahrspur.	70
Abbildung 12: Beispiel eines Chloridprofils – Vergleich des effektiven Profils mit stufenweisen Profilen aus Bohrmehl mit unterschiedlichen Intervallen (adaptiert von [51]).	77
Abbildung 13: Die Tiefenlage der maximalen Chloridgehalte in den gemessenen Profilen zeigt, auf welcher Tiefenstufe der jeweils höchste Chloridgehalt pro untersuchtes Profil festgestellt wurde.	78
Abbildung 14: Übersicht über zwölf zufällig ausgewählte Chloridprofile in der Datenbank mit unterschiedlicher Anzahl an Tiefenstufen und Wertebereiche für die Chloridkonzentration bezüglich des Betons.	80
Abbildung 15: Fitting des zweiten Chloridprofils aus Abbildung 14 in (a) mit einer Gewichtung von 0.2 für den ersten Datenpunkt und (b) mit einer Gewichtung von 1.0 für den ersten Datenpunkt.	81
Abbildung 16: Fitting des siebten Chloridprofils aus Abbildung 14 in (a) mit einer Gewichtung von 0.2 für den ersten Datenpunkt und (b) mit einer Gewichtung von 1.0 für den ersten Datenpunkt.	82

Abbildung 17: Fitting des achten Chloridprofile aus Abbildung 14 (a) mit einer Gewichtung von 0.2 für den ersten Datenpunkt und (b) mit einer Gewichtung von 1.0 für den ersten Datenpunkt. Grün = RANSAC; Lila = alle anderen Verfahren.....	82
Abbildung 18: Beispiel einer Bewertung eines beliebigen Chloridprofilfittings mit der Einstufung «vertrauenswürdig» mit $W=0.2$	84
Abbildung 19: Bewertung des siebten Chloridprofils ($W=0.2$) mit der Bewertung «fraglich».....	85
Abbildung 20: Bewertung des ersten Profils aus Abbildung 14 mit $W=0.2$ mit der finalen Bewertung «verwerfen».....	85
Abbildung 21: Gegenüberstellung des Medians der Fittingroutinen der Oberflächenchloridkonzentration bei unterschiedlicher Gewichtung des ersten Datenpunktes mit $W=0.2$ oder $W=1.0$	86
Abbildung 22: Bewertung der Fittings der Chloridprofile bei der Gewichtung des ersten Datenpunktes von 0.2.	86
Abbildung 23: Chloridprofil mit einem Alter von 24 Jahren, ohne Abdichtung oder Oberflächenschutzsystem mit einem gemessenen Chloridgehalt unter dem Detektionslimit mit erfolgreichem Fitting mit der Bewertung «fraglich».	87
Abbildung 24: Die Schweizerkarte ist in Voronoi-Polygone unterteilt, wobei jedes Polygon den Bereich repräsentiert, der der nächstgelegenen Wettermessstation zugeordnet ist. Diese Darstellung veranschaulicht, welche Flächen von den jeweiligen Stationen abgedeckt werden.	89
Abbildung 25: Zuordnung der Wetterstationen auf die einzelnen Chloridprofile anhand von Kriterien bezüglich der Höhendifferenz und Distanz zwischen Entnahmeort des entsprechenden Profils, als auch Datenverfügbarkeit über den Untersuchungszeitraum.	90
Abbildung 26: Zuordnung der SASVZ Zählstationen auf die Chloridprofile mit Differenzierung bezüglich Lage zu Nationalstrassen.....	91
Abbildung 27: Illustration des Layouts der Strassen mit verfügbaren Tausalzdaten und Zuordnung der Chloridprofile.	92
Abbildung 28: Mittelwert über den Betrachtungszeitraum der Tausalz- und Sole-Mengen für die Strassenabschnitte in Tonnen pro Kilometer pro Saison.....	92
Abbildung 29: Anzahl der zugeordneten Chloridprofile pro Streckenabschnitt.....	93
Abbildung 30: Aufbau und Bestandteile eines Entscheidungsbaumes mit 5 Blattknoten und 3 (Entscheidungs-)Knoten und dem Wurzelknoten.	99
Abbildung 31: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Bauwerkstypen in (a) und der Anzahl der Chloridprofile (Datenbankeintrag) pro Bauwerkstyp in (b).	103
Abbildung 32: Verteilung des Chloridgehalts [M.-% bez. Beton] im Beton in Abhängigkeit von der Tiefe. N = Anzahl Datenpunkte in der Datenbank.	104
Abbildung 33: Räumliche Verteilung der Datenbankeinträge auf der Schweizerkarte, farblich markiert nach Bauwerkstyp.	105
Abbildung 34: Anzahl der Tiefenstufen pro Chloridprofil in der Datenbank.	106
Abbildung 35: Statistische Auswertung in (a) Messverfahren zur Quantifizierung des Chloridgehaltes und in (b) Übersicht zur Art der Probenentnahme an den Bauwerken.	106
Abbildung 36: Maximaler Chloridgehalt in den Chloridprofilen in der Datenbank, für verschiedene Bauwerkstypen, dargestellt in Masseprozent bezogen auf den Beton.	107

Abbildung 37: Verteilung der Tiefenstufen mit dem jeweils höchsten Chloridgehalt, gruppiert nach Bauwerksart in Prozent.....	107
Abbildung 38: Entwicklung des maximalen Chloridgehalts im Profil, sowie der Chloridkonzentrationen in 10–20 mm und 20–30 mm Tiefe in Abhängigkeit vom Baujahr der Bauwerke (5-Jahres-Intervalle).	109
Abbildung 39: Q-Q-Plot für unterschiedliche Verteilung für die Chloridwerte auf der Tiefenstufe 30–40 mm.	110
Abbildung 40: Anzahl der Nennungen verschiedener Bauwerksteile, gruppiert nach Bauwerksart. Es wurden nur Kombinationen berücksichtigt, die in mindestens 10 Nennungen vorkommen.	111
Abbildung 41: Ausrichtung der Exposition gegenüber der Strasse für als Stützen gekennzeichnete Einträge im Eintrag Bauwerksteile der Datenbank.	112
Abbildung 42: Ausrichtung der Exposition gegenüber der Strasse für als Konsolköpfen gekennzeichnete Einträge im Eintrag Bauwerksteile der Datenbank.	113
Abbildung 43: Übersicht über Zusammenhänge unterschiedlicher Parameter in der Datenbank für Stützen mit der Ausrichtung A, aufgeteilt in 4 gleichgrosse Klassen bezüglich des Chloridgehaltes zwischen 10 und 20 mm.	114
Abbildung 44: Übersicht über mögliche Zusammenhänge unterschiedlicher Parameter in der Datenbank für Stützen mit der Ausrichtung A, aufgeteilt in drei Quantilbereiche (0 bis 15%, 15 bis 85 % und 85 bis 100 %) bezüglich des Chloridgehaltes zwischen 10 und 20 mm.....	115
Abbildung 45: Übersicht über mögliche Zusammenhänge unterschiedlicher Parameter in der Datenbank für Stützen mit der Ausrichtung A, aufgeteilt in drei Quantilbereiche (0 bis 50%, 50 bis 75% und 75 bis 100%) bezüglich der Zielvariablen 3.4.....	116
Abbildung 46: Verteilung des Baujahrs nach der Anzahl der in der Datenbank verfügbaren Chloridprofile.....	117
Abbildung 47: Verteilung der Höhe über Meer der in der Datenbank enthaltenen Bauwerke.....	117
Abbildung 48: Vergleich der Chloridkonzentrationen für sämtliche Zielvariablen und die Chloridprofile auf den Tiefenstufen 00–10 mm, 10–20 mm und 20–30 mm aufgeschlüsselt nach der Exposition XD1 (blau) und XD3 (orange).....	119
Abbildung 49: Histogramm der horizontalen Distanz zwischen dem Ende der Fahrspur und der exponierten Betonoberfläche, wo das entsprechende Chloridprofil entnommen worden ist.	120
Abbildung 50: Chloridgehalt auf Tiefenstufe 10–20 mm als Funktion der horizontalen Distanz zur Chloridquelle (Strasse). Datensätze mit auffälligen Spezialbedingungen (Fliessspuren, Abplatzungen, Hohlstellen, etc.) ausgeschlossen.	120
Abbildung 51: Histogramm der vertikalen Distanz zwischen dem Ende der Fahrspur und der exponierten Betonoberfläche, wo das entsprechende Chloridprofil entnommen worden ist.....	121
Abbildung 52: Chloridgehalt auf Tiefenstufe 10–20 mm als Funktion der Höhe über Fahrbahn. Nur Daten mit positiver Höhe über Fahrbahn berücksichtigt, sowie spezielle Expositionsfälle (Einzelfälle in der Datenbank), namentlich «Fliessspuren», «Hohlstellen», etc. und Bauwerke/-teile («Überführungen», «Träger», etc.) ausgeschlossen.....	121
Abbildung 53: Einfluss der Bewitterung auf den durchschnittlichen maximalen Chloridgehalt in Abhängigkeit der Bauwerksart.	123

Abbildung 54: Aufschlüsselung des Parameters Zementart nach Norm aus der Chloriddatenbank.	123
Abbildung 55: Angegebene Wasser-Zemente-Werte im Datensatz.	124
Abbildung 56: Entwicklung der Tagesneuschneehöhe über die betrachtete Zeitspanne aller Wetterstationen, die den in der Datenbank enthaltenen Bauwerken zugeordnet wurden.	125
Abbildung 57: Variationskoeffizienten der Wetterdaten der zugeordneten Wetterstationen der durchschnittlichen Tagesneuschneehöhen über die betrachtete Zeitspanne.....	125
Abbildung 58: Links: Datenverfügbarkeit der zugeordneten Wetterstationen. Rechts: Gesamtmittel über die Messperiode der Neuschneehöhen der zugeordneten Wetterstationen.	126
Abbildung 59: Links: Höhenunterschied von Chloridprofilen und zugeordneten Wetterstationen. Rechts: Horizontale Distanz von Chloridprofilen zu den zugeordneten Wetterstationen.	126
Abbildung 60: Entwicklung des Monatsdurchschnitt des Durchschnittlichen Tagesverkehr (DTV) aller den in der Datenbank enthaltenen Datensätzen zugeordneten Zählstationen.	126
Abbildung 61: Abweichung des monatlichen Mittel des Durchschnittlichen Tagesverkehr (DTV) vom Gesamtmittel für jede Zählstation.....	127
Abbildung 62: Verteilung der Variationskoeffizienten des monatlichen Mittel der Durchschnittlichen Tagesverkehrsdaten (DTV) über die betrachtete Zeitspanne. ...	127
Abbildung 63: Links: Datenverfügbarkeit der ausgewählten DTV Zählstationen über gesamte Messperiode, Rechts: Mittel der ausgewählten DTV Zählstationen über die gesamte Messperiode.....	128
Abbildung 64: Vergleich des Chloridgehaltes der 8 Zielvariablen gegenüber dem DTV des Jahres 2022.	129
Abbildung 65: Auswertung des Parameters «Winkel relativ zur Vertikalen».....	130
Abbildung 66: Histogramm des Parameters «Distanz zum Portal».	131
Abbildung 67: Räumliche Verteilung des maximalen Chloridgehalts abgestuft in 5 Klassen in Tunnelbauwerken in Abhängigkeit von der Distanz zum Portal und der Höhe über OK Fahrbahn.	132
Abbildung 68: Schwarm der maximalen Chloridgehalte [M.-%/B.] für ausgewählte Einträge im Feld «Bemerkungen» aus der Datenbank mit Angabe des Mittelwertes sämtlicher Einträge.....	133
Abbildung 69: Häufigkeit verschiedener Oberflächenschutzsysteme in Kombination mit der qualitativen Einschätzung der Dichtheit; Darstellung mit gebrochener y-Achse zur besseren Vergleichbarkeit.	134
Abbildung 70: Häufigkeit verschiedener Abdichtungssysteme in Kombination mit der qualitativen Einschätzung der Dichtheit; Darstellung mit gebrochener y-Achse zur besseren Vergleichbarkeit.....	135
Abbildung 71: Histogramm der Betondruckfestigkeiten der in der Datenbank erfassten Einträge, mit Häufung um 80 N/mm ²	136
Abbildung 72: Zusammenhang zwischen Betondruckfestigkeit und dem Erstellungsjahr des Bauwerks.....	136
Abbildung 73: Histogramm der gemessenen Betonüberdeckung (Mittelwert).	137
Abbildung 74: Zusammenhang zwischen dem Bauwerksalter und dem Mittelwert der gemessenen Betonüberdeckung.	137

Abbildung 75: Boxplot der maximalen Karbonatisierungstiefe nach Bauwerksart.	138
Abbildung 76: Histogramme der unterschiedlichen Zielvariablen aus Tabelle 7 (Einheit der x-Achse: Chloridgehalt bezogen auf das Betongewicht).	139
Abbildung 77: Mittelwerte der acht unterschiedlichen Zielvariablen aus Tabelle 7.	139
Abbildung 78: Korrelationskoeffizienten zwischen den Zielvariablen (vgl. Tabelle 7) und einigen numerischen Kategorien / Parameter in der Datenbank.	141
Abbildung 79: Korrelationskoeffizienten zwischen den log-transformierten Zielvariablen (vgl. Tabelle 7) und einigen numerischen Kategorien / Parameter in der Datenbank.	142
Abbildung 80: Anzahl der in der Datenbank verfügbaren Wertepaare für die Berechnung der Korrelation in Abbildung 78 und Abbildung 79.	143
Abbildung 81: Streudiagramm zwischen der Zielvariable 2 (Maximalwert des Chloridprofils) und ausgewählten kontinuierlichen bzw. diskreten Parametern zur Identifikation nicht-linearer Zusammenhänge.	144
Abbildung 82: Korrelation zwischen der Zielvariablen 2 und einigen numerischen Kategorien / Parametern in der Datenbank, aufgeschlüsselt nach Bauwerksart.	146
Abbildung 83: Anzahl der Wertepaare für die Berechnung der Korrelationskoeffizienten in Abbildung 82.	148
Abbildung 84: Korrelationsanalyse für den Datensatz mit Angaben über die Tausalzmenge (oben), sowie die Anzahl der Wertepaare für die Berechnung der Korrelation.	149
Abbildung 85: ANOVA-Analyse der kategorischen Parameter der Datenbank.	151
Abbildung 86: Übersicht des Einflusses der Bauwerksart auf die Zielvariablen.	152
Abbildung 87: Automatisches Feature Engineering der numerischen Parameter für die Zielvariable 1 mit Imputation.	154
Abbildung 88: Automatisches Feature Engineering der numerischen Parameter für die Zielvariable 1 ohne Imputation.	154
Abbildung 89: Mittlerer Chloridgehalt in Abhängigkeit von der kombinierten Variable «OS und Abdichtung».	156
Abbildung 90: Maximaler Chloridgehalt in Abhängigkeit des Entnahmemonats des Profils.	156
Abbildung 91: Bestimmtheitsmass für verschieden Modelle auf den 8 Zielvariablen für den Datensatz inklusive Feature Engineering mit Optimierung der Hyperparameter der Modelle.	158
Abbildung 92: Bestimmtheitsmass für verschieden Modelle auf den 8 Zielvariablen für den Datensatz inklusive Feature Engineering mit Optimierung der Hyperparameter der Modelle mit einer Log-Transformation der Zielvariable.	158
Abbildung 93: Entscheidungsbaum für die Vorhersage der Zielvariable 2 bis auf eine Tiefe von 3 von insgesamt 13 Stufen.	160
Abbildung 94: Parameterwichtigkeit (Feature Importance) für den Entscheidungsbaum mit Feature Engineering der Vorhersagen für Zielvariable 2.	161
Abbildung 95: Lernkurve für Zielvariable 2 und einen Entscheidungsbaum.	162
Abbildung 96: Übersicht über die 19 wichtigsten Parameter in absteigender Reihenfolge (5 = sehr wichtiger Parameter, 1 = unwichtiger Parameter), basierend auf die gemittelten, subjektiven Einschätzungen von Fachexperten.	167

Abbildung 97: Maximaler Chloridgehalt der Chloridprofile pro Intervall in Relation zur horizontalen Distanz zur Chloridquelle.	169
Abbildung 98: Maximaler Chloridgehalt der Chloridprofile pro Intervall entsprechend ihren Expositions-klassen in Relation zur horizontalen Distanz zur Chloridquelle. Chloridprofile an Fliessspuren wurden nicht berücksichtigt.....	169
Abbildung 99: Häufigkeitsverteilung zwischen horizontalem und vertikalem Abstand in der Datenbank (links) und ein Histogramm der berechneten Werte für die Oberflächenchloridkonzentration (rechts).....	171
Abbildung 100: Auswertung der Modellgüte nach Lay im Vergleich zur Zielvariablen 1, welche mit einem Faktor von 7 auf den Chloridgehalt bezüglich Zements umgerechnet wurde. Achseneinheit: % Chlorid / Zementgewicht	172
Abbildung 101: Auswertung der Modellgüte nach Lay im Vergleich zur Zielvariable 2, welche mit einem Faktor 7 auf den Chloridgehalt bezüglich Zements umgerechnet wurde. Achseneinheit: % Chlorid / Zementgewicht	173
Abbildung 102: Boxplots zur Einordnung gemessener Chloridgehalte (M-% bezogen auf Betongewicht) in den Schweizer Kontext für Spritzwasser bzw. Sprühnebeexposition von Bauwerken der Strasseninfrastruktur (die Abbildung basiert auf >1500 Chloridprofilen). a) Maxima der gemessenen Chloridprofile in der Datenbank (Zielvariable 2); b, c) Chloridkonzentration auf 20 mm Tiefe (Zielvariable 3.2, Fig. b) und auf 30 mm Tiefe (Zielvariable 3.5, Fig. c), ermittelt anhand der gefitteten Chloridprofile, extrapoliert auf die angegebenen Tiefen, und zu einem Zeitpunkt von 50 Jahren.....	175
Abbildung 103: Boxplots zur Einordnung gemessener Chloridgehalte analog Abbildung 102, jedoch umgerechnet auf Chloridgehalt bezogen auf das Zementgewicht (unter Annahme Faktor 7, was ungefähr einem Zementgehalt von 320 kg/m ³ Beton entspricht).	176
Abbildung 104: Vorschlag von Lognormalverteilungen (pdf) für die Oberflächenchloridkonzentration auf Tiefenstufe 0 mm für Spritzwasser bzw. Sprühnebeexposition. Kurve A: bei geringer horizontaler Distanz zur Strasse (<1 m, XD3 Exposition); Kurve B: Bei mittlerer horizontaler Distanz zur Strasse (1–3 m, XD3/XD1); Kurve C: Bei grosser horizontaler Distanz zur Strasse (>3 m, XD1).	178

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Expositionsbedingungen für Tausalze gemäss SN EN 206.....	47
Tabelle 2: Parameter und Datenstruktur in der Datenbank zum Chloridprofil.....	60
Tabelle 3: Parameter in der Datenbank zur Bauwerksart und der Exposition.	62
Tabelle 4: Parameter zur Erfassung der Eigenschaften des Überdeckungsbetons. .	62
Tabelle 5: Zuordnung der in der Datenbank erfassten Parameter zu ihren jeweiligen Variablentypen.	94
Tabelle 6: Beispielhafte One-Hot-Encoding des Merkmals „Bauwerksart“.....	95
Tabelle 7: Übersicht über Zielvariablen.....	97
Tabelle 8: Übersicht über Fehlermetriken.	100

Tabelle 9: Variationskoeffizienten für die unterschiedlichen Tiefenstufen im Chloridprofil angepasst an eine Log-Normal-Verteilung.....	110
Tabelle 10: Expositionsclassen der in der Datenbank enthaltenen Datensätze betreffend Bewehrungskorrosion in karbonatisiertem Beton.....	118
Tabelle 11: Expositionsclassen der in der Datenbank enthaltenen Datensätze betreffend Bewehrungskorrosion induziert durch Chloride.	118
Tabelle 12: Erfasste Durchfahrtsgeschwindigkeit der Fahrzeuge bei der Entnahmestelle der in der Datenbank enthaltenen Chloridprofilen.	122
Tabelle 13: Zementgehalt in der Datenbank.....	124
Tabelle 14: Art und Anzahl der Bemerkungen der Datenaufnahme.....	132
Tabelle 15: Modellgüte der Entscheidungsbaumregression für verschiedene Zielgrössen und Metriken.	160
Tabelle 16: Modellgüte der HistGradientBoostingRegressor für verschiedene Zielgrössen und Metriken.	163
Tabelle 17: Modellgüte der neuronalen Netzwerke für verschiedene Zielgrössen und Metriken mit Feature Engineering.	164
Tabelle 18: Qualitative Einreihung der Parameter in der Datenbank gemäss Beurteilung von Fachexperten.	166
Tabelle 20: Vorschlag für eine statistische Beschreibung der Oberflächenchloridkonzentration Cs auf Tiefenstufe 0 mm für Spritzwasser- bzw. Sprühnebelexposition von Bauwerken der Schweizer Strasseninfrastruktur. Werte in Chlorid M.-% bezogen auf das Zementgewicht.	178

Abkürzungsverzeichnis

Art.	Artikel
Bd.	Band
Bsp.	Beispiel
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
Cs	Chloridgehalt and der Betonoberfläche («surface»)
DTV	Durchschnittliche Tagesverkehr
M%	Massenprozent
OS	Oberflächenschutzsystem
SASVZ	Schweizerische Automatische Strassenverkehrszählung
W/Z	Wasser Zement-Wert

Zusammenfassung

Ausgangslage und Problemstellung

Seit den 1950er-Jahren werden in der Schweiz während der Wintermonate Tausalze zur Gewährleistung der Verkehrssicherheit eingesetzt. So werden heute pro Wintersaison auf dem Schweizer Nationalstrassennetz pro Strassenkilometer insgesamt 8 bis 40 Tonnen Salz ausgebracht. Dies kann jedoch zu erheblichen Schäden durch eindringende Chloridionen an Stahlbetonbauwerken, welche mit konventioneller Stahlbewehrung ausgeführt wurden, führen. Eine Vorhersage dieser durch die Bewehrungskorrosion bedingten Schäden ist zentral für die Instandsetzungsplanung bestehender Bauwerke, sowie für die nachhaltige Bemessung und dauerhafte Dimensionierung neuer Bauwerke.

Die internationale Forschungsgemeinschaft hat in den letzten Jahrzehnten beachtliche Fortschritte im Bereich der Dauerhaftigkeitsmodellierung erzielt, insbesondere hinsichtlich des Widerstands – etwa durch Betrachtung des Überdeckungsbetons als Barriere gegen den Chloridtransport – und, in gewissem Umfang, auch in Bezug auf den kritischen Chloridgehalt, der zur Initiierung der Korrosion führt. Nach wie vor bestehen jedoch grosse Wissenslücken bezüglich der Einwirkung, also der Chloridkonzentration, die aus der Umwelt auf ein Bauwerk einwirkt. Während bei bestehenden Bauwerken nach einer gewissen Exposition (ca. 10 Jahre) entsprechende Werte messtechnisch bestimmt werden können, fehlen für neue Bauwerke verlässliche Daten. Dies führt zu Unsicherheiten bei der Dauerhaftigkeitsbemessung. Dazu kommt der Einfluss durch die Anwendungen neuer Zementarten und Betone.

Die heute verbreiteten Dauerhaftigkeitsbemessungsansätze sind oft qualitativ oder stützen sich auf präskriptive Normen, was insbesondere bei modernen Baustoffen zu Einschränkungen führt. Die Einwirkungen aus Umgebungsbedingungen werden in den europäischen (und Schweizer) Normen mittels sogenannten «Expositionsklassen» abgebildet. Für chloridexponierte Bauwerke gelten gemäss Norm EN 206 die Expositionsklassen XS (Chloride aus Meerwasserexposition) und XD (Chloride aus Tausalzexposition). Diese Expositionsklassen entsprechen lediglich einer grob abgestuften und qualitativen Klassifizierung, was keinerlei Quantifizierung der Chlorideinwirkung auf das Bauwerk erlaubt.

Daten zu Chloridkonzentrationen in Überdeckungsbeton, als Mass für die Chloridbelastung (Oberflächenchloridkonzentration C_s), liegen in der Literatur vor, wenn auch verhältnismässig wenig, namentlich zu anderen Parametern wie etwa dem Chloriddiffusionskoeffizienten. Ausserdem sind die üblichen Modellannahmen für C_s in der Literatur eher «anekdotischer» Natur als in nachvollziehbarer Weise faktenbasiert. Die Unsicherheiten zur Oberflächenchloridkonzentration C_s sind besonders ausgeprägt bei der Tausalzexposition (XD), im Gegensatz zur besser dokumentierten Meerwasserexposition (XS). Unterschiedliche Empfehlungen zur Oberflächenchloridkonzentration in der Literatur, sowie stark variierende Bedingungen im Strassenbereich – etwa durch saisonale Schwankungen und klimatische Unterschiede zwischen Alpenraum und

Flachland – erschweren eine verlässliche Modellierung der Dauerhaftigkeit der Strasseninfrastruktur. In der Folge bleiben Prognosen ungenau, wodurch Korrosionsrisiken im Einzelfall erheblich über- oder unterschätzt werden können.

Projektziele

Ziel des Projekts ist es, die Chlorideinwirkung auf Stahlbetonbauwerke im Schweizer National- und Kantonsstrassennetz besser einzugrenzen und damit einen Beitrag zur Reduktion der bestehenden Unsicherheiten bei der Dauerhaftigkeitsbemessung zu leisten. Hierzu soll eine umfassende, strukturierte Datenbank aufgebaut werden, in der Chloridprofile aus Bauwerken und relevante Einflussparameter systematisch erfasst werden. Der Fokus des Forschungsprojekts liegt auf der Konzeptionierung der Datenbank, sowie der Sammlung und Kuratierung der Daten. Weiter soll untersucht werden, inwiefern Datenanalysen mittels statistischer Methoden und maschinellem Lernen es erlauben, die Chloridbelastung besser charakterisieren und modellieren zu können und damit den Sachstand diesbezüglich zu verbessern. Ziel ist es schliesslich, daraus Empfehlungen für die Praxis abzuleiten, namentlich quantitative Ansätze zur Berücksichtigung der Chlorideinwirkung bei der Zustandsbeurteilung bestehender Bauwerke und der Dauerhaftigkeitsbemessung neuer Bauwerke.

Der Schwerpunkt liegt in diesem Projekt explizit auf der Untersuchung der Exposition von Bauwerken entlang von National- und Kantonsstrassen. Andere Bauwerksarten, wie beispielsweise Parkhäuser, werden nicht berücksichtigt.

Methodik

Für die Quantifizierung der Chloridbelastung der Strasseninfrastruktur wurde folgender Ansatz gewählt: Obwohl die vom Winterdienst ausgebrachten Tausalzmengen und -typen, sowie Austragungsarten, etwa pro Strassenkilometer häufig bekannt sind, ist die direkte Ableitung der Chloridbelastung auf Betonoberflächen schwierig. Es bietet sich somit vor allem die direkte Messung der Chloridkonzentration im Beton in unterschiedlichen Tiefenstufen an, die in Form sogenannter Chloridprofile dargestellt wird. Diese Profile erfassen den gesamten Chloridgehalt und zeigen typischerweise eine mit der Tiefe abnehmende Konzentration, mit Ausnahme der oberflächennahen Zone, der sogenannten Konvektionszone, die manchmal von diesem Trend abweicht.

In einem ersten Schritt wurde die angestrebte Datenbank konzipiert und erstellt. Dabei wurde eine Methodik zur effizienten und zielgerichteten Erfassung der Chloridmessdaten entwickelt, unter Berücksichtigung relevanter Einflussfaktoren. Ziel war es, die aus der jahrelangen Praxistätigkeit der beteiligten Baustoffprüflabors vorhandenen Daten, sowie gegebenenfalls Daten weiterer Quellen, zusammenzuführen. Nebst den Chloriddaten wurden weitere Informationen – etwa über die geographische Lage des Bauwerks, Bauwerkstyp und Alter, Ausrichtung und Abstand der Betonfläche zur Strasse, Baustoffeigenschaften, Verkehrsdaten und meteorologische Informationen, und viele mehr – erfasst, um später eine möglichst umfassende Datengrundlage zur Eruierung von möglichen Zusammenhängen zur Verfügung zu haben.

Jeder Datenbankeintrag enthält somit ein vollständiges Chloridprofil sowie die dazugehörigen Informationen. Die relevanten Parameter wurden im Vorfeld definiert und im Projektverlauf durch das Fachwissen der beteiligten Prüflabore und der Hochschule gezielt weiterentwickelt. Die Einteilung der Parameter erfolgte zweistufig: Zuerst wurde ihre (erwartete) Bedeutung für die spätere Auswertung bewertet, danach der geschätzte Erfassungsaufwand aus Sicht der Labore abgeschätzt. Dieses Vorgehen gewährleistete eine gezielte, wirtschaftliche Datenerhebung bei gleichzeitig möglichst hoher Datenqualität. Für jeden Chlorideintrag in der Datenbank wurde die Erfassung von über 30 zusätzlichen Parametern angestrebt, von denen aber nicht alle in allen Fällen verfügbar waren.

Im zweiten Schritt wurden die potenziellen Einflussgrößen mithilfe des Datensatzes analysiert. Vor der detaillierten Analyse wurde die Datenbank ausserdem einer ersten systematischen Aufbereitung unterzogen. Dies umfasste Bereinigung der Einträge und Aufbereitung der Datenformate. Für die weitere Auswertung wurden Parameter mit grosser Datenverfügbarkeit und Relevanz für die weitere Analyse priorisiert. Da viele datenwissenschaftliche Algorithmen keine fehlenden Werte tolerieren, wurden teilweise geeignete Imputationsstrategien (z. B. Median, KNN) eingesetzt.

Der Prozess der Datenauswertung und -analyse umfasste des Weiteren die mathematische Anpassung (Fitting) eines Diffusionsmodells an die gemessenen Chloridprofile. Dies war notwendig, um die beiden grundlegenden Parameter Oberflächenchloridkonzentration und Diffusionskoeffizient pro Chloridprofil zu bestimmen. Solch eine mathematische Auswertung war ausserdem notwendig, um die verschiedenen Chloridprofile vergleichbar zu machen; so wurden Chloridgehalte im Beton nicht immer in konsistenten Tiefenabstufungen gemessen und entsprechend in der Datenbank rapportiert, was eine direkte Vergleichbarkeit verunmöglicht. Auch der Zeitpunkt der Chloridbestimmung (Bauwerksalter) beeinträchtigt die direkte Vergleichbarkeit; das mathematische Fitten erlaubt auch hier eine Rückrechnung auf vergleichbare Zeitpunkte.

Für das mathematische Fitten der Chloridprofile kamen diverse Fitting-Routinen zum Einsatz um eine Strategie für die automatisierte und gleichzeitig zuverlässige Auswertung der (zahlreichen) Chloridprofile in der Datenbank zu ermöglichen. Aus diesen Analysen wurden verschiedene sogenannte Zielvariablen extrahiert, namentlich die Oberflächenchloridkonzentration C_s auf Tiefe $x = 0$ mm (als Medianwert der Fittingverfahren), der Maximalwert des gemessenen Chloridprofils (dieser kann in verschiedenen Tiefen auftreten, je nach Ausprägung der Konvektionszone im betreffenden Chloridprofil), und die Chloridkonzentration in definierten Tiefen (z. B. 20 mm oder 30 mm) und zu einer definierten Zeit. Diese Werte wurden mithilfe der Fittingparameter auf verschiedene zeitliche Referenzjahre (25, 50 und 75 Jahre) interpoliert oder extrapoliert, wobei jeweils der Median der entsprechenden Chloridkonzentration aus den Fittingroutinen für die jeweilige Modellierung über die Zeit herangezogen wurde.

Das methodische Vorgehen der Datenauswertung verfolgte schliesslich zwei Ansätze: Zum einen wurden klassische statistische Verfahren und Methoden des überwachten maschinellen Lernens angewendet, zum anderen wurde vorhandenes Expertenwissen systematisch erfasst und bei Bedarf integriert, um die Ergebnisse mit praktischer

Erfahrung abzugleichen und zu plausibilisieren. Für eine erste Einschätzung der Modellgüte wurden verschiedene Grundmodelle ohne Kreuzvalidierung mit erweiterten, standardisierten Datensätzen (inkl. Feature Engineering) trainiert. Dazu gehörten lineare Modelle (Lineare Regression, Ridge, Lasso), k-nearest neighbors, baumbasierte Verfahren (Entscheidungsbaum, Zufallswald), Ensemblemethoden (Gradient Boosting, XGBoost) sowie der HistGradientBoostingRegressor. Die Modellgüte wurde über das Bestimmtheitsmass aller Zielvariablen bewertet; Modelle mit höheren Werten sollten anschliessend vertieft untersucht und weiter optimiert werden. Zusätzlich bestand die Möglichkeit, den Datensatz in Subdatensätze zu unterteilen – etwa nach Expositionsbedingungen oder Bauteiltyp. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Subgruppen ausreichend gross blieben und möglichst keine Verzerrungen durch Mehrfacheinträge einzelner Bauwerke oder zu spezifische Modelle entstanden. Untersucht wurden somit beispielsweise Parameter wie Distanz zur Chloridquelle, Expositions-kategorie oder Bauwerkstyp. Ziel war es, mittels statistischer Verfahren und maschinellem Lernen die Parameter zu identifizieren, die die Chloridbelastung massgeblich beeinflussen.

Im dritten Schritt wurden auf Basis der Analyse Empfehlungen für die Ingenieurpraxis abgeleitet. Zur Ergänzung der datenbasierten Analyse wurde systematisch das Wissen von Fachpersonen einbezogen. Hierzu fand ein Workshop mit Vertreterinnen und Vertretern aus Baustoffprüflaboren, sowie Mitgliedern der Begleitkommission statt. Ziel dieser Veranstaltung war es, das Expertenwissen hinsichtlich der relevanten Einflussfaktoren auf den Chloridgehalt im Beton zu erfassen und mit den Ergebnissen der datengetriebenen Analyse abzugleichen. Im Fokus des letzten Schrittes in diesem Projekt stand die Frage, inwiefern sich die bestehende Unsicherheit bezüglich der Chloridbelastung von Bauwerken im Schweizer Strassennetz reduzieren lässt und wie dadurch Modellparameter künftig fundierter bestimmt werden können – stets unter Berücksichtigung ihrer praktischen Verfügbarkeit.

Ergebnisse

Datenbank

Die vollständige Datenbank umfasst insgesamt rund 1700 Chloridprofile von über 160 Bauwerken in der Schweiz mit einem Durchschnitt von knapp 10 Chloridprofilen pro Bauwerk. Die Datenbank kann unter folgendem Link heruntergeladen werden (open access): <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000748612>

Die Vollständigkeit der wichtigen Variablen variiert in der Datenbank stark. Für bestimmte Parameter, wie beispielsweise das Probenentnahmedatum, die Bauwerksart oder den Bauwerksteil, ist nahezu in jedem Fall ein Eintrag vorhanden. Bei anderen Parametern, wie der Exposition XC oder XD, fehlen jedoch bereits teilweise bis zu 20% der Einträge. Bei Parametern, wie beispielsweise der Ausrichtung der Exposition, sind teilweise über 30% der Daten unvollständig. Ein ähnliches Muster zeigt sich beim Bauwerksalter, welches jedoch durch gezielte Massnahmen bei der Kuratierung der Datenbank erheblich reduziert werden konnte.

Eine detaillierte Beschreibung der Datenbank würde den Rahmen der vorliegenden Zusammenfassung sprengen. Es sei hier jedoch erwähnt, dass die Datenbankeinträge insgesamt die geographische Verteilung der verschiedenen klimatischen Bedingungen der Schweiz gut abdeckten (Jurabogen, Mittelland, alpine Zone, Südalpenraum). Ebenso sind verschiedene Bauwerkstypen (Brücken, Tunnel, etc.) gut vertreten und verschiedene Bauwerksalter vorhanden (Baujahre von 1960 bis 2000). Dennoch zeigten sich bereits bei einer ersten Analyse der Datenbankeinträge mögliche Schwächen. So bestanden 20% der Chloridprofile aus nur 2 Werten (2 Tiefenstufen), und knapp 40% der Chloridprofile aus nur 3 Werten (3 Tiefenstufen), was für das mathematische Fitten der Profile eine Herausforderung darstellt. Weiter liess sich eine gewisse Verzerrung (Bias) der Datenbankeinträge trotz aller Bemühungen nicht vollständig vermeiden. So zeigte sich beispielsweise, dass Bauwerke im Mittelland (rund 500 Meter über Meer) tendenziell ein höheres Bauwerksalter aufweisen (>45 Jahre), während die im Alpenen Raum gelegenen Bauwerke tendenziell jünger waren. Auf der anderen Seite liessen sich bereits durch einfache Auswertungen interessante Befunde festhalten. So zeigte sich etwa deutlich, dass die Ausrichtung der Betonoberfläche in Bezug auf die Chloridquelle einen signifikanten Einfluss auf die Chloridbelastung hat, wie dies erwartet werden darf. Der Strasse (Chloridquelle) zugewandte Betonflächen bei Stützen und Konsolköpfen weisen signifikant höhere Chloridgehalt auf, als der Strasse abgewandte oder zur Strasse senkrecht stehende Flächen.

Abschliessend sei erwähnt, dass die Konzeption, Erstellung und Kuratierung der Datenbank im Rahmen dieses Projekts mit einem erheblichen finanziellen und personellen Aufwand verbunden war. Dies unterstreicht die Tatsache, dass das Erlangen von Datensätzen für Anwendungen des maschinellen Lernens mit beträchtlichem Aufwand und entsprechenden Investitionen verbunden sind.

Fitten der Chloridprofile

Das Fitten von Chloridprofilen hat sich als unerwartet schwierig herausgestellt, da nur etwa 40% der Chloridprofile aus mehr als 4 Datenpunkten bestanden, sowie die Profile oft auch im Bereich nach der Konvektionszone nicht monoton fallend waren. Im Rahmen des Möglichen wurde ein Ansatz entwickelt, der im Wesentlichen auf der Anwendung verschiedener robuster Fitting-Algorithmen, einem automatisierten Auswahl- und Ausschlussverfahren sowie einer Gewichtung dieser verschiedenen Ergebnisse basiert. Das Resultat dieses entwickelten Ansatzes sind die Zielvariablen (die Oberflächenchloridkonzentration C_s auf Tiefe $x = 0$ mm, der Maximalwert des gemessenen Chloridprofils, und die Chloridkonzentration extrapoliert in definierten Tiefen und zu einer definierten Zeit), welche für eine weitergehende Analyse der Datenbank notwendig sind.

Analyse des Datensatzes

Die Analyse des Datensatzes von tausalzexponierten Bauwerken hat aufgezeigt, dass die Vorhersage der Chloridkonzentration eine komplexe Herausforderung darstellt. Die Auswertung zahlreicher Modelle unter Anwendung von linearen Korrelationsanalysen, Streudiagrammen zur Identifikation von nichtlinearen Zusammenhängen, und

verschiedenen maschinellen Lernverfahren lieferte wertvolle Erkenntnisse über die Limitationen bei der Prognose der Chloridbeaufschlagung.

Die meisten numerischen Variablen zeigten nur schwache lineare Korrelationen ($|R^2| < 0.3$). Durch Streudiagramme wurden teilweise nicht-lineare Trends besser sichtbar. Beispiele von somit identifizierten massgebenden Einflussgrössen waren die horizontale Distanz zur Chloridquelle, sowie die Höhe über Fahrbahn. Zur genaueren Analyse wurde der Datensatz nach Bauwerksarten aufgeteilt. Dabei zeigten sich in den Subgruppen (z.B. Bauwerksart) teils höhere Korrelationen, jedoch verringerte sich die Anzahl der Wertepaare deutlich, was die statistische Aussagekraft einschränkt.

Weiter wurden ANOVA-Analysen durchgeführt, um auch mögliche Einflüsse von kategorischen Parametern zu prüfen. Kategorische Parameter (z. B. Strassenart, Probenart, etc.) unterscheiden sich von numerischen Parametern (z. B. Distanz von Chloridquelle, Bauwerksalter, etc.) und können damit nicht gleichermassen analysiert werden. Die ANOVA-Analysen wurden durchgeführt, um zu untersuchen, ob die Mittelwerte der kontinuierlichen Zielvariablen sich signifikant zwischen den Gruppen unterscheiden, welche durch die kategorischen Parameter gebildet werden. Die ANOVA-Analyse förderte interessante Einflüsse zutage, wobei vor allem der Einfluss der Bauwerksart und des Vorhandenseins eines Oberflächenschutzsystems hervortraten.

Mit Blick auf Maschinelles Lernen (ML), wurden mittels Feature Engineering neue Variablen gebildet, um die Prognosequalität zu verbessern. Zur Vorhersage der Zielvariablen wurden schliesslich verschiedene ML-Modelle getestet. Während einfache Modelle wie lineare Regression geringe R^2 -Werte zeigten, erreichten komplexere Verfahren wie Entscheidungsbaum, Zufallswald, Gradient Boosting und XGBoost höhere, aber weiterhin niedrige R^2 -Werte (unter 0.4). Dies deutet möglicherweise darauf hin, dass die Streuungen erheblich sind oder das lokale Mikroklima mit den Parametern aus der Datenbank nicht adäquat abgebildet werden kann. Insbesondere bei horizontalen Flächen ist beispielsweise zu beachten, dass diese durch bauliche Randbedingung wie Gefälle örtliche variierend unterschiedlich stark oder lange mit Chloriden beaufschlagt sein können.

Die Analyse der Parameterwichtigkeit hat zudem gezeigt, dass deren Bewertung stark vom verwendeten Modell abhängt. Das bedeutet, dass ein Parameter, der in einem bestimmten Modell (z. B. Entscheidungsbaum) als einflussreich erscheint, in einem anderen Modell (z. B. linearer Regression oder Gradient Boosting) eine deutlich geringere Bedeutung aufweisen kann. Die *Feature Importance* ist somit keine objektive Grösse, sondern immer im Kontext der jeweiligen Modellarchitektur, der gewählten Zielvariable zu interpretieren. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, Modellwahl und Ergebnisinterpretation stets gemeinsam zu betrachten und nicht isoliert einzelne Merkmale als «Haupteinflussgrössen» zu definieren.

Empfehlungen für die Praxis

Überprüfung bestehender Modelle anhand des vorliegenden Datensatzes

Ein in der Literatur vorgeschlagene Modell (Lay et al.), welches die Chloridbelastung C_s als Funktion der Höhe über Strasse und der Distanz zur Strasse prognostiziert, lässt sich anhand der im vorliegenden Projekt gesammelten Daten nicht validieren. Aus der vorliegenden Analyse wurde ersichtlich, dass der effektive Chloridgehalt, wie er in den Bauwerken der vorliegenden Datenbank gemessen wurde, in den meisten Fällen durch das Modell von Lay stark unterschätzt wird. Daher ist es nicht empfehlenswert dieses in der Literatur vorgeschlagene Modell, welches anhand von Daten aus Deutschland entwickelt wurde, auf die Verhältnisse der Strasseninfrastruktur der Schweiz anzuwenden.

Vorschlag für Ingenieursätze

Je nach Anwendungsfall unterscheiden sich die Anforderungen und Zielsetzungen an einen «Ingenieuransatz». Für die probabilistische Lebensdauermodellierung – wie sie beispielsweise bei der Dauerhaftigkeitsbemessung neuer Bauwerke in der Planungsphase zur Anwendung kommt – wird die Oberflächenchloridkonzentration C_s in Form einer statistischen Verteilung benötigt. Bei der Zustandsbeurteilung bestehender Bauwerke hingegen stehen andere Aspekte im Vordergrund: Hier kann es etwa darum gehen, gemessene Chloridprofile auszuwerten und die Chloridbelastung eines spezifischen Bauwerks im Vergleich zu anderen Strasseninfrastrukturbauten in der Schweiz einzuordnen. Für eine solche vergleichende Bewertung eignen sich beispielsweise Boxplots oder andere grafische Darstellungen, die es ermöglichen, einzelne Messwerte in den Kontext der gesammelten Datenbank zu stellen.

In dieser Forschungsarbeit wurden zwei konkrete Ingenieurmodelle vorgestellt – eines für die probabilistische Lebensdauermodellierung und eines für die Zustandsbeurteilung bestehender Bauwerke. Beide Ansätze basieren auf den im Rahmen dieses Projekts gewonnenen Erkenntnissen, insbesondere der aufgebauten Datenbank und den durchgeführten Datenanalysen.

Schlussbemerkungen

Trotz des erheblichen Aufwands, der im Rahmen dieses Projekts für die Erstellung der Datenbank betrieben wurde, weist die resultierende Datengrundlage gewisse Limitationen auf. Die Datenbank ist nicht vollständig, teilweise verzerrt (Bias), und die Qualität einzelner Datensätze, insbesondere hinsichtlich der Vollständigkeit von Chloridprofilen und der Genauigkeit der Chloridanalysen sind nicht optimal. Ein echter Durchbruch im Sinne eines breiten, zuverlässigen Einsatzes maschineller Lernverfahren wäre nur mit deutlich grösserem Ressourceneinsatz denkbar. Hierfür müssten Chloridprofile gezielt und standardisiert erhoben werden, idealerweise mit einheitlicher Messmethodik und vollständigen Tiefenprofilen – im Gegensatz zu den aus der Praxis stammenden punktuellen Messungen, die primär anderen Zwecken als der vorliegenden Forschung dienen und verständlicherweise unter starkem Kostendruck stehen.

Unabhängig davon bleibt festzuhalten, dass die Chloridbelastung durch Strassenexposition – anders als bei Meerwasser – mit erheblich grösserer Variabilität einhergeht. Dies ist nachvollziehbar angesichts der komplexen geographischen Gegebenheiten der Schweiz mit ihren unterschiedlichen Regionen, vom Flachland bis zum alpinen Raum, sowie der dezentralen Organisation des Winterdienstes, bei dem unterschiedliche Vorgehensweisen und Philosophien beim Ausbringen von Tausalzen möglich sind. Auch lokale Mikroklimata, etwa aufgrund der Bauwerksgeometrie und Ausrichtung im Raum, tragen zur Variabilität bei.

Vor diesem Hintergrund erscheint der in diesem Bericht vorgestellte Ingenieuransatz als die derzeit zielführendste und praxistauglichste Lösung. Er stellt zweifelsohne einen Fortschritt gegenüber dem bisherigen Stand dar: Zum ersten Mal liegen statistisch breit abgestützte Daten zur Chloridbelastung von Strasseninfrastrukturbauwerken in der Schweiz vor. Diese können sowohl zur modellbasierten Lebensdauerabschätzung (probabilistische Modellierung des Chlorideintrags) als auch zur fundierten Einordnung gemessener Chloridprofile bei der Zustandsbeurteilung herangezogen werden.

Eine signifikante Verbesserung dieses Sachstands wäre vermutlich nur mit erheblichen zusätzlichen finanziellen und zeitlichen Investitionen realisierbar – eine Herausforderung, der sich zukünftige Forschungsvorhaben widmen könnten. In diesem Kontext wäre es beispielsweise in Betracht zu ziehen, die hier erstellte Datenbank in Zukunft weiterzuführen und mit zusätzlichen Daten zu ergänzen, namentlich auch um Effekte anderer Zementarten oder anderer Bauwerkstypen einfließen zu lassen. Mit einem fortgeführten Sammeln der Daten könnte man somit den Grundstein für zukünftige Auswertungen legen.

Résumé

Situation initiale et problématique

Depuis les années 1950, des sels de déverglaçage sont utilisés en Suisse durant les mois d'hiver pour garantir la sécurité du trafic. Ainsi, entre 8 et 40 tonnes de sel sont répandues par kilomètre de route nationale chaque saison hivernale. Cela peut entraîner des dommages considérables aux structures en béton armé, causés par la pénétration d'ions chlorure, notamment lorsque l'armature est en acier conventionnel. La prévision de ces dommages dus à la corrosion des armatures est essentielle pour la planification de la réhabilitation des ouvrages existants, ainsi que pour la conception durable et la dimensionnement des nouvelles constructions.

La recherche internationale a réalisé des progrès significatifs dans la modélisation de la durabilité au cours des dernières décennies, notamment en ce qui concerne la résistance – par exemple en considérant le béton de recouvrement comme barrière au transport des chlorures – et, dans une certaine mesure, en ce qui concerne la teneur critique en chlorures qui initie la corrosion. Toutefois, des lacunes importantes subsistent concernant l'exposition, c'est-à-dire la concentration de chlorures provenant de l'environnement qui affecte une structure. Alors que des valeurs peuvent être mesurées sur des ouvrages existants après environ 10 ans d'exposition, il manque des données fiables pour les nouvelles constructions, ce qui engendre des incertitudes dans la conception de la durabilité. À cela s'ajoute l'impact de l'utilisation de nouveaux types de ciments et de bétons.

Les approches actuelles de conception de la durabilité sont souvent qualitatives ou basées sur des normes prescriptives, ce qui limite leur application aux matériaux modernes. Les effets des conditions environnementales sont représentés dans les normes européennes (et suisses) par des « classes d'exposition ». Pour les structures exposées aux chlorures, les classes XS (exposition aux chlorures d'origine marine) et XD (exposition aux chlorures provenant de sels de déverglaçage) s'appliquent selon la norme EN 206. Ces classes ne permettent qu'une classification qualitative, sans quantification de l'impact des chlorures sur la structure.

Des données sur les concentrations de chlorures dans le béton de recouvrement, en tant que mesure de la charge en chlorures (concentration en chlorures en surface C_s), existent dans la littérature, bien que relativement peu nombreuses, notamment par rapport à d'autres paramètres comme le coefficient de diffusion des chlorures. De plus, les hypothèses de modélisation courantes pour C_s sont souvent de nature « anecdotique » plutôt que fondées sur des faits vérifiables. Les incertitudes concernant C_s sont particulièrement marquées pour l'exposition aux sels de déverglaçage (XD), contrairement à l'exposition marine (XS), mieux documentée. Les recommandations divergentes dans la littérature et les conditions très variables sur les routes – dues aux fluctuations saisonnières et aux différences climatiques entre les Alpes et les plaines –

compliquent la modélisation fiable de la durabilité des infrastructures routières. En conséquence, les prévisions restent imprécises, ce qui peut entraîner une surestimation ou une sous-estimation significative des risques de corrosion dans certains cas.

Objectifs du projet

L'objectif du projet est de mieux cerner l'impact des chlorures sur les ouvrages en béton armé du réseau routier national et cantonal suisse, et ainsi de contribuer à la réduction des incertitudes existantes dans la conception de la durabilité. Pour ce faire, une base de données complète et structurée doit être mise en place, dans laquelle les profils de chlorures issus d'ouvrages ainsi que les paramètres d'influence pertinents seront systématiquement enregistrés. Le projet de recherche se concentre sur la conception de cette base de données, ainsi que sur la collecte et la curation des données. Il s'agira également d'examiner dans quelle mesure des analyses de données à l'aide de méthodes statistiques et d'apprentissage automatique (machine learning) permettent de mieux caractériser et modéliser la charge en chlorures, et ainsi d'améliorer l'état des connaissances dans ce domaine. L'objectif final est de formuler des recommandations pratiques, notamment des approches quantitatives pour prendre en compte l'impact des chlorures lors de l'évaluation de l'état des ouvrages existants et de la conception de la durabilité des nouvelles constructions.

Le projet se concentre explicitement sur l'étude de l'exposition des ouvrages situés le long des routes nationales et cantonales. D'autres types de structures, comme les parkings à étages, ne sont pas pris en compte.

Méthodologie

Pour quantifier la charge en chlorures sur les infrastructures routières, l'approche suivante a été choisie : bien que les quantités et types de sels de déverglaçage utilisés par les services hivernaux, ainsi que les modes d'application (par kilomètre de route), soient souvent connus, il est difficile de déduire directement la charge en chlorures sur les surfaces en béton. Il est donc préférable de mesurer directement la concentration en chlorures dans le béton à différentes profondeurs, représentée sous forme de profils de chlorures. Ces profils capturent la teneur totale en chlorures et montrent généralement une concentration décroissante avec la profondeur, à l'exception de la zone proche de la surface, appelée zone de convection, qui peut dévier de cette tendance.

Dans une première étape, la base de données visée a été conçue et réalisée. Une méthodologie efficace et ciblée pour la collecte des données de mesure des chlorures a été développée, en tenant compte des facteurs d'influence pertinents. L'objectif était de rassembler les données existantes issues des années de pratique des laboratoires d'essai des matériaux impliqués, ainsi que, le cas échéant, des données provenant d'autres sources. En plus des données sur les chlorures, d'autres informations ont été collectées – telles que la localisation géographique de l'ouvrage, le type et l'âge de l'ouvrage, l'orientation et la distance de la surface en béton par rapport à la route, les propriétés des matériaux, les données de trafic et les informations météorologiques – afin de disposer ultérieurement d'une base de données aussi complète que possible pour identifier d'éventuelles corrélations.

Chaque entrée de la base de données contient ainsi un profil de chlorures complet ainsi que les informations associées. Les paramètres pertinents ont été définis au préalable et développés au cours du projet grâce à l'expertise des laboratoires d'essai et de l'école supérieure impliqués. La classification des paramètres s'est faite en deux étapes : d'abord, leur importance (attendue) pour l'analyse ultérieure a été évaluée, puis l'effort estimé pour leur collecte a été déterminé du point de vue des laboratoires. Cette approche a permis une collecte de données ciblée et efficace, tout en garantissant une qualité de données aussi élevée que possible. Pour chaque entrée de chlorures dans la base de données, la collecte de plus de 30 paramètres supplémentaires a été visée, bien que tous n'aient pas été disponibles dans tous les cas.

Dans une deuxième étape, les facteurs d'influence potentiels ont été analysés à l'aide du jeu de données. Avant l'analyse détaillée, la base de données a été soumise à un premier traitement systématique, comprenant le nettoyage des entrées et la mise en forme des données. Pour l'analyse ultérieure, les paramètres avec une grande disponibilité de données et une pertinence élevée ont été priorisés. Étant donné que de nombreux algorithmes de science des données ne tolèrent pas les valeurs manquantes, des stratégies d'imputation appropriées (par exemple, médiane, KNN) ont été utilisées.

Le processus d'analyse des données comprenait également l'ajustement mathématique (fitting) d'un modèle de diffusion aux profils de chlorures mesurés. Cela était nécessaire pour déterminer les deux paramètres fondamentaux – la concentration en chlorures en surface et le coefficient de diffusion – pour chaque profil. Une telle analyse mathématique était également indispensable pour rendre les différents profils comparables ; en effet, les teneurs en chlorures dans le béton n'ont pas toujours été mesurées à des profondeurs cohérentes et rapportées de manière uniforme dans la base de données, ce qui rend une comparaison directe impossible. Le moment de la mesure des chlorures (âge de l'ouvrage) affecte également la comparabilité directe ; l'ajustement mathématique permet ici aussi un recalcul à des moments comparables.

Pour l'ajustement mathématique des profils de chlorures, diverses routines de fitting ont été utilisées afin de permettre une analyse automatisée et fiable des nombreux profils de la base de données. À partir de ces analyses, plusieurs variables cibles ont été extraites, notamment la concentration en chlorures en surface C_s à une profondeur $x = 0$ mm (comme valeur médiane des méthodes de fitting), la valeur maximale du profil mesuré (qui peut apparaître à différentes profondeurs selon la zone de convection du profil concerné), et la concentration en chlorures à des profondeurs définies (par exemple 20 mm ou 30 mm) à un moment défini. Ces valeurs ont été interpolées ou extrapolées à différentes années de référence (25, 50 et 75 ans) à l'aide des paramètres de fitting, en utilisant à chaque fois la médiane des concentrations en chlorures issues des routines de fitting pour la modélisation temporelle.

La démarche méthodologique de l'analyse des données a finalement suivi deux approches : d'une part, des méthodes statistiques classiques et des techniques d'apprentissage automatique supervisé ont été appliquées ; d'autre part, les connaissances d'experts existantes ont été systématiquement intégrées et, si nécessaire, confrontées aux résultats pour les valider. Pour une première évaluation de la qualité des modèles, différents modèles de base ont été entraînés sans validation croisée à l'aide de jeux de

données étendus et standardisés (y compris le feature engineering). Cela comprenait des modèles linéaires (régression linéaire, Ridge, Lasso), k-nearest neighbors, des méthodes basées sur les arbres (arbres de décision, forêts aléatoires), des méthodes d'ensemble (Gradient Boosting, XGBoost) ainsi que le HistGradientBoostingRegressor. La qualité des modèles a été évaluée à l'aide du coefficient de détermination pour toutes les variables cibles ; les modèles avec des valeurs plus élevées ont ensuite été examinés plus en détail et optimisés.

Il était également possible de subdiviser le jeu de données en sous-ensembles – par exemple selon les conditions d'exposition ou le type de structure. Il a été veillé à ce que les sous-groupes restent suffisamment grands et qu'aucune distorsion ne soit introduite par des entrées multiples d'un même ouvrage ou des modèles trop spécifiques. Des paramètres tels que la distance à la source de chlorures, la classe d'exposition ou le type d'ouvrage ont ainsi été examinés. L'objectif était d'identifier, à l'aide de méthodes statistiques et d'apprentissage automatique, les paramètres ayant une influence significative sur la charge en chlorures.

Dans une troisième étape, des recommandations pour la pratique ingénieriale ont été formulées sur la base des analyses réalisées. Pour compléter l'analyse fondée sur les données, les connaissances d'experts ont été intégrées de manière systématique. À cet effet, un workshop a été organisé avec des représentantes et représentants de laboratoires d'essais de matériaux de construction ainsi que des membres de la commission d'accompagnement.

L'objectif de cet événement était de recueillir l'expertise concernant les facteurs d'influence pertinents sur la teneur en chlorures dans le béton et de la confronter aux résultats de l'analyse basée sur les données. L'accent du dernier volet de ce projet a été mis sur la question de savoir dans quelle mesure il est possible de réduire l'incertitude existante concernant la charge en chlorures des ouvrages du réseau routier suisse, et comment les paramètres de modélisation peuvent ainsi être déterminés de manière plus fondée à l'avenir – tout en tenant compte de leur disponibilité pratique.

Résultats

Base de données

La base de données complète comprend environ 1700 profils de chlorures provenant de plus de 160 ouvrages en Suisse, avec une moyenne d'environ 10 profils par ouvrage. Elle peut être téléchargée en libre accès via le lien suivant : <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000748612>

La complétude des variables importantes varie fortement dans la base de données. Pour certains paramètres, comme la date de prélèvement, le type d'ouvrage ou la partie de l'ouvrage, une entrée est présente dans presque tous les cas. Pour d'autres, comme les classes d'exposition XC ou XD, jusqu'à 20 % des entrées peuvent manquer. Pour des paramètres tels que l'orientation de l'exposition, plus de 30 % des données sont parfois incomplètes. Un schéma similaire apparaît pour l'âge des ouvrages, bien que

cela ait pu être considérablement réduit grâce à des mesures ciblées lors de la curation de la base de données.

Une description détaillée de la base de données dépasserait le cadre de ce résumé. Il convient toutefois de noter que les entrées couvrent bien la répartition géographique des différentes conditions climatiques en Suisse (arc jurassien, plateau suisse (« Mittelland »), zone alpine, sud des Alpes). Divers types d'ouvrages (ponts, tunnels, etc.) sont également bien représentés, ainsi que différentes périodes de construction (de 1960 à 2000). Néanmoins, une première analyse a révélé certaines faiblesses : 20 % des profils de chlorures ne comportent que deux valeurs (deux profondeurs), et près de 40 % seulement trois valeurs, ce qui complique l'ajustement mathématique des profils. De plus, un certain biais dans les entrées de la base de données n'a pas pu être totalement évité. Par exemple, les ouvrages situés sur le plateau (environ 500 m d'altitude) sont généralement plus anciens (> 45 ans), tandis que ceux situés en zone alpine sont plus récents.

D'autre part, des analyses simples ont déjà permis d'identifier des résultats intéressants. Il est apparu clairement que l'orientation de la surface en béton par rapport à la source de chlorures a une influence significative sur la charge en chlorures, comme on pouvait s'y attendre. Les surfaces de béton orientées vers la route (source de chlorures), notamment sur les piliers et les têtes de consoles, présentent des concentrations de chlorures nettement plus élevées que les surfaces orientées à l'opposé ou perpendiculaires à la route.

Enfin, il convient de souligner que la conception, la création et la curation de cette base de données ont nécessité un effort financier et humain considérable. Cela met en évidence le fait que l'obtention de jeux de données pour des applications d'apprentissage automatique implique des investissements importants.

Ajustement des profils de chlorures

L'ajustement (fitting) des profils de chlorures s'est révélé plus difficile que prévu, car seulement environ 40 % des profils comportaient plus de quatre points de données. De plus, les profils ne présentaient pas toujours une décroissance monotone dans la zone située après la zone de convection. Dans la mesure du possible, une approche a été développée, reposant essentiellement sur l'application de divers algorithmes d'ajustement robustes, un processus automatisé de sélection et d'exclusion, ainsi qu'une pondération des différents résultats obtenus. Le résultat de cette approche est l'extraction de variables cibles nécessaires à l'analyse approfondie de la base de données, à savoir la concentration en chlorures en surface C_s à une profondeur de $x = 0$ mm (valeur médiane des méthodes d'ajustement), la valeur maximale du profil mesuré, la concentration en chlorures extrapolée à des profondeurs définies (par exemple 20 mm ou 30 mm) et à un moment défini. Ces valeurs ont été interpolées ou extrapolées à différentes années de référence (25, 50 et 75 ans) à l'aide des paramètres d'ajustement, en utilisant à chaque fois la médiane des concentrations en chlorures issues des routines d'ajustement pour la modélisation temporelle.

Analyse du jeu de données

L'analyse du jeu de données relatif aux ouvrages exposés aux sels de déverglaçage a montré que la prévision de la concentration en chlorures constitue un défi complexe. L'évaluation de nombreux modèles, en utilisant des analyses de corrélation linéaire, des diagrammes de dispersion pour identifier des relations non linéaires, ainsi que diverses méthodes d'apprentissage automatique, a permis de mieux comprendre les limites de la prévision de l'exposition aux chlorures.

La plupart des variables numériques n'ont montré que de faibles corrélations linéaires ($R^2 < 0.3$). Les diagrammes de dispersion ont parfois permis de mieux visualiser des tendances non linéaires. Parmi les facteurs d'influence significatifs identifiés figuraient la distance horizontale à la source de chlorures et la hauteur par rapport à la chaussée. Pour une analyse plus précise, le jeu de données a été subdivisé selon les types d'ouvrages. Dans ces sous-groupes (par exemple selon le type d'ouvrage), des corrélations plus élevées ont parfois été observées, mais le nombre de paires de valeurs s'est alors réduit, ce qui limite la signification statistique.

Des analyses ANOVA ont également été réalisées pour examiner les effets possibles de paramètres catégoriels. Ces paramètres (par exemple le type de route, le type d'échantillon, etc.) diffèrent des paramètres numériques (comme la distance à la source de chlorures, l'âge de l'ouvrage, etc.) et ne peuvent donc pas être analysés de la même manière. Les analyses ANOVA ont permis de déterminer si les moyennes des variables cibles continues différaient significativement entre les groupes définis par les paramètres catégoriels. Elles ont mis en évidence des effets intéressants, notamment l'influence du type d'ouvrage et de la présence d'un système de protection de surface.

Concernant l'apprentissage automatique (ML), de nouvelles variables ont été créées par feature engineering afin d'améliorer la qualité des prévisions. Divers modèles ML ont ensuite été testés pour prédire les variables cibles. Alors que les modèles simples comme la régression linéaire ont donné de faibles valeurs de R^2 , des méthodes plus complexes comme les arbres de décision, les forêts aléatoires, le gradient boosting et XGBoost ont atteint des valeurs plus élevées, mais toujours inférieures à 0.4. Cela pourrait indiquer une forte variabilité ou que le microclimat local n'est pas suffisamment représenté par les paramètres de la base de données. En particulier pour les surfaces horizontales, il convient de noter que des conditions locales, comme la pente, peuvent entraîner des expositions aux chlorures très variables.

L'analyse de l'importance des paramètres (« feature importance ») a également montré que leur évaluation dépend fortement du modèle utilisé. Un paramètre jugé influent dans un modèle (par exemple un arbre de décision) peut avoir une importance bien moindre dans un autre (comme une régression linéaire ou un modèle de gradient boosting). L'importance des variables n'est donc pas une grandeur objective, mais doit toujours être interprétée dans le contexte de l'architecture du modèle et de la variable cible choisie. Cela souligne la nécessité de considérer conjointement le choix du modèle et l'interprétation des résultats, sans désigner isolément certains paramètres comme « principaux facteurs d'influence ».

Recommandations pour la pratique

Vérification des modèles existants à l'aide du jeu de données actuel

Un modèle proposé dans la littérature (Lay et al.), qui prévoit la concentration en chlorures en surface C_s en fonction de la hauteur au-dessus de la chaussée et de la distance à la route, ne peut pas être validé à l'aide des données collectées dans le cadre du présent projet. L'analyse a montré que la teneur réelle en chlorures mesurée dans les ouvrages de la base de données est, dans la majorité des cas, fortement sous-estimée par le modèle de Lay. Il n'est donc pas recommandé d'appliquer ce modèle, développé à partir de données allemandes, aux conditions spécifiques des infrastructures routières suisses.

Proposition d'approches d'ingénierie

Selon le cas d'application, les exigences et objectifs d'une « approche d'ingénierie » peuvent varier. Pour la modélisation probabiliste de la durée de vie – utilisée par exemple lors de la conception de la durabilité de nouveaux ouvrages en phase de planification – la concentration en chlorures en surface C_s doit être représentée sous forme de distribution statistique. En revanche, pour l'évaluation de l'état d'ouvrages existants, d'autres aspects sont prioritaires : il peut s'agir, par exemple, d'évaluer des profils de chlorures mesurés et de situer la charge en chlorures d'un ouvrage spécifique par rapport à d'autres infrastructures routières en Suisse. Pour une telle évaluation comparative, des représentations graphiques comme des boxplots sont appropriées, car elles permettent de replacer les valeurs mesurées dans le contexte de la base de données collectée.

Dans ce projet de recherche, deux modèles d'ingénierie concrets ont été présentés – l'un pour la modélisation probabiliste de la durée de vie, l'autre pour l'évaluation de l'état d'ouvrages existants. Les deux approches reposent sur les connaissances acquises dans le cadre de ce projet, en particulier sur la base de données constituée et les analyses effectuées.

Remarques finales

Malgré les efforts considérables déployés dans le cadre de ce projet pour constituer la base de données, le jeu de données résultant présente certaines limitations. La base de données n'est pas complète, partiellement biaisée, et la qualité de certains enregistrements – notamment en ce qui concerne l'exhaustivité des profils de chlorures et la précision des analyses – n'est pas optimale. Un véritable progrès, au sens d'une application large et fiable des méthodes d'apprentissage automatique, ne serait envisageable qu'avec des ressources nettement plus importantes. Pour cela, il faudrait collecter des profils de chlorures de manière ciblée et standardisée, idéalement avec une méthode de mesure uniforme et des profils de profondeur complets – contrairement aux mesures issues de la pratique, qui servent principalement à d'autres fins que la recherche et sont naturellement soumises à de fortes contraintes budgétaires.

Indépendamment de cela, il convient de souligner que l'exposition aux chlorures due à la route – contrairement à celle due à l'eau de mer – présente une variabilité nettement plus élevée. Cela s'explique par la complexité géographique de la Suisse, avec ses différentes régions allant des plaines aux zones alpines, ainsi que par l'organisation décentralisée du service hivernal, où différentes approches et philosophies d'épandage de sel peuvent coexister. Les microclimats locaux, dus par exemple à la géométrie des ouvrages et à leur orientation dans l'espace, contribuent également à cette variabilité.

Dans ce contexte, l'approche d'ingénierie présentée dans ce rapport apparaît comme la solution la plus prometteuse et la plus applicable à ce jour. Elle représente sans aucun doute un progrès par rapport à l'état actuel : pour la première fois, des données statistiquement solides sur la charge en chlorures des ouvrages d'infrastructure routière en Suisse sont disponibles. Celles-ci peuvent être utilisées aussi bien pour l'estimation de la durée de vie basée sur des modèles (modélisation probabiliste de la pénétration des chlorures) que pour l'évaluation fondée des profils de chlorures mesurés lors de l'analyse de l'état des ouvrages.

Une amélioration significative de cet état des connaissances ne serait probablement réalisable qu'avec des investissements financiers et temporels supplémentaires importants – un défi que de futurs projets de recherche pourraient relever. Dans ce contexte, il serait par exemple envisageable de poursuivre la base de données créée ici et de l'enrichir avec de nouvelles données, notamment pour intégrer les effets d'autres types de ciments ou de structures. Une collecte continue des données pourrait ainsi jeter les bases d'analyses futures.

Summary

Background and problem statement

Since the 1950s, de-icing salts have been used in Switzerland during the winter months to ensure road safety. Today, between 8 and 40 tons of salt are applied per kilometer of road on the Swiss national road network each winter season. However, this can lead to significant damage to reinforced concrete structures due to the ingress of chloride ions, particularly in structures built with conventional steel reinforcement. Predicting such damage caused by reinforcement corrosion is crucial for planning the repair of existing structures and for the sustainable design and long-term durability of new structures.

Over the past decades, the international research community has made considerable progress in the field of durability modeling, especially regarding resistance, such as considering the concrete cover as a barrier against chloride transport, and to some extent, in understanding the critical chloride content that initiates corrosion. However, there are still major knowledge gaps concerning the exposure, i.e., the chloride concentration from the environment acting on a structure. While such values can be measured in existing structures after a certain exposure period (approx. 10 years), reliable data for new structures is lacking. This leads to uncertainties in durability design. Additionally, the use of new types of cement and concrete introduces further complexity.

Current durability design approaches are often qualitative or based on prescriptive standards, which can be limiting, especially when using modern construction materials. Environmental exposures are represented in European (and Swiss) standards by so-called “exposure classes.” For chloride-exposed structures, the EN 206 standard defines the exposure classes XS (chlorides from seawater) and XD (chlorides from de-icing salts). These exposure classes are only qualitative classifications and do not allow for any quantification of chloride exposure on the structure.

Data on chloride concentrations in the concrete cover – as a measure of chloride load (surface chloride concentration C_s) – is available in the literature, although relatively limited, especially compared to other parameters such as the chloride diffusion coefficient. Moreover, the typical modelling assumptions for C_s found in the literature are often anecdotal rather than transparently evidence-based. The uncertainties regarding surface chloride concentration C_s are particularly pronounced for de-icing salt exposure (XD), in contrast to the better-documented seawater exposure (XS). Varying recommendations in the literature and highly variable conditions in road environments – such as seasonal fluctuations and climatic differences between alpine and lowland regions – make it difficult to reliably model the durability of road infrastructure. As a result, predictions remain imprecise, and corrosion risks can be significantly over- or underestimated in individual cases.

Project aims

The aim of the project is to better define the chloride exposure of reinforced concrete structures in the Swiss national and cantonal road network and thereby contribute to reducing existing uncertainties in durability design. To this end, a comprehensive, structured database was aimed to be developed in which chloride profiles from structures and relevant influencing parameters shall be systematically recorded. The focus of the research project is on the design of the database as well as the collection and curation of data. Furthermore, the project sought to investigate to what extent data analysis using statistical methods and machine learning can help to better characterize and model chloride exposure, thereby improving the current state of knowledge. The ultimate goal was to derive practical recommendations, particularly quantitative approaches for considering chloride exposure in the condition assessment of existing structures and the durability design of new structures.

The project explicitly focuses on the exposure of structures along national and cantonal roads. Other types of structures, such as parking garages, are not considered.

Methodology

To quantify the chloride exposure of road infrastructure, the following approach was chosen: Although the quantities and types of de-icing salts applied by winter road maintenance services, as well as the application methods (e.g., per road kilometre), are often known, directly deriving the chloride load on concrete surfaces remains challenging. Therefore, direct measurement of chloride concentration in concrete at various depths – represented as so-called chloride profiles – was considered the most suitable method. These profiles capture the total chloride content and typically show a decreasing concentration with depth, except in the near-surface zone (the so-called convection zone), which may deviate from this trend.

In the first step, the intended database was designed and created. A methodology was developed to efficiently and purposefully collect chloride measurement data, taking into account relevant influencing factors. The goal was to consolidate existing data from years of practical work by participating construction material testing laboratories, as well as potentially data from other sources. In addition to chloride data, further information was collected – such as the geographical location of the structure, type and age of the structure, orientation and distance of the concrete surface to the road, material properties, traffic data, meteorological information, and more – to provide a comprehensive data basis for identifying potential correlations.

Each database entry thus contains a complete chloride profile along with the associated metadata. Relevant parameters were defined in advance and further refined during the project based on the expertise of the research team. The parameters were categorized in two stages: first, their (expected) relevance for later analysis was assessed; second, the estimated effort required for data collection from the laboratories' perspective was evaluated. This approach ensured targeted and cost-effective data collection while maintaining high data quality. For each chloride entry, the collection of over 30 additional parameters was targeted, although not all were available in every case.

In the second step, potential influencing factors were analysed using the dataset. Before detailed analysis, the database underwent an initial systematic preparation, including cleaning of entries and formatting of data. For further evaluation, parameters with high data availability and relevance were prioritized. Since many data science algorithms do not tolerate missing values, suitable imputation strategies (e.g., median, KNN) were applied where necessary.

The data evaluation and analysis process also included mathematical fitting of a diffusion model to the measured chloride profiles. This was necessary to determine two fundamental parameters for each profile: surface chloride concentration and diffusion coefficient. Such mathematical evaluation was also essential to make the various chloride profiles comparable; chloride concentrations in concrete were not always measured at consistent depth intervals and reported accordingly in the database, which hindered direct comparison. Additionally, the timing of chloride measurement (structure age) affects comparability; mathematical fitting allows recalculation to comparable reference times.

Various fitting routines were used to enable automated and reliable evaluation of the numerous chloride profiles in the database. From these analyses, several target variables were extracted, including the surface chloride concentration C_s at depth $x = 0$ mm (as the median value from fitting methods), the maximum value of the measured chloride profile (which may occur at different depths depending on the convection zone), and the chloride concentration at defined depths (e.g., 20 mm or 30 mm) and at a defined time. These values were interpolated or extrapolated to different reference years (25, 50, and 75 years) using the fitting parameters, with the median of the corresponding chloride concentration from the fitting routines used for time-based modelling.

The methodological approach to data analysis followed two paths: on the one hand, classical statistical methods and supervised machine learning techniques were applied, and on the other hand, expert knowledge was systematically captured and integrated as needed to validate and contextualize the results. For an initial assessment of model performance, various baseline models were trained without cross-validation using extended, standardized datasets (including feature engineering). These included linear models (Linear Regression, Ridge, Lasso), k-nearest neighbours, tree-based methods (Decision Tree, Random Forest), ensemble methods (Gradient Boosting, XGBoost), and the HistGradientBoostingRegressor. Model performance was evaluated using the coefficient of determination for all target variables; models with higher values were further investigated and optimized. Additionally, the dataset could be divided into sub-datasets – e.g., by exposure conditions or structure type – while ensuring that sub-groups remained sufficiently large and avoiding bias from duplicate entries or overly specific models. Parameters such as distance to chloride source, exposure class, or structure type were examined. The goal was to identify, through statistical methods and machine learning, the parameters that significantly influence chloride exposure.

In the third step, recommendations for engineering practice were derived based on the analysis. To complement the data-driven analysis, expert knowledge was systematically incorporated. A workshop was held with representatives from construction

material testing laboratories and members of the project's advisory committee. The aim of this event was to capture expert insights into relevant influencing factors on chloride content in concrete and to compare them with the results of the data-driven analysis. The final focus of the project was to assess how the existing uncertainty regarding chloride exposure of structures in the Swiss road network can be reduced and how model parameters can be more reliably determined in the future – always considering their practical availability.

Results

Database

The complete database contains approximately 1,700 chloride profiles from over 160 structures in Switzerland, with an average of nearly 10 profiles per structure. The database (in German) is available for open access download at the following link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000748612>

The completeness of key variables in the database varies significantly. For certain parameters – such as sampling date, structure type, or structural component – entries are available in nearly all cases. However, for other parameters, such as exposure class (XC or XD), up to 20% of entries are missing. For parameters like exposure orientation, more than 30% of the data is incomplete. A similar pattern was observed for the age of the structure, although targeted curation measures significantly reduced this issue.

A detailed description of the database exceeds the scope of this summary. However, it is worth noting that the entries cover the geographic distribution of Switzerland's climatic zones well (Jura arc, central plateau ("Mittelland"), Alpine zone, southern region). Various structure types (bridges, tunnels, etc.) and construction years (from 1960 to 2000) are also well represented. Nonetheless, initial analysis revealed some limitations: 20% of the chloride profiles consisted of only 2 depth values, and nearly 40% of profiles had only 3 depth values, which poses challenges for mathematical fitting. Additionally, some bias in the database entries could not be fully avoided. For example, structures in the "Mittelland" (~500 m above sea level) tended to be older (>45 years), while those in the Alpine region were generally younger.

Simple evaluations of the database entries yielded interesting findings. For instance, the orientation of the concrete surface relative to the chloride source significantly influenced chloride exposure, as expected. Concrete surfaces facing the road (chloride source), such as on columns and cantilever heads, showed significantly higher chloride content than surfaces facing away or perpendicular to the road.

Finally, it should be noted that the design, creation, and curation of the database required substantial financial and personnel resources – highlighting the fact that obtaining datasets suitable for machine learning applications involves considerable effort and investment.

Fitting of chloride profiles

Fitting chloride profiles proved unexpectedly difficult, as only about 40% of profiles contained more than 4 data points, and many profiles did not show a monotonically decreasing trend beyond the convection zone. A tailored approach was developed, based on the use of various robust fitting algorithms, an automated selection and exclusion process, and weighting of the results. The outcome of this approach was the extraction of target variables (surface chloride concentration C_s at depth $x = 0$ mm, maximum value of the measured chloride profile, and the chloride concentration extrapolated to defined depths and times). These variables are essential for further analysis of the database.

Dataset analysis

Analysis of the dataset for structures exposed to de-icing salts revealed that predicting chloride concentration is a complex challenge. Evaluations using linear correlation analyses, scatter plots to identify nonlinear relationships, and various machine learning methods provided valuable insights into the limitations of chloride exposure prediction.

Most numerical variables showed only weak linear correlations ($|R^2| < 0.3$). Scatter plots helped reveal some nonlinear trends, with key influencing factors identified, such as horizontal distance to the chloride source and height above the roadway. For more detailed analysis, the dataset was divided by structure type. While some subgroups showed higher correlations, the number of data pairs decreased significantly, limiting statistical significance.

Further ANOVA analyses were conducted to examine the influence of categorical parameters (e.g., road type, sample type), which differ from numerical parameters (e.g., distance to chloride source, structure age). These analyses assessed whether the means of continuous target variables differed significantly between groups defined by categorical parameters. Notable influences were found, particularly from structure type and the presence of surface protection systems.

In terms of machine learning (ML), new variables were created through feature engineering to improve prediction quality. Various ML models were tested to predict the target variables. While simple models like linear regression showed low R^2 values, more complex methods – such as decision trees, random forests, gradient boosting, and XGBoost – achieved higher but still modest R^2 values (below 0.4). This may suggest significant data variability or that local microclimatic conditions are not adequately captured by the database parameters. For example, horizontal surfaces may be exposed to chlorides differently depending on structural features like slope.

The importance of parameters also varied significantly depending on the model used. A parameter deemed influential in one model (e.g., decision tree) may have much less importance in another (e.g., linear regression or gradient boosting). Thus, feature importance is not an objective measure, but must be interpreted in the context of the model architecture and chosen target variable. This underscores the need to consider

model selection and result interpretation together, rather than defining individual features as “main influencing factors” in isolation.

Recommendations for practice

Review of existing models using the present dataset

A model proposed in the literature (Lay et al.), which predicts the surface chloride concentration C_s as a function of height above the road and distance from the road, could not be validated using the data collected in this project. The analysis showed that the actual chloride content measured in the structures of the present database is significantly underestimated by the Lay model in most cases. Therefore, it is not recommended to apply this model, which had been developed using data from Germany, to the conditions of Swiss road infrastructure.

Proposal for engineering approaches

Depending on the application, the requirements and objectives of an "engineering approach" vary. For probabilistic service life modelling – as used in the durability design of new structures during the planning phase – the surface chloride concentration C_s is needed in the form of a statistical distribution.

In contrast, for the condition assessment of existing structures, other aspects are more relevant. For example, the goal may be to evaluate measured chloride profiles and compare the chloride exposure of a specific structure to other road infrastructure in Switzerland. For such comparative evaluations, boxplots or other graphical representations are suitable, as they allow individual measurements to be placed in the context of the collected database. This research project presents two specific engineering models: One for probabilistic service life modelling, and one for the condition assessment of existing structures. Both approaches are based on the findings of this project, particularly the developed database and the conducted data analyses.

Final Remarks

Despite the considerable effort invested in creating the database, the resulting dataset has certain limitations. The database is not complete, partially biased, and the quality of individual datasets – especially regarding the completeness of chloride profiles and the accuracy of chloride analyses – is not optimal. A true breakthrough enabling broad and reliable use of machine learning methods would only be possible with significantly greater resources. This would require targeted and standardized collection of chloride profiles, ideally using uniform measurement methods and complete depth profiles – in contrast to the available measurements from practice, which primarily serve other purposes and are understandably subject to cost constraints.

Regardless, it is important to note that chloride exposure from road environments – unlike from seawater – comes with much greater variability. This is understandable given Switzerland's complex geography, ranging from lowlands to alpine regions, and the decentralized organization of winter road maintenance, which allows for different

approaches and philosophies in salt application. Local microclimates, influenced by structural geometry and orientation, also contribute to this variability.

Against this background, the engineering approach presented in this report appears to be the most practical and effective solution currently available. It undoubtedly represents progress over the previous state of the art: for the first time, statistically well-supported data on chloride exposure of road infrastructure in Switzerland is available. This data can be used both for model-based service life estimation (probabilistic modelling of chloride ingress) and for informed interpretation of measured chloride profiles in condition assessments.

A significant improvement of this state of knowledge would likely only be achievable through substantial additional financial and time investments – a challenge that future research projects could address. In this context, it may be worth considering the continuation and expansion of the database, including additional data on other cement types or structure types. Continued data collection could thus lay the foundation for future evaluations and data analyses.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Seit den 1950er-Jahren werden für die Verkehrssicherheit auf den Schweizer Strassen in den Wintermonaten regelmässig Tausalze eingesetzt [1]. Stahlbetonbauwerke können durch die im Tausalz enthaltenen Chloridionen erheblich beschädigt werden. Die Abschätzung des Schadensausmasses infolge der Tausalzbelastung ist für die Instandsetzungsplanung von erheblichem Interesse. Daraus können auch Hinweise für die nachhaltige Bemessung und dauerhafte Dimensionierung neuer Bauwerke gewonnen werden.

Diese unerlässlichen Abschätzungen erfordern verlässliche und quantitative Vorhersagen über die Zustandsentwicklung, welche ebenfalls entscheidend für die Berechnung von Lebenszykluskosten sind. Diese Prognosen werden in der Schweiz und vielen anderen Ländern heute vorwiegend qualitativ oder anhand «präskriptiver Normen» vorgenommen. Nachteile dieser Vorgehensweisen sind einerseits die Unschärfe bzw. Subjektivität, insbesondere bei qualitativen Prognosen durch Fachkräfte unterschiedlichen Hintergrunds bezüglich Ausbildung und beruflicher Erfahrung. Andererseits lässt sich das «präskriptive» Vorgehen wegen fehlender Langzeiterfahrung nur beschränkt auf moderne Baustoffe (z. B. neuartige Zemente) übertragen. Für eine wirtschaftliche Instandhaltungsplanung und für bessere Grundlagen zur Dimensionierung dauerhafter neuer Bauwerke sind daher verfeinerte, datenbasierte Ansätze erforderlich.

In dieser Hinsicht kommt der Modellierung der Lebensdauer, d.h. der Prognose der Alterungsprozesse, eine zunehmend wichtige Rolle zu. Solche Modelle wurden über die vergangenen Jahrzehnte intensiv entwickelt. Insbesondere für die chlorid-induzierte Korrosion der Bewehrung im Beton - als einem der weltweit häufigsten Schadensmechanismus bei Stahlbetonbauwerken - existieren entsprechende Modelle. Diese Modelle betrachten den Transport von Chloriden durch den Überdeckungsbeton, bis zu dem Zeitpunkt, bei welchem die Korrosion am eingebetteten Bewehrungsstahl initiiert. Diese Dauerhaftigkeitsmodelle entsprechen konzeptionell jenen zur Dimensionierung des Tragverhaltens bei statischen und dynamischen Lasten, welche traditionell breite Anwendung in der Ingenieurpraxis finden. Dabei werden Einwirkungen (E) mit Widerständen (R) gegenübergestellt (wobei R grösser als E sein soll, vgl. Gleichung (1)) und damit die entsprechenden Bauteile nachgewiesen.

$$E < R \quad (1)$$

Während die Einwirkungen aus der geplanten Nutzung (Nutzlasten, Bremskräfte etc.) und den Umgebungsbedingungen (Windlasten, wetterbedingte Exposition, chemische Einflüsse, etc.) resultieren, kann der Widerstand durch Materialwahl

(Betoneigenschaften, Stahlgüte, etc.), sowie Geometrie und konstruktive Aspekte (Bewehrungsdurchmesser, Bewehrungsüberdeckung, etc.) optimiert werden. Im Sinne der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit kann somit ein unnötiges «Überdimensionieren» verhindert werden. Gleichzeitig wird hinsichtlich der Gewährleistung der Dauerhaftigkeit mit einer gewissen Sicherheitsmarge sichergestellt, dass die Bewehrungsüberdeckungen genug gross gewählt werden, damit der Widerstand auch bei Alterungsprozessen, während der gesamten Lebensdauer grösser ist als die Einwirkungen.

Die internationale Forschungsgemeinschaft hat über die letzten Jahrzehnte für die Dauerhaftigkeitsmodellierung erhebliche Fortschritte im Bereich des Widerstands erzielen können, vorab hinsichtlich des Überdeckungsbetons als «Barriere» gegen den Chloridtransport, und zu einem gewissen Grad auch hinsichtlich der für das Initiieren der Korrosion notwendigen Chloridkonzentration (kritischer Chloridgehalt). Jedoch bestehen grosse Lücken hinsichtlich der Einwirkung, d.h. konkret der Chloridkonzentration, welche von der Umwelt auf ein Bauwerk einwirkt. Bei bestehenden Bauwerken kann nach einer ausreichend langen Expositionszeit (ca. >10 Jahre oder mehr) der Chloridgehalt gemessen und als Input für die Restlebensdauermodellierung verwendet werden. Bei neuen Bauwerken fehlt jedoch die Möglichkeit, die aktuellen Expositionsbedingungen präzise zu bestimmen oder quantifizieren, was zu Unsicherheiten bei den notwendigen Annahmen für die Dauerhaftigkeitsbemessung führt.

Während der Einfluss von Meerwasserexposition (Expositionsklasse XS) auf die Bauwerke vergleichsweise gut dokumentiert ist, bestehen insbesondere bei der Tausalzexposition (Expositionsklasse XD3) erhebliche Unsicherheiten (vgl. Kapitel 1). Dies wird unterstrichen durch die unterschiedlichen Empfehlungen in der Literatur zur Oberflächenchloridkonzentration C_s , welche für die Abschätzung der Tausalzbelastung zentral ist. Die Tatsache, dass hinsichtlich Tausalzexposition grössere Unsicherheiten im Sachstand bestehen als bei Meerwasserexposition ist nicht zuletzt auch daraus ersichtlich, dass das fib-Bulletin 76 [2] für Oberflächenchloridkonzentrationen bei Strassenexposition einen Variationskoeffizient von 75% angibt, während dieser bei Meerwasserexposition deutlich geringer ist (im Bereich 25% – 45%). Diese Situation ist bedingt durch die unterschiedliche Variabilität der Bauwerksexposition, namentlich die im Vergleich zu Meerwasserexposition äusserst variablen Bedingungen bei der Strassenexposition, beispielsweise aufgrund ausgeprägter saisonaler Schwankungen oder geografischer Einflüsse (stark unterschiedliches Klima zwischen Alpen und Mittelland).

Die direkte Folge dieser Lücken im Sachstand ist, dass Modellrechnungen ungenau bleiben und sie die Korrosionsrisiken im Einzelfall erheblich unter- oder überschätzen können.

1.2 Projektziele und Abgrenzungen

Ziel des vorliegenden Projektes ist es, einen Beitrag zur Lösung der vorangehend erwähnten Problematik zu leisten. Dazu soll für die Bedingungen der Schweiz, namentlich für Kunstbauten des Nationalstrassennetzes bzw. des Kantonalstrassennetzes, eine Grundlage geschaffen werden, um die Chlorideinwirkung auf ein Bauwerk besser einzugrenzen als dies heute möglich ist.

Baustoffprüflabore analysieren jedes Jahr unzählige von Chloridprofilen in Betonbauwerken. In diesem Projekt sollen diese verfügbaren Daten genutzt werden. Ziel ist die systematische Erfassung verfügbarer Daten zur Chloridbelastung an verschiedenen Bauwerken, über die ganze Schweiz verteilt, in Form einer Datenbank. Um die Ziele des Forschungsprojekts zu erreichen, soll namentlich die Chloridbelastung existierender Bauwerke im Kantonsstrassen- oder Nationalstrassennetz systematisch anhand unterschiedlicher Parameter (Alter des Bauwerks, Distanz zur Chloridquelle, Typ des Bauwerks, gewählte Expositionsklasse, usw.) in einer strukturierten Datenbank erfasst werden. Diese Datenbank soll mittels statistischer Methoden und von maschinellem Lernen systematisch analysiert werden, um die Chloridbelastung unterschiedlicher Bauteile oder Bauwerke besser zu charakterisieren. Durch diese strukturierte Analyse soll der bislang nur unzureichend mit Messwerten untermauerte Kenntnisstand verbessert werden. Dies bildet die Grundlage für eine objektive und statistisch fundierte Wegleitung zur Bestimmung der Chlorideinwirkung auf Stahlbetonbauwerke in der Schweiz. Darüber hinaus soll untersucht werden, inwiefern sich dadurch die Unsicherheiten in der Vorhersage der chlorid-induzierten Korrosion im Stahlbeton reduzieren lassen.

Der Fokus des Forschungsprojekts liegt auf der Sammlung von Daten bezüglich der Einwirkung von Chloriden aus den Umgebungsbedingungen und nicht auf dem Widerstand des Eindringens von Chloriden in den Überdeckungsbeton. Für letztgenanntes wurden in der Vergangenheit bereits erhebliche Forschungsanstrengungen [3], [4], [5], [6], [7] unternommen. Diese führten zur Erstellung nationaler oder internationaler Normen und Merkblätter, sowie Testmethoden, etwa zur Prüfung des "Chloridwiderstands" von Beton.

Die Datenbank soll final mindestens 1'500 einzelne Chloridprofile von über 150 unterschiedlichen Bauwerken mit mehreren Parametern enthalten. Sie sollen Rückschlüsse für die Chlorideinwirkung anhand massgebender Parameter erlauben, welche die Modellierung der Lebensdauer von grosser Wichtigkeit sind.

Im Rahmen dieses Projektes liegt der Schwerpunkt explizit auf der Untersuchung der Exposition von Bauwerken entlang von National- und Kantonsstrassen. Andere Bauwerksarten, wie beispielsweise Parkhäuser, werden nicht berücksichtigt. Weiter werden Daten aus Bauwerksbereichen explizit nicht berücksichtigt, in welchen der Beton gerissen ist (z. B. Chloridprofil an einem Bohrkern im Rissbereich). Der Transport von Chloriden durch den Beton im Rissbereich unterscheidet sich vom Chloridtransport im ungerissenen Beton [8], [9], [10], [11]. Daten aus Rissbereichen können daher nicht gleichermassen ausgewertet werden, und wurden für die vorliegenden Fragestellungen als nicht zielführend betrachtet.

Mögliche langfristige Einflüsse der Klimaerwärmung, wie beispielsweise geringerer oder erhöhter Bedarf an Tausalzen in der Zukunft in Abhängigkeit von der geographischen Lage und andere übergeordnete Langzeiteinflüsse werden nicht berücksichtigt. Übergeordnete Langzeiteinflüsse wären möglicherweise eine Änderung hinsichtlich der Anforderungen an die Verfügbarkeit von eisfreien Strassen, wie beispielsweise eine

ganzjährige Verfügbarkeit von Passstrassen, welche aktuell noch Wintersperren aufweisen oder die Umnutzung von Standstreifen.

2 Sachstand

2.1 Winterdienst auf Nationalstrassen

Um die Chlorideinwirkung auf Bauwerke zu quantifizieren, ist es unerlässlich, die Quelle für die Chloridbeaufschlagung zu betrachten. Die Hauptquelle für die Beaufschlagung der hier betrachteten Bauwerke (Strasseninfrastruktur) ist der Winterdienst, insbesondere die Verwendung von unterschiedlichen Taumitteln. Im Folgenden werden relevante Aspekte des Winterdienstes kurz geschildert.

Der gesetzlich vorgeschriebene Winterdienst auf den Schweizer Nationalstrassen gehört zum betrieblichen Unterhalt und ist in elf Gebietseinheiten organisiert [12]. Die pro Einsatz gestreute Salzmenge variiert je nach Wetterlage und liegt typischerweise zwischen 5 und 20 g pro m² [12]. Pro Wintersaison werden auf dem Schweizer Nationalstrassennetz pro Strassenkilometer insgesamt 8 bis 40 Tonnen Salz ausgebracht [12]. Diese Streusalzmengen pro Quadratmeter decken sich mit den Angaben des Kantons Zürich, welcher im Durchschnitt mit 12 bis 15 g/m² pro Einsatz rechnet [13].

Diese Werte schwanken über die Zeit einerseits durch technologische Fortschritte wie beispielsweise den Einsatz von Messsystem zur Anpassung der Streusalzmenge oder den Einsatz von speziellen Taumitteln. Andererseits variiert die Streusalzmenge je nach Temperatur- und Feuchtigkeitsprofil über den Winter als auch durch die topographische Lage respektive den klimatischen Unterschieden [13], [14].

Technologische Fortschritte und moderne Messsysteme mit Infrarot-Thermometern ermöglichen eine Echtzeitmessung der Bodentemperatur und eine präzise Anpassung der Salzmenge [12]. Dadurch lassen auf Autobahnen bis zu 20 oder gar 25 % Streusalzeinsparungen erzielen, ohne die Verkehrssicherheit zu beeinträchtigen [12]. Dies entlastet sowohl die Umwelt als auch das Budget für den Winterdienst [12].

Zur Bekämpfung von Glatteis kommen auch spezielle Auftaumittel zum Einsatz. Dabei handelt es sich meist um Salzmischungen, die die Bildung von Eisglätte selbst bei tieferen Temperaturen verhindern [12]. Die Anwendung solcher Mittel im Winterdienst muss umweltgerecht erfolgen, wobei der Schutz von Gewässern besonders im Fokus steht [12]. Der Winterdienst auf Nationalstrassen richtet sich nach den Vorgaben des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) [15]. Die für den Einsatz gegen Glatteis zugelassenen Mittel sind in der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung aufgeführt [15].

Die topografische und meteorologische Lage des Kantons Zürich stellt beispielsweise besondere Anforderungen an den Strassenunterhalt [16]. Der Kanton Zürich liegt in einer klimatisch gemässigten Zone, in der Temperaturen zwischen -5 und +5°C häufig auftreten [16]. Dieser Bereich ist besonders kritisch für den Strassenunterhalt, da hier schnelle Glättebildungen sowie häufige Temperaturwechsel um den Gefrierpunkt auftreten können, was das Gefrieren und Tauen von Wasser mehrfach am Tag auslöst [16]. Im Vergleich dazu erfordern kältere Regionen, etwa im alpinen Raum wie in Davos,

mit tieferen Temperaturen unter dem Gefrierpunkt andere Unterhaltsstrategien [16]. Die Massnahmen des Winterdienstes haben somit langfristige Konsequenzen für die Bauwerke in Strassennähe.

2.2 Folgen der Chloridbeaufschlagung von Bauwerken

Der Winterdienst führt somit unweigerlich zu einer Beaufschlagung der Bauwerke mit chloridhaltigen Taumitteln. Der Prozess beginnt mit dem Eindringen der Chloridionen in den Überdeckungsбетон, bis eine sogenannte kritische Konzentration an der Bewehrungsoberfläche erreicht ist [17], [18], [19]. Diese kritische Chloridkonzentration kann lokal zur Zerstörung der Passivschicht - eine dünne Eisenoxidschicht, welche den Bewehrungsstahl im alkalischen Beton vor Korrosion schützt - führen, und die Initiierung von Lochkorrosion begünstigen [20]. Dies wiederum kann lokal zu signifikantem Materialabtrag (Stahlverlust) führen. Dieser Prozess ist verantwortlich für die tragsicherheitsrelevante "Auflösung" der Bewehrung und führt zur Verkürzung der Unterhaltszyklen und Nutzungsdauer von Bauwerken. Die damit verbunden finanziellen Schäden sind beträchtlich [21].

Der durch chloridinduzierte Korrosion verursachte, erhöhte Instandhaltungs- und Erneuerungsbedarf [21] verdeutlicht die Notwendigkeit, die Chlorideinwirkung bei der Planung und der Instandhaltung von Bauwerken zu berücksichtigen.

2.3 Chlorideinwirkungen im Normenwesen

Bei der Dimensionierung von Bauwerken hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit kann das in Kapitel 1.1 eingeführte Konzept einer Gegenüberstellung von Einwirkung und Widerstand angewandt werden. Die Einwirkungen aus Umgebungsbedingungen, die zu Alterungs- und Schädigungsprozessen führen, werden in den europäischen (und Schweizer) Normen mittels sogenannten «Expositionsklassen» abgebildet.

Für chloridexponierte Bauwerke gelten gemäss Norm EN 206 die Expositionsklassen XS (Chloride aus Meerwasserexposition) und XD (Chloride aus Tausalzexposition). Diese Expositionsklassen erlauben lediglich eine grob abgestufte Klassifizierung, wie Tabelle 1 für das Beispiel der Schweizer Norm SN EN 206-1 zeigt [22]. Diese Klassifizierung in den Normen ist ausschliesslich qualitativ. Sie erlaubt keinerlei Quantifizierung der Chlorideinwirkung auf das Bauwerk.

Expositionsbedingungen		
Expositionsklasse	Beschrieb	Beispiel / Präzisierung
XD1	mässige Feuchte	Betonoberflächen, die chloridhaltigem Sprühnebel ausgesetzt sind
XD2a	nass, selten trocken Chloridgehalt $\leq 0,5$ g/l	Süsswasser-Schwimmbecken
XD2b	nass, selten trocken Chloridgehalt $> 0,5$ g/l	Soleschwimmbecken, Bauteile im Kontakt mit chloridhaltigen Industrieabwässern, Strassenabwasser-Behandlungsanlagen (SABA)
XD3	wechselnd nass und trocken	Teile von Brücken, Parkdecks oder Stützmauern, die chloridhaltigem Spritzwasser ausgesetzt sind.

Tabelle 1: Expositionsbedingungen für Tausalze gemäss SN EN 206.

2.4 Chloridbelastung von Betonbauwerken durch Tausalze

2.4.1 Tausalze

Die anfänglichen Chlorideindringmodelle für Bauwerke der Strasseninfrastruktur basieren auf Konzepten, die ursprünglich für Meerwasserexposition entwickelt wurden [23]. Dabei wurden die Parameter an die Bedingungen in der Nähe von Strassen angepasst. Bei Bauwerken in Meeresnähe wird der Chloridtransport primär durch Wellenbewegungen und Wind beeinflusst. Im Gegensatz dazu sind bei Bauwerken, die Tausalzen ausgesetzt sind, vor allem Fahrzeuge des Strassenverkehrs die Hauptursache für den Chloridtransport zum Bauwerk. Spezifische Modelle, die ausschliesslich das Eindringen von Chloriden in Strassenbauwerke beschreiben, sind jedoch selten [24]. Ein weiterer grosser Unterschied zur Meerwasserexposition sind die wechselnden Witterungsbedingungen über das Jahr, die sowohl zu Chlorideintrag, -Umverteilung oder -Auswaschen führen können [23].

Um die Belastung von Bauwerken durch Tausalze einzuschätzen, ist es notwendig, die Verteilung des Salzes von der Strasse in die Umgebung und letztlich zum Bauwerk zu untersuchen. Einerseits treten Verluste von Streusalz während des Auftrags auf, andererseits wird das gelöste Salz als Spritzwasser und Sprühnebel in die Umwelt verteilt. Verluste können durch die Verwehung trockener Salzkörner durch den Wind, den Abfluss salzhaltigen Wassers und das Entfernen von salzhaltigem Schneematsch durch Räumungsfahrzeuge entstehen. Das Ausmass dieser Verlust wird hauptsächlich vom Feuchtigkeitszustand der Strasse, der Methode der Salzaufbringung und der Verkehrsdichte bestimmt [25], [26], [27].

Wenn ein Fahrzeug über eine Schicht aus Wasser oder Schneematsch fährt, wird das zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche befindliche Gemisch verdrängt und teilweise zur Seite geschleudert. Dies wird allgemein als Spritzwasser bezeichnet. Spritzwasser ist durch grosse Tropfen gekennzeichnet, die kaum durch Windverwehungen erfasst werden und daher mit hoher Geschwindigkeit auf nahegelegene Betonoberflächen treffen können [6]. Die Grösse des betroffenen Bereichs hängt hauptsächlich von der Fahrzeuggeschwindigkeit sowie von der Dicke des Wasserfilms auf der Fahrbahn ab

[25]. Spritzwasser entsteht praktisch nur dort, wo sich Pfützen auf der Strasse bilden, und ist daher seltener zu beobachten als Sprühnebel [27].

Sprühnebel hingegen entsteht, wenn Tropfen durch Zentrifugalkräfte tangential zum Reifen nach hinten geschleudert werden oder beim Aufprall auf Fahrzeugteile zerstäuben und seitlich der Kotflügel austreten. Diese chloridhaltigen Aerosole haben eine geringe Sinkgeschwindigkeit und können deshalb vom Wind über grosse Entfernungen transportiert werden [25]. Die Verbreitung des Sprühnebels wird vor allem von der Art des Verkehrs (Schwerlastverkehr erzeugt besonders viel Sprühnebel), der Verkehrsdichte, der Geschwindigkeit des Verkehrs sowie von den Wind- und Topographieverhältnissen beeinflusst [27].

2.4.2 Chloridprofile als Antwort des Betons auf die Chlorideinwirkung

Während seitens Winterdienst die ausgebrachten Mengen an Salz, etwa pro Strassenkilometer oder Strassenfläche (vgl. Kapitel 2.1), oft bekannt sind, ist die Ermittlung der Chloridbelastung der entsprechenden Betonoberfläche aus der Streusalzmenge herausfordernd: Einerseits ist die Menge des gestreuten Salzes nicht notwendigerweise konstant, weder über den Ort noch über die Zeit, andererseits hängt der Transport von der Strassenoberfläche als Spritzwasser oder Sprühnebel von zusätzlichen Faktoren ab. Schlussendlich bietet sich nur die direkte Messung der Chloridkonzentration im Beton in unterschiedlichen Tiefenstufen an [27]. Solche Messungen der Chloridkonzentration im Beton in verschiedenen Tiefenstufen, ergeben sogenannte Chloridprofile.

Im Beton liegen die Chloride chemisch oder physikalisch gebunden, sowie frei im Beton vor [7]. Die chemische Bindung erfolgt vor allem durch die Bildung von Friedel'schen Salzen [7]. Die physikalische Bindung entsteht durch Adsorption, die auf van-der-Waals-Kräften beruht.

Die in der Praxis üblicherweise angewendeten Methoden zur Messung des Chloridgehalts im Beton, etwa durch Auflösung von Betonmehl in Säure und anschliessender Titration, erfassen sowohl die freien, wie die gebundenen (chemisch und physikalisch) Chloride. Man spricht dabei vom totalen Chloridgehalt im Beton.

Chloridprofile weisen oft eine mit zunehmender Tiefe abnehmende Chloridkonzentration auf. In den oberflächennahen Bereichen kann es jedoch zu Abweichungen kommen, aufgrund von komplexen Interaktionen des Betons mit der Umwelt, was die Interpretation der Chloridprofile erschweren kann. Darauf wird in Kapitel 2.5 näher eingegangen.

Es ist naheliegend, anzunehmen, dass die Nähe eines Bauteils zur Chloridquelle mit der im Beton eingetragenen Chloridkonzentration im Zusammenhang steht. Dies wurde in Untersuchungen von Gehlen [28] bestätigt, welche die Chloridkonzentration in Abhängigkeit von Bauteilhöhe und -tiefe darstellten. Die Erkenntnisse basieren aber grösstenteils auf qualitativen Zusammenhängen und konnten nicht präzise quantifiziert werden, sind aber durch praktische Beobachtungen untermauert. Schlussendlich konnte aber aufgrund unzureichender Datenquellen keine allgemeingültige Aussage erstellt werden [28]. Ähnliche Beobachtungen liegen auch aus Untersuchungen an Tunnelverkleidungselementen im Gotthard-Strassentunnel vor. Dort zeigte sich, dass

die Chloridkonzentration in den unteren Bereichen der Wandelemente aufgrund von Spritzwasserbelastung signifikant höher war als in den oberen Bereichen. Eine statistisch belastbare Auswertung war zwar nicht möglich, jedoch konnte ein klarer (bauwerksspezifischer) Trend festgestellt werden, der die Relevanz der Bauteilhöhe für die Chloridbeaufschlagung aufzeigt.

2.4.3 Langzeitauslagerungen von Betonprüfkörpern in Schweden

In einer schwedischen Langzeitstudie wurden 33 unterschiedliche Rezepturen mit Variationen im W/Z-Wert und der Verwendung von unterschiedlichen Zusatzmitteln (Verflüssiger und Luftporenbildner) untersucht [29]. Die einzelnen Prüfkörper wurden entlang einer Strasse für 20 Jahre ausgelagert. Die Prüfkörper hatten einen Abstand zu einer Autobahn in Schweden von ungefähr 2.7 m und wurden im Herbst 1996 ausgelagert. Die Prüfkörper wurden so hinter dem Fahrzeugrückhaltesystem platziert, dass eine Exposition nicht behindert wurde. Die Proben wurden während mehrerer Winter niedrigen Temperaturen, feuchten Bedingungen und Tausalzen ausgesetzt, als Expositions-kategorie gemäss EN 206-1 als XD3. Nach einer Expositionsdauer von etwa 1, 5, 10 und 20 Wintern wurden die Betonblöcke ins Labor gebracht, um Proben für die Chloridgehaltsbestimmung zu entnehmen.

Die jährlichen Niederschlagsdaten zwischen 1996 und 2002 wurden von der Klimastation etwa 10 km vom Expositionsstandort entfernt erhoben. Die Messstation wurde vom Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Institut (SMHI) betrieben. Der mittlere Jahresniederschlag betrug rund 1170 mm. [30].

Aus den Resultaten wird offensichtlich, dass eine Verringerung des W/Z resp. W/B-Wertes sich günstig auf die Chloridbeständigkeit des Betons auswirkt. Zur Einordnung des W/Z-Wertes ist gemäss dem Powers Modell für die vollständige Zementhydratation ein W/Z-Wert von mindestens 0.36 erforderlich [31]. Ein signifikanter Effekt der Zumischung des Luftporenbildners wurde nicht festgestellt [30].

Im Quervergleich zu Bauwerken in maritimer Umgebung wiesen die in Schweden exponierten Betonprüfkörper auf sämtlichen Tiefenstufen eine geringere Menge an Chloriden im Beton auf [32].

In den entsprechenden Berichten wurden die Daten auch hinsichtlich C_s ausgewertet. Folgendes kann festgehalten werden:

- C_s streut im Bereich von 0.4 – 2.0 M-% Cl/Zement.
- Zwischen 10 und 20 Jahren Exposition ändert sich C_s kaum
- C_s wird beeinflusst durch die Zementart und den w/b-Wert. Es lässt sich ein (wenn auch recht moderater) Zusammenhang zwischen C_s und dem Chloriddiffusionskoeffizienten des Betons finden.

2.4.4 Langzeitauslagerungen von Betonprüfkörpern in der Schweiz

In der Schweiz gab es zwei Langzeitexperimente mit ausgelagerten Stahlbetonelementen an Nationalstrassen. Die eine Auslagerung fand in Bonaduz (Kanton Graubünden) über einen Zeitraum von 22 Jahren [33] und die andere am Naxberg über eine Dauer von 18 Jahren statt [34], [35], [36]. Die Daten des Naxberg-Experiments werden hier nicht weiter betrachtet, da es sich um relativ dünne Betonplatten handelte, die zudem

hinterlüftet waren, was den Chloridtransport beeinflusst haben dürfte, und was die direkte Übertragbarkeit der Messdaten auf Bauwerksbedingungen einschränkt.

Beim Versuch in Bonaduz (660 m ü. M.) wurden im September 1995 drei L-förmige Stahlbetonelemente unter sorgfältig kontrollierten Bedingungen betoniert. Anschließend wurden die Elemente am Expositionsstandort parallel zur Strasse direkt hinter dem Fahrzeugrückhaltesystem platziert. Die Elemente sind somit direkt dem chloridhaltigen Spritzwasser einer Strasse in alpiner Umgebung ausgesetzt. Über die Zeit wurde an den Elementen der totale Chloridgehalt im Beton bestimmt. Nach 18 Jahren lag Cs ungefähr im Bereich von 1.0 – 1.7 M-% Cl/Zement.

Eine weitere Erkenntnis war, dass im Langzeitexperiment in Bonaduz kein signifikanter Einfluss der Höhenlage über der Strasse im Bereich von ca. 20–100 cm auf die Geschwindigkeit des Chlorideindringens festgestellt wurde [34].

2.4.5 Chloridprofile entlang einer deutschen Autobahn

Entlang der deutschen Autobahn A1 wurden systematische Chloridprofile an Ingenieurbauwerken aufgenommen. Sämtliche Daten stammen aus Profilen mit Bohrmehlentnahme in drei Tiefenstufen (0–20 mm, 20–40 mm, 40–60 mm). Der Expositionszeitraum betrug im Mittel rund 32 Jahre und der horizontale Abstand von der Strasse betrug im Mittel 162 cm. Da von den Autoren der Studie angenommen wird, dass das Maximum des Chloridprofils innerhalb der ersten Tiefenstufe befindet, wurden die Werte mit Vorsicht interpretiert. Der variierende Parameter war die vertikale Distanz zur Fahrbahnoberkante (Höhenlage), welche 20, 50 und 100 cm betragen hat. [24]

Die Messwerte der 9 unterschiedlichen vertikalen Abstände und Tiefenstufen wurden stochastisch analysiert. Es zeigte sich, dass die Chloridkonzentrationen bei fixiertem vertikalem Abstand auf unterschiedlichen Tiefenstufen durch Lognormalverteilungen beschrieben werden können. Die Variationskoeffizienten variierten zwischen 0.4 und 0.85 und der Erwartungswert des Chloridgehalts der Log-Normalverteilung zwischen 0.10 und 0.78 M-%/Z [24].

Die Gegenüberstellung der prognostizierten mit den aus Bauwerksdaten abgeleiteten Streubändern zeigt, dass sowohl das 50 %-Quantil (Median) als auch das 95 %-Quantil der Prognose in [24] systematisch über den entsprechenden Quantilen der empirisch erhobenen Stichprobe liegen. Dies deutet darauf hin, dass das Prognosemodell die Chloridkonzentrationen im Beton tendenziell überschätzt, sowie zusätzlich noch eine höhere Streubreite aufweist. Als Grund für diese beiden Beobachtungen wird die Entnahme entlang einer Autobahne mit ähnlichen bis nahezu identischen Beaufschlagungsintensität und die nahezu identischen Abstände zur Fahrbahn aufgezählt. Abschliessend wurde noch erwähnt, dass die Prognosen mit Daten aus München sich deutlich von den Werten dieser Untersuchungsreihe aus Süddeutschland unterscheiden und deutlich geringer sind [24]. Diese Beobachtungen unterstreichen die Bedeutung standort- und bauwerksspezifischer Einflüsse auf die resultierende Chlorideinwirkung.

2.4.6 Weitere Literaturhinweise zur Oberflächenchloridkonzentration

Gemäss fib-Bulletin 76 [2] sind für die Expositionsklasse XD3 Oberflächenchloridkonzentrationen zwischen 2.0 und 4.0 M-% (Chlorid bezogen auf Zementgewicht) anzusetzen. In der Dissertation von Rahimi [37] wurde für die Oberflächenchloridkonzentration unter XD3-Exposition der Wert von 5.0 M-% Cl/Zement angenommen. Schiessl-Pecka et al. setzten in [38] C_s bei XD3-Exposition – gestützt auf nicht näher erläuterte empirische Daten von Bauwerken – relativ hoch an, namentlich im Bereich von 4–5 M-% Cl/Zement für Tunnelwände und im Bereich von 3.0–3.5 M-% Cl/Zement für Brückenkappen und Brückenpfeiler.

Angst wertete in [39] 91 Chloridprofile hinsichtlich C_s aus. Dabei zeigte sich ebenfalls die hohe Streuung. So lagen C_s im Bereich von rund 0.5–1.5 M-% Cl/Zement (Konsolköpfe), 0.2–1.5 M-% Cl/Zement (Brückenmittelpfeiler), 0.5–4.0 M-% Cl/Zement (Tunnelwände, Parkhauswände).

2.4.7 Literaturformeln zur Abschätzung der Oberflächenchloridkonzentration

Lay [27] hat eine lagenabhängige Formel zur Abschätzung der mittleren Oberflächenchloridkonzentration vorgeschlagen (Gl. (2)). Die dazu verwendeten Chloridprofile hatten mindestens 4 Stützstellen und stammen vorwiegend aus Proben, entnommen von vertikalen Flächen wie Pfeilern, Stütz- oder Tunnelwänden, sowie Brückenuntersichten. Falls die Betonzusammensetzung nicht eindeutig klar war, wurde ein CEM I mit $W/Z=0.5$ für die Berechnungen angenommen. Als Datengrundlage standen rund 435 gefittete Chloridprofile zur Verfügung. Rund 70% der Datengrundlage stammt von Bauwerken entlang von Autobahnen resp. Bundesstrassen und die restlichen Daten von Bauwerken aus dem Stadtgebiet von München [27].

$$\mu_{Cs}(a, h) = (\mu_{Csmax} - \mu_{Ci}) \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{a^2 + h^2}}{\mu_{rmax}}\right) + \mu_{Ci} \quad (2)$$

In Gl. (2) beschreibt μ_{Csmax} die mittlere Oberflächenkonzentration in unmittelbarer Strassennähe in Massenprozent bezüglich Zements, μ_{Ci} den mittleren Grundchloridgehalt in Massenprozent bezüglich Zements, a den mittleren Abstand zur Strasse in der Einheit Meter, h die Höhe zur Fahrbahnoberkante in der Einheit Meter und μ_{rmax} die radiale Entfernung ab dem die Oberflächenchloridkonzentration gleich dem Grundchloridgehalt μ_{Ci} entspricht. Die Parameter von Gl. (2) wurden in [27] über eine Regressionsanalyse bestimmt. Die Werte der Parameter waren wie folgt: $\mu_{Csmax} = 1.15 \text{ M.-%/Z}$, $\mu_{Ci} = 0.055 \text{ M.-%/Z}$ und $\mu_{rmax} = 6.8 \text{ m}$ [27].

Für die Modellierung der Oberflächenchloridkonzentration als Zufallsvariable muss zusätzlich zur mittleren Konzentration auch die Streuung berücksichtigt werden. Diese Streuung wird durch eine Log-Normalverteilung mit einem Mittelwert von $\mu = 1$ und $\sigma = 0.56$ modelliert beschrieben. Die Wahl der Log-Normalverteilung ermöglicht es, die statistische Verteilung der Chloridkonzentrationen realistisch abzubilden, da sie nur positive Werte zulässt.

Neben den Inhomogenitäten im Beton werden folgende, im Modell unberücksichtigte Einflüsse als Hauptursachen für Abweichungen angeführt: die Betonzusammensetzung, lokale Unterschiede in der Taumittelapplikation, die Beschaffenheit der Strassenoberfläche sowie lokale Lee-Luv-Effekte. Zusätzlich wird in [27] angemerkt, dass

eine systematische Unterschätzung des Oberflächenchloridgehaltes vermutlich weitgehend durch die überproportionale Zementstein- und damit Chloridanreicherung in Oberflächennähe kompensiert wird.

Für die Abschätzung der Ersatzoberflächenkonzentration $C_{s,\Delta x}$ finden sich in der Literatur ebenfalls alternative Ansätze, welche aus der Auswertung von hauptsächlich chloridexponierten Proben von Infrastrukturbauwerken stammen. Gemäss Kapteina [24] wurden entsprechende Auswertungen mit Daten von Bauwerken, welche im Allgemeinen mit CEM I erstellt wurden und W/Z-Werte zwischen 0.45 und 0.6 aufwiesen, durchgeführt. Basierend auf solchen Auswertungen wurde im Anhang von [24] mit Verweis auf Arbeiten von Schiessl und Lay die Gleichung (3) präsentiert:

$$C_{s,mean}(a, h) = [0.465 - 0.051 \cdot \ln(a + 1) - (0.00065 \cdot (a + 1)^{-0.187} \cdot h)] \cdot \left(\frac{M_{Beton}}{M_{Zement}} \right) \quad (3)$$

Die drei Parameter zur Beschreibung von Gleichung (3) sind, der vertikale Abstand h von der Fahrbahnoberkante in Zentimetern, a der horizontale Abstand zum Fahrbahnrand und das Massenverhältnis zwischen Zement und Beton. Für eine Visualisierung (siehe Abbildung 1) des mittleren Oberflächenchloridgehalts $C_{s,\Delta x}$ wurden folgende Annahmen für die Modellparameter getroffen: Das Massenverhältnis Beton zu Zement wurde mit einem typischen Wert von 7 angesetzt. Der horizontale Abstand zum Fahrbahnrand wurde im Bereich von 0 bis 500 cm und die Höhe über Fahrbahnoberkante von 0 bis 300 cm variiert.

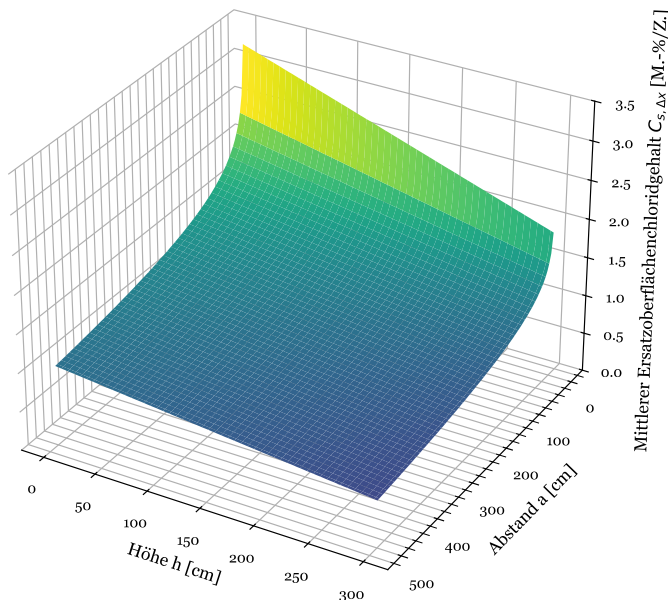


Abbildung 1: Dreidimensionale Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Ersatzoberflächenkonzentration $C_{s,\Delta x}$ in Abhängigkeit der horizontalen und vertikalen Entfernung zur Strasse von Infrastrukturbauwerken. (Modell von Schiessl und Lay)

Die maximalen Werte erreichen bis zu 3.5 Massenprozent bezogen auf den Zement, nehmen jedoch sowohl in grossen horizontalen als auch vertikalen Abständen sehr schnell wieder ab auf Werte von weniger als 1 M.-%/Z.

Bei diesem Ansatz liegt die Ersatzoberflächenkonzentration vor und nicht die Oberflächenchloridkonzentration C_s . Für die Umrechnung schlägt Kapteina [24] vor, unter Berücksichtigung einer Regressionsrechnung einen Korrekturfaktor einzuführen, um eine Näherung für C_s zu erhalten. Für den Spritzwasserbereich schlägt sie einen Korrekturfaktor von 1.27 vor [24].

Für die Modellierung der Oberflächenchloridkonzentration als Log-Normalverteilung in [24] wurde Gl. (3) mit dem Korrekturfaktor verwendet (vgl. auch Kapitel 2.4.5).

Für die Oberflächenchloridkonzentration C_s bei einem mittleren horizontalem Abstand von 162 cm und horizontalen Abständen von 20, 50 und 100 cm ergaben sich die folgenden Werte für den Mittelwert und die Standardabweichung für die zugrundeliegenden Log-Normalverteilungen: $\mu = 1.78, \sigma = 1.30$, $\mu = 1.71, \sigma = 1.28$ und $\mu = 1.60, \sigma = 1.20$. Die modifizierte Abschätzung aufgrund der Datenlage aus [24] bei einem vertikalen Abstand zur Betonoberfläche von 20 cm ergab geringere Werte für den Mittelwert als auch für die Standardabweichung von $\mu = 1.00, \sigma = 0.75$.

2.5 Lebensdauermodellierung und Oberflächenkonzentration C_s

Die am meisten verbreiteten Modelle für die Simulation des Chloridtransports in Beton hinein basieren auf einem modifizierten Diffusionsgesetz in ungerissenem Beton [3], [4], [40] (siehe Abbildung 2). Entsprechende Lebensdauermodelle, d.h. Modelle zur Prognose der Korrosion von Stahl im Beton, nutzen diesen Ansatz, um die Chloridkonzentration abzuschätzen. Dabei wird die Chloridkonzentration auf Tiefe der Bewehrung im Beton über die Zeit prognostiziert und dem kritischen Chloridgehalt [17], [41] für die Korrosionsinitiierung gegenübergestellt. Entspricht der prognostizierte Chloridgehalt mindestens dem kritischen Chloridgehalt, geht das Modell davon aus, dass Lochfrasskorrosion stattfinden kann (vgl. auch Kapitel 2.2). Angenommen, der kritische, korrosionsinitiierende Chloridgehalt gemäss SIA 269/2 [42] beträgt 1.0 M-% bezüglich Zement, so wäre der Bewehrungsstahl mit einer nominellen Überdeckung von 30 mm entsprechend dem Chloridprofil in Abbildung 2 bereits von Lochkorrosion betroffen.

Je nach Art der Exposition (Streusalze (XD), Meeresnähe oder direkte Meerwasserexposition (XS)) konnten mit spezifizierten Modellen bessere Prognoseergebnisse erzielt werden [30], [34], [43]. Da dieser Aspekt im vorliegenden Projekt nicht im Fokus steht, wird der Sachstand im vorliegenden Bericht nicht näher erläutert.

Viele existierende Modelle basieren auf dem erwähnten Diffusionsgesetz. Die Limitation solcher Modelle ist, dass die Expositionszeit im Modell dem Beton- resp. Bauwerksalter gleichgesetzt wird. Streng genommen wird somit auch ein stets ins Betoninnere gerichteter Transport angenommen. Diese Vereinfachung ist weder in Oberflächennähe noch in der Nähe der maximalen Eindringtiefe der Chloride zu jedem Zeitpunkt der Fall [27]. Einige Publikationen weisen darauf hin, dass die Vereinfachungen für das Modell zu stark sind.

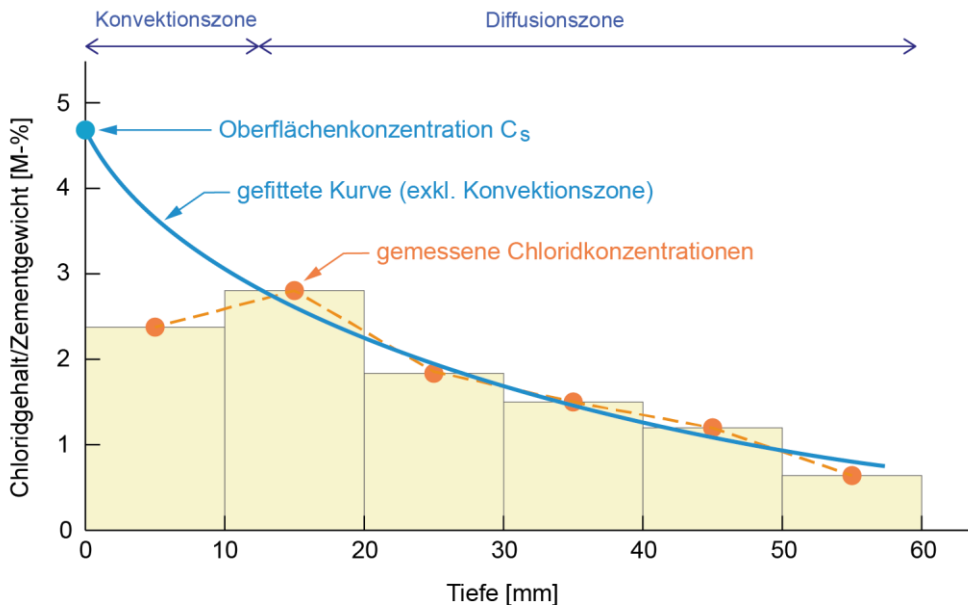


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines gemessenen Chloridprofils (gelb, orange) und der gefitteten Kurve (blau), aus welcher unter anderem die Oberflächenkonzentration C_s abgeleitet werden kann. In Anlehnung an [2], [40].

Eine wichtige, aber bisher ungenügend in den gängigen Chloridtransportmodellen berücksichtigte Randbedingung, ist die auf das Bauwerk einwirkende Chloridkonzentration. Die Treibkraft der Diffusion ist ein Konzentrationsgradient, wobei Chloride ebenfalls über Konvektion oder Migration in den Beton eindringen können [44]. Der angesprochene Konzentrationsgradient ergibt sich in den Modellen konzeptionell dadurch, dass eine angenommen zeitlich konstante Oberflächenchloridkonzentration (C_s) angesetzt wird; die anfängliche Chloridkonzentration C_0 im Betoninnern kann jeden beliebigen Wert haben, wird aber oft zu Null oder einem tiefen Wert angenommen. Die Chloridkonzentration im Beton $C(x, t)$ in einer Tiefe x und zur Zeit t wird dabei oft einer der folgenden Gleichung ähnlichen Funktion ausgedrückt [3], [4], [40]:

$$C(x, t) = C_0 + (C_s - C_0) \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{\text{app}}(t) \cdot t}} \right) \quad (4)$$

Dabei sind D_{app} der scheinbare Chloriddiffusionskoeffizient im Beton, welcher eine Zeitabhängigkeit gemäss Gleichung (5) aufweist, und erfc , die komplementäre Gauss'sche Fehlerfunktion in der Gleichung (4). Obwohl die Oberflächenkonzentration bei der Chloridbelastung durch Tausalzexposition theoretisch stark saisonabhängig ist, wird diese vereinfachend als konstant über die Zeit angenommen.

$$D_{\text{app}}(t) = D_0 \cdot \left(\frac{t_0}{t_c} \right)^\alpha \quad (5)$$

Die Zeitabhängigkeit des scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten D_{app} wird modelliert durch den Alterungskoeffizienten α , infolgedessen der Diffusionskoeffizient zeitlich abnimmt. Der scheinbare Diffusionskoeffizient D_0 wird bei einer Temperatur von

20 Grad bei einem Betonalter von 28 Tagen (t_0) bestimmt. Für reinen Portlandzement kann der Alterungskoeffizient zu 0.3 abgeschätzt werden [28].

Die Oberflächenchloridkonzentration C_s in Gleichung (4) wird als die Konzentration der Chloride im Beton in der äussersten Betonschicht betrachtet. Es sei erwähnt, dass dies eine fiktive Grösse ist, da in der Realität die Konzentration der Chloride in der äussersten Betonschicht zeitlichen Schwankungen unterliegt. Insbesondere in den ersten Jahren eines Bauwerks nimmt diese kontinuierlich zu und stabilisiert sich dann auf einem gewissen Niveau. In der Literatur wird gemeinhin angenommen, dass diese Zeitdauer bis zum Erreichen eines später im Mittel konstanten Niveaus relativ kurz ist (im Bereich von einem Jahrzehnt oder sogar weniger) [45], [46]. Saisonal kann die Konzentration der Chloride in der äussersten Betonschicht in der Realität schwanken, z. B. im Sommer sinken (Auswascheffekte) und im Winter ansteigen (Beaufschlagen mit Tausalzen).

Die fiktive Oberflächenchloridkonzentration C_s wird üblicherweise anhand von gemessenen Chloridprofilen wie in Abbildung 2 bestimmt [2]. Dabei wird angenommen, dass das Chloridprofil aus zwei Bereichen besteht: der Konvektionszone und der Diffusionszone. Die äussere Konvektionszone unterliegt zeitlichen Schwankungen und weicht vom Diffusionsgesetz ab, während es im Innern in der Diffusionszone den Chloridtransport dominiert [38].

Experimentell gemessene Chloridprofile (gelb, orange in Abbildung 2) können mit einer mathematischen Funktion vergleichbar mit Gleichung (4) gefittet werden, wobei üblicherweise nur der Teil des Chloridprofils in der Diffusionszone berücksichtigt wird. Aus solch einer Analyse kann dann die Oberflächenchloridkonzentration und Werte für den scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizient abgeleitet werden.

Mit der Oberflächenchloridkonzentration C_s und dem scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten D_{app} kann unter Verwendung von Gleichung (4) der Chloridgehalt zu unterschiedlichen Zeitpunkten oder Tiefen prognostiziert werden.

2.6 Schlussfolgerungen aus dem Sachstand und Lösungsansatz

Die Ausführungen im vorangehenden Kapitel zeigen, dass für die mathematische Beschreibung von Chloridprofilen in Beton etablierte Ansätze vorliegen. Diese beruhen mehrheitlich auf modifizierten Diffusionsmodellen und erlauben eine Erfassung des Chlorideintritts über die Zeit. Über die vergangenen Jahrzehnte wurden grosse Fortschritte in der Quantifizierung und Bestimmung des "Chloridwiderstands" des Betons (Diffusionseigenschaften, Altersexponent) erzielt. Diese umfasst umfangreiche, veröffentlichte Datensätze, sowie normierte Testmethoden, mit denen sich dieser Modellinput quantitativ bestimmen lässt.

Was hingegen die Chloridbelastung anbelangt, weist der Sachstand grosse Lücken und Unsicherheiten auf. So finden sich verhältnismässig wenig Daten in der Literatur betreffend die auf das Bauwerk einwirkende Chloridbelastung, bzw. die üblichen

Modellannahmen für die Oberflächenchloridkonzentration C_s sind eher “anekdotischer” Natur als in nachvollziehbarer Weise faktenbasiert. Es lässt sich weiter festhalten, dass C_s für XD3-Exposition erheblich variiert. Es besteht Einigkeit, dass dies einerseits von den Umgebungsbedingungen beeinflusst wird (Menge an Tausalzen, die pro Saison ausgebracht werden), andererseits möglicherweise auch von der Bauwerksart und Geometrie (Tunnelwand vs. Brückenmittelpfeiler, etc.), sowie betontechnologischen Eigenschaften (Zementart, etc.) abhängig ist. Breit abgestützte Daten finden sich in der Literatur kaum. Die damit verbundenen, erheblichen Unsicherheiten betreffend C_s sind in der grossen Streuung reflektiert, die in aktuellen internationalen Dokumenten abgebildet ist (fib bulletin 76 [2] mit einem Variationskoeffizient für C_s bei XD3-Exposition von 75%!). Die daraus resultierende Unsicherheit bei der Prognose zukünftiger Chloridbelastungen des Überdeckungsbeton reduziert die Aussagekraft klassischer Modelle erheblich für eine belastbare Instandhaltungs- oder Lebensdauerplanung.

Dem soll in diesem Projekt entgegengewirkt werden. Im Zentrum steht dabei erstens die Erstellung einer umfassenden und systematisch erhobenen Datenbank mit aus der gesamten Schweiz zusammengetragenen Chloridprofilen von Bauwerken der Strasseninfrastruktur. Dabei soll die Lücke im Sachstand, namentlich der Mangel an veröffentlichten, nachvollziehbar und systematisch erhobenen Daten geschlossen werden. Im Weiteren sollen die Daten ausgewertet werden, um den bislang nur unzureichend mit Messwerten untermauerten Kenntnisstand zu verbessern, und idealerweise Empfehlungen für die Bestimmung der Chlorideinwirkung auf Stahlbetonbauwerke in der Schweiz abzuleiten. Darüber hinaus soll untersucht werden, inwiefern sich durch dieses Vorgehen die Unsicherheiten in der Vorhersage der chlorid-induzierten Korrosion im Stahlbeton reduzieren lassen.

3 Methodik

Das Vorgehen gliedert sich in drei wesentliche Schritte:

1. Im ersten Teil erfolgt die Konzeptionierung und Erstellung der Datenbank, einschliesslich der Festlegung der Methodik zur effizienten und zielgerichteten Sammlung der Chloriddaten unter Berücksichtigung möglicher Einflussfaktoren. Ziel des ersten Schritts ist die Zusammenführung der vorhandenen Daten der am Projekt beteiligten Baustoffprüflabors sowie gegebenenfalls weiterer relevanter Quellen. Das Ergebnis ist eine umfassende Datenbank, welche Chloridprofile von Bauwerken der Strasseninfrastruktur mit den zugehörigen Informationen zu Bauwerksart, Expositionsbedingungen, Geometrie, Materialeigenschaften und weiteren Einflussfaktoren vereint. Diese Parameter werden im Rahmen der Konzeptionierung der Datenbank vom Projektteam festgelegt, wobei einerseits einfließt, inwiefern gewisse Informationen überhaupt verfügbar sind bzw. wie gross der Aufwand zur Beschaffung ist, und andererseits berücksichtigt wird, inwiefern diese Parameter einen Einfluss für die Chloridbelastung darstellen (z. B. Abstand von der Chloridquelle, d. h. der Strasse). Letzteres basiert sowohl auf der Praxiserfahrung und dem Sachverstand des Projektteams, andererseits auf Hinweisen aus Literaturdaten.
2. In einem zweiten Schritt werden diese mutmasslichen Einflussgrössen anhand des gesammelten Datensatzes überprüft. Dies umfasst Parameter wie beispielsweise die Distanz zur Chloridquelle, gewählte Expositionsklasse oder auch Bauwerkstyp oder Bauteil. Ziel ist es, zu evaluieren, inwiefern sich durch vertiefte statistische Methoden und maschinelles Lernen Einflussgrössen identifizieren lassen, welche die Chloridbelastung von Bauwerken primär beeinflussen.
3. Im dritten Schritt werden Empfehlungen für die Ingenieurpraxis abgeleitet, namentlich inwiefern sich die aktuelle Unsicherheit betreffend die Chloridbelastung von Bauwerken der Schweizer Strasseninfrastruktur reduzieren lassen, und inwiefern damit auch Modellinputparameter besser quantifiziert werden können. Dies geschieht unter Berücksichtigung und Verfügbarkeit der involvierten Parameter in der Ingenieurpraxis.

Nachfolgend werden die drei Schritte im Kapitel 3.1, 3.2 und 3.3 sukzessive detailliert erläutert.

3.1 Erstellung der Datenbank

Dieses Kapitel beschreibt den iterativen Prozess der Datenbankerstellung. Dieser Prozess umfasst die Auswahl und Klassifizierung der Parameter, Angaben zur codierten Aufnahme von bestimmten ergänzenden Parametern in der Datenbank, sowie Hilfestellung zur strukturierten Erfassung des jeweiligen Parameters mittels geeigneten Eingabefeldern zur Limitierung der Auswahlmöglichkeiten. Die ausgefüllte Datenbank bildet die Grundlage für die nachfolgenden Analysen und die Entwicklung geeigneter Modelle.

3.1.1 Konzept der Datenbank

Der Chlorideintrag in den Überdeckungsбетон streut erwiesenermassen erheblich von Bauwerk zu Bauwerk. Die Oberflächenchloridkonzentration C_s hängt vor allem von den Umwelteinflüssen, aber auch von den betontechnologischen Parametern ab [47].

Zur systematischen Bestimmung der massgebenden Parameter wurde im Rahmen dieses Forschungsprojekts eine Datenbank erstellt, welche zahlreiche Bohrkerne oder Bohrmehlproben aus verschiedenen Bauwerken in der Schweiz enthält. Jeder Eintrag in der Datenbank umfasst jeweils ein vollständiges Chloridprofil, inklusive zugehöriger Informationen, wie nachstehend beschrieben. Mehrere Einträge pro Bauwerk sind möglich.

Die zur Untersuchung relevanten Parameter wurden im Voraus definiert und im Verlauf des Projektes gezielt verfeinert. Diese Verfeinerung fand durch Diskussionen innerhalb des Projektteams statt, wobei die Erfahrung und das Wissen der «Datenlieferanten», namentlich den Baustoffprüflaboren, sowie das der Hochschule gleichermaßen einflossen.

Das methodische Vorgehen zur Einteilung der Parameter erfolgte in zwei Schritten: Zunächst wurde ihre Bedeutung für die spätere Datenauswertung (Klassen I–III) bestimmt. Anschliessend erfolgte eine Abschätzung des mutmasslichen erforderlichen Beschaffungsaufwandes (gering, mittel, hoch) aus der Sicht der Baustoffprüflabore. Durch diese zweistufige Bewertung wurde sichergestellt, dass einerseits besonders relevante Parameter mit hoher Priorität erfasst werden und andererseits der Aufwand gezielt gesteuert werden kann. Damit wird ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Datenqualität und Wirtschaftlichkeit bei der Datenerhebung angestrebt.

Für die Datenauswertung wurden die relevanten Parameter nach ihrer Wichtigkeit in drei Klassen eingeteilt, gestützt auf die Praxiserfahrung bzw. Intuition des Projektteams, sowie Hinweise aus der Literatur:

- Klasse I (zwingend notwendig): Hoher Aufwand zur Informationsbeschaffung gerechtfertigt; ohne diese Parameter ist kein Datenbankeintrag möglich
- Klasse II (mutmasslich wichtig): Erhöhter Aufwand zur Informationsbeschaffung gerechtfertigt
- Klasse III (ergänzende Informationen): Parameter von untergeordneter Wichtigkeit, potenziell jedoch nützlich. Erfassung der Informationen nur bei kleinem Beschaffungsaufwand (strikttere Aufwandsgrenze als bei Klasse II).

Der Aufwand für die Informationsbeschaffung hängt von der Dokumentenart, der Strukturierung der Daten, sowie deren Aufbewahrungsort (Labor, Bauherr, etc.) ab. Die Daten können je nach Quelle den Bauakten, Laborberichten oder Berichten aus Zustandserfassungen entnommen werden. Um den Aufwand zu bewerten, wird eine einfache Einteilung in die Kategorien gering, mittel und hoch vorgenommen.

Die in Abbildung 3 dargestellte Gegenüberstellung der Bedeutung für die spätere Datenanalyse und dem mutmasslichen Beschaffungsaufwand verdeutlicht, dass viele als wichtig erachtete Parameter mit geringem Aufwand beschafft werden können. Dies gilt insbesondere für Parameter im Zusammenhang mit dem Bauwerk und der Exposition

gegenüber der Chloridbeaufschlagung. Für Parameter im Zusammenhang mit den Betoneigenschaften, die auch als wichtig eingestuft werden (Klasse II), kann der Aufwand je nachdem erhöht ausfallen.

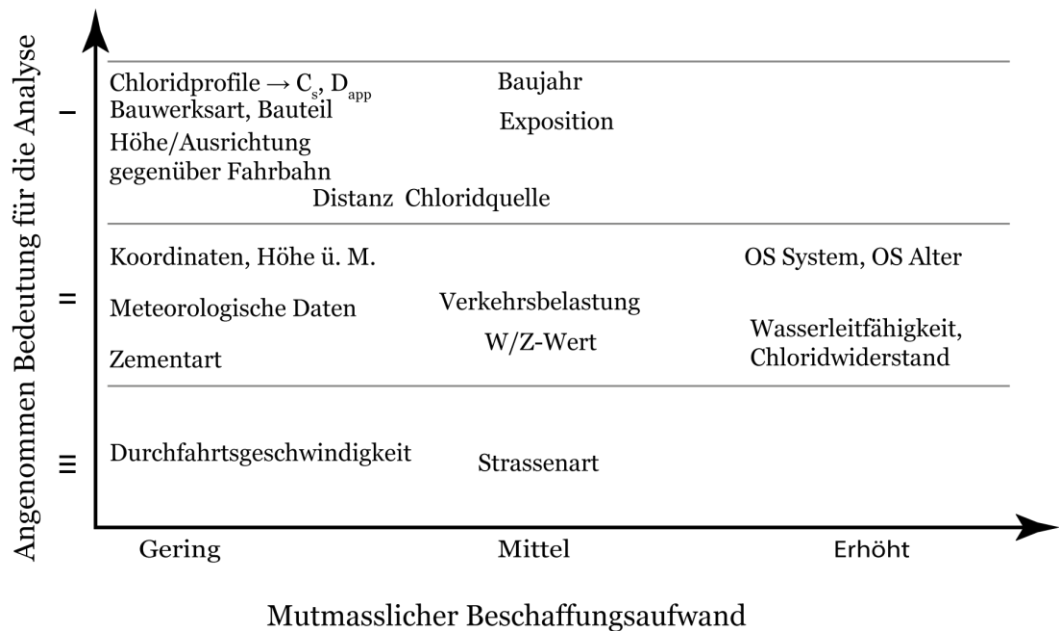


Abbildung 3: Gegenüberstellung die angenommene Bedeutung für die spätere Datenanalyse und mutmasslicher Beschaffungsaufwand für unterschiedlichen Parameter der Datenbank.

Die Datenbank soll primär Chloridprofile von Kunstbauten exponiert durch die Nationalstrasse enthalten. Zur Erweiterung der Datenbank können exponierte Bauwerke anderer Strassenklassen in Betracht gezogen werden, sofern die einzelnen Parameter mit vertretbarem Aufwand beschafft werden können.

Um eine hohe Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten und die Analyse auf relevante Chloridprofile zu fokussieren, werden bestimmte Messdaten von der Aufnahme in die Datenbank ausgeschlossen. Dies betrifft insbesondere Chloridprofile, die aus gerissenen Betonbereichen stammen. Der Grund hierfür liegt darin, dass der Chloridtransport in gerissenem Beton von dem in ungerissenem Beton abweicht [8], [9], [10], [11] und solche Daten daher für die vorliegende Untersuchung ungeeignet sind. Auch bei mit Oberflächenschutzsystemen oder Abdichtungen versehenen Bauwerken ist Vorsicht geboten. Solche Schutzsysteme wurden teils bereits beim Bau, teils erst nachträglich installiert. Zwar können entsprechende Messungen Hinweise auf das aktuelle Chloridprofil geben, jedoch fehlen häufig verlässliche Informationen zur ursprünglichen Chloridkonzentration sowie deren zeitlicher Entwicklung nach Applikation des Schutzsystems. Die genaue zeitliche Historie, die eingesetzten Produkte, das Ausmass der Degradation über die Zeit und damit auch die tatsächliche Wirksamkeit sind in vielen (wenn nicht allen) Fällen unbekannt.

Bauwerke mit deutlich von Nationalstrassenbedingungen abweichender Exposition wie beispielsweise Parkhäuser werden in diesem Projekt nicht betrachtet. Des Weiteren werden Innenbereiche von Hohlkastenbrücken aufgrund ihrer komplexen Umgebungsbedingungen - wie beispielsweise der Funktionstüchtigkeit der Brücken-

Entwässerung, welche sich in der Praxis als äusserst einflussreicher Faktor auf die lokale Chloridbelastung des Betons erwiesen hat – nicht in die Datenbank aufgenommen.

Die Datenbank soll ausserdem so konzipiert sein, dass sie in Zukunft mit weiteren Einträgen ergänzt oder bei vorhandenen Einträgen vervollständig werden kann.

3.1.2 Überblick über die Parameter der Datenbank

In Kapitel 3.1.3 folgt für jeden einzelnen Parameter ein kurzer Beschrieb und eine Klassifizierung in der Datenbank. Für die Übersicht der Parameter, wurde eine Unterteilung in drei Klassen vorgenommen:

- | | |
|---|----------------|
| 1. Daten zum Chloridprofil | vgl. Tabelle 2 |
| 2. Angaben Bauwerk und Exposition | vgl. Tabelle 3 |
| 3. Eigenschaften des Überdeckungsbetons | vgl. Tabelle 4 |

Tabelle 2 enthält die relevanten Angaben zu den Chloridprofilen und die entsprechende Datenstruktur in der Datenbank. Dazu zählen insbesondere Probenbezeichnung, die gemessene Chloridkonzentration pro Tiefenstufe, das Probeentnahmedatum, Angabe des Messverfahrens, sowie optionale Bemerkungen zum jeweiligen Profil. Die verfügbaren Chloridprofile wurden nicht alle in einheitlichen Tiefenabstufungen gemessen; so sind manche im Intervall von 10 mm verfügbar, andere in 15 mm Tiefenintervallen. Diesem Umstand wurde in der Datenbank wie in Tabelle 2 gezeigt Rechnung getragen.

Datenbank Chloridprofil		
Parameter	Datenformat	Beschrieb
Chloridgehalt 00-10 mm	Float in [M% bez. Beton]	Chloridgehalt bezogen auf Betongewicht in definierten Tiefenstufen
Chloridgehalt 10-20 mm	Float in [M% bez. Beton]	
Chloridgehalt 20-30 mm	Float in [M% bez. Beton]	
Chloridgehalt 30-40 mm	Float in [M% bez. Beton]	
Chloridgehalt 40-50 mm	Float in [M% bez. Beton]	
Chloridgehalt 50-60 mm	Float in [M% bez. Beton]	
Chloridgehalt 60-70 mm	Float in [M% bez. Beton]	
Chloridgehalt 70-80 mm	Float in [M% bez. Beton]	
Chloridgehalt 00-15 mm	Float in [M% bez. Beton]	
Chloridgehalt 15-30 mm	Float in [M% bez. Beton]	
Chloridgehalt 30-45 mm	Float in [M% bez. Beton]	
Probeentnahme Datum	Datum	Relevante Information zur Bestimmung des Betonalters
Messverfahren	String	Information zum Messverfahren der Chloridgehaltsbestimmung
Art der Probenentnahme	String	Information zur Probenentnahme an Bauwerk (z. B. Bohrkern oder Bohrmehl)
Bemerkung	String	Möglichkeit für eine Bemerkung zum Chloridprofil; Optional

Tabelle 2: Parameter und Datenstruktur in der Datenbank zum Chloridprofil.

Im zweiten Block eines Eintrages befinden sich Parameter bezüglich der Bauwerksart und der Exposition (vgl. Tabelle 3). Diese Parameter umfassen eine Klassifizierung des Bauwerks in eine Bauwerksart und eine Beschreibung des Bauwerksteils des jeweiligen Bauwerks. Ergänzt werden diese Angaben durch das mittlere Baujahr des Bauwerks und dessen geografische Lage inklusive der zugehörigen Höhe über Meer.

Des Weiteren werden Parameter zur Exposition erfasst (Tabelle 3). Dies umfasst eine Beschreibung der Exposition, ein Parameter zur Erfassung, ob ein Bauwerk direkt bewittert wird, die Lage des Bohrkerns relativ zur Fahrbahn (horizontale und vertikale Distanz zur Chloridquelle, Orientierung und Neigung der Oberfläche zur Himmelsrichtung als auch zur Fahrbahn relative zur horizontalen resp. vertikalen), die Expositionsklassen nach SIA 262 für Karbonatisierung (XC) und Beanspruchung durch Chlorideinwirkung aus Taumitteln (XD). Ergänzt wird der Block durch ein optional auszufüllendes Bemerkungsfeld.

Datenbank Bauwerkart und Exposition

Parameter	Datenformat	Beschrieb
Bauwerksart	String	Klassifizierung der Bauwerksart (Tunnel, Brücke, etc.)
Bauwerksteil	String	Abhängig von der Bauwerksart weitere Unterteilung, z. B. bei Brücke «Mittelpfeiler, Leitmauer, Brückenplatte, etc.)
Bemerkung	String	Möglichkeit weitere relevante Information zu vermerken
Baujahr (Mittelwert)	Datum	Baujahr oder Datum der Fertigstellung
Höhe über Meer	m. ü. M als Integer	-
Koordinaten	Integer	Ungefähre Position in CH-Landeskoordinaten (LV 95 [48])
Bewittert	String	Angabe, ob der Bauwerksteil direkt der Witterung ausgesetzt ist.
Orientierung der Exposition	String	Angabe der Orientierung von Bauteilen zur Chloridquelle (abhängig vom Bauteil)
Distanz zur Chloridquelle (horizontal)	In cm als Integer	Horizontale Distanz zwischen dem Ende der gesalzenen Fahrspur und der Betonoberfläche in
Höhe über Oberkante Fahrbahn	In cm als Integer	Vertikale Höhe der Betonoberfläche gegenüber dem Niveau der gesalzenen Fahrspur
Strassenart	String	Klassifizierung der Strassenart (z. B. Nationalstrasse)
Durchfahrtsgeschwindigkeit	In km/h als Integer	Zulässige Maximalgeschwindigkeit
Verkehrsbelastung (z. B. DTV)	Integer	Anzahl Fahrzeuge pro Tag der nächstgelegenen Zählstelle derselben Strecke
Meteorologische Daten	In cm als Integer	Jahresdurchschnitt der täglichen Neuschneehöhen der zugeordneten Messstation (nach einzuführenden Kriterien)
Himmelsrichtung (Orientierung der Fläche)	String	Ausrichtung der Betonoberfläche gegenüber der Windrose

Winkel relativ zur Vertikalen	In Grad als Integer	Neigung der exponierten Betonoberfläche gegenüber der Vertikalen
Neigung des Bauwerksteils im Grundriss relativ zur Fahrspur	In Grad als Integer	Neigung des Bauwerksteils relativ zur Fahrspur im Grundriss
Exposition nach Norm (XC)	String	Planangabe der Exposition nach SIA 262
Exposition nach Norm (XD)	String	Planangabe der Exposition nach SIA 262
Längsneigung	In Grad als Integer	Längsneigung für Tunnels
Verkehrsregime	In Grad als Integer	Verkehrsregime für Tunnels
Distanz zum Portal	In Metern als Integer	Distanz zum Portal für Tunnels
Weitere Bemerkungen	String	Feld für weitere relevante Bemerkungen

Tabelle 3: Parameter in der Datenbank zur Bauwerkart und der Exposition.

Im letzten Block befinden sich Informationen zu den Betoneigenschaften sowie zu allfälligen Oberflächenschutzsystemen (OS) und Abdichtung (vgl. Tabelle 4). Dieser Block beinhaltet Daten, welche im Zusammenhang mit periodischen Inspektionen durch Baustoffprüflabore erfasst werden. Dazu gehören die Betoneigenschaften wie Betondruckfestigkeit, Haftzugfestigkeit, Zementart nach Norm (Planangaben), Angaben zur Karbonatisierungstiefe. Ebenfalls erfasst werden Art und Zustand des eingesetzten Oberflächenschutzsystems sowie ergänzende Bemerkungen, etwa zur Ausführung oder zum Applikationsdatum des Oberflächenschutz- bzw. Abdichtungssystems.

Eigenschaften des Überdeckungsbetons

Parameter	Datenformat
Oberflächenschutzsystem	String
Bemerkungen zum OS	String
Abdichtungssystem	String
Bemerkungen zum Abdichtungssystem	String
Betondruckfestigkeit	In N/mm ² als Float
Haftzugfestigkeit	In N/mm ² als Float
Zementart nach Norm (nach Plan)	String
Zementgehalt nach Plan	In kg/m ³ als Integer
w/z- Wert	Float
Weitere Betoneigenschaften	String
Betonüberdeckung nach Plan	In mm als Integer
Betonüberdeckung gemessen Mittelwert	In mm als Integer
Betonüberdeckung gemessen St.-abw.	In mm als Integer
Karbonatisierungstiefe Mittelwert	In mm als Integer
Karbonatisierungstiefe Minimal	In mm als Integer
Karbonatisierungstiefe Maximal	In mm als Integer

Tabelle 4: Parameter zur Erfassung der Eigenschaften des Überdeckungsbetons.

3.1.3 Erläuterung der einzelnen Parameter

3.1.3.1 Chloridkonzentrationen

Sämtliche Chloridkonzentrationen werden in dieser Arbeit standardmässig bezüglich des Betongewichts angegeben. Dies entspricht dem Messresultat der gängigen Messverfahren und ermöglicht eine direkte Vergleichbarkeit der Daten. Eine Umrechnung auf den Zementgehalt erfolgt nicht, da die Messwerte in ihrer ursprünglichen Form, bezogen auf das Betongewicht, die relevantesten Informationen für die Analyse der Chlorideinwirkung liefern und die Ermittlung des Zementgehaltes unter Umständen mit erhöhtem Beschaffungsaufwand verbunden wäre. Die Tiefenstufen der Chloridprofile wurden je nach Prüflabor und spezifischen Anforderungen des jeweiligen Projektes in Intervallen von 10 mm oder 15 mm erfasst. Dies widerspiegelt sich auch im Aufbau der Datenbank mit entsprechenden Eingabefeldern.

Dabei ist zu beachten, dass unterschiedliche Bezugsgrössen (bezogen auf Beton oder Zement) zu Abweichungen führen können. Für eine spätere Umrechnung wäre der Zementgehalt des jeweiligen Betons erforderlich, welcher jedoch oftmals nicht bekannt ist oder häufig abgeschätzt wird. Die einheitliche Bezugnahme auf das Betongewicht stellt sicher, dass die Einträge in der Datenbank konsistent ausgewertet werden können.

3.1.3.2 Messverfahren

Zur Bestimmung des Chloridgehalts im Beton stehen mehrere Verfahren zur Verfügung: die Volhard-Titration, die potentiometrische Titration, die Ionenchromatographie, die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA), die laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS) [49]. Die verwendeten Messverfahren werden in die Datenbank mit aufgenommen, um später einen möglichen Einfluss analysieren zu können.

3.1.3.3 Art der Probenentnahme

In der Regel erfolgt die Entnahme der Proben durch Kernbohrungen oder die Entnahme von Bohrmehl in definierten Tiefenstufen, um Chloridprofile zu erstellen. Auch dies wird in die Datenbank mit aufgenommen, um später einen möglichen Einfluss analysieren zu können.

3.1.3.4 Bemerkung

Dieses Eingabefeld in der Datenbank erlaubt zusätzliche Angaben zu erfassen, welche nicht adäquat durch die bereits erfassten Parameter des Chloridprofils erfasst werden konnten. Die Eingabe erfolgt als Freitext und kann beispielsweise Hinweise zur Probenentnahme, Besonderheiten vor Ort oder Auffälligkeiten bei der Analyse beinhalten.

3.1.3.5 Bauwerksart

Um eine einheitliche und vergleichbare Datenerfassung zu gewährleisten, ist die Auswahl der Bauwerksart auf die folgenden fünf Kategorien beschränkt: Brücken, Galerien, Überführungen, Stützbauwerke und Tunnel.

3.1.3.6 Bauwerksteil

Die Bauwerksteile der einzelnen Bauwerksarten (vgl. Kapitel 3.1.3.5) werden in diesem Parameter weiter aufgeschlüsselt. Ziel dieser weiteren Unterteilung ist es, spezifische

Bereiche der Bauwerke gezielt zu analysieren und ggf. vergleichbare Datensätze für die weitere Analyse zu erstellen.

In einem iterativen Vorgehen wurden nach dem Erhalt der ersten Chloridprofileinträge eine Vereinheitlichung der Benennung von Bauwerksteilen angestrebt. Je nach Bauwerksart haben sich unterschiedliche häufig genannte Begriffe resp. Bauwerksteile herauskristallisiert. Je nach Bauwerksart ergaben sich unterschiedliche, wiederkehrende Bauwerksteile, die in die endgültige Klassifikation aufgenommen wurden.

3.1.3.7 Bemerkung

Der Parameter «Bemerkung» erlaubt im zweiten Block eine zusätzliche Freitexteingabe, welche durch die anderen Parameter nicht adäquat abgebildet sind. Die Eingabe erfolgt wiederum als Freitext.

3.1.3.8 Baujahr (Mittelwert)

Dieser Parameter erfasst das Baujahr, das Fertigstellungsdatum des untersuchten Bauwerks oder ein Mittelwert aus Baubeginn bis Bauabschluss bei Projekten, welche sich über mehrere Jahre erstreckt haben. Der Parameter wird verwendet, um die Dauer der Exposition unter Berücksichtigung des Probeentnahmedatums (siehe Kapitel 3.1.2) zu berechnen.

Bei Ingenieurbauwerken können sich die Zeitpunkte Betonage und erste Chloridbeaufschlagung jedoch unterscheiden. Wird zur Prognose anstelle der effektiven Expositionsdauer das mittlere Bauwerks- oder Betonalter verwendet können dadurch theoretisch Abweichungen entstehen. Diese Unterschiede wirken sich vor allem in frühen Jahren aus, nehmen jedoch mit zunehmender Expositionsdauer tendenziell ab [24]. Aus diesem Grund, sowie aus Gründen von nicht immer vollständig verfügbaren Informationen über Zeitpunkt von Betonage und Zeitpunkt des Beginns der Chloridexposition, wurde dieser Unterscheid im vorliegenden Projekt nicht weiter berücksichtigt.

3.1.3.9 Höhe über Meer

Die Höhe über Meer (m. ü. M.) könnte ein relevanter Parameter auf die Chlorideinwirkung sein, da sie u.a. klimatische Bedingungen beeinflusst, welche wiederum einen potenziellen Einfluss auf den Chloridgehalt im Überdeckungsбетон haben könnten. Die Höhe über Meer wird als ganzzahliger Wert in Metern angegeben und lässt sich aus dem gleichen Abruf von der Homepage mao.geo.admin.ch für jeden Punkt in der Schweiz abrufen (vgl. auch Abbildung 4). Der Beschaffungsaufwand dieser Information ist daher eher gering, während die Datengenauigkeit eher hoch ist.

3.1.3.10 Koordinaten

Die geografischen Koordinaten des Chloridprofils sind von Bedeutung für die räumliche Zuordnung von weiteren Parametern wie Verkehr oder Wettereinflüssen. Die Koordinaten sollen im Format von Schweizer Landeskoordinaten der Landesvermessung LV 95 [48] angegeben werden, welche von der Homepage mao.geo.admin.ch herausgelesen werden können (siehe Abbildung 4). Der Beschaffungsaufwand dieser Information ist daher eher gering, während die Datengenauigkeit eher hoch ist.

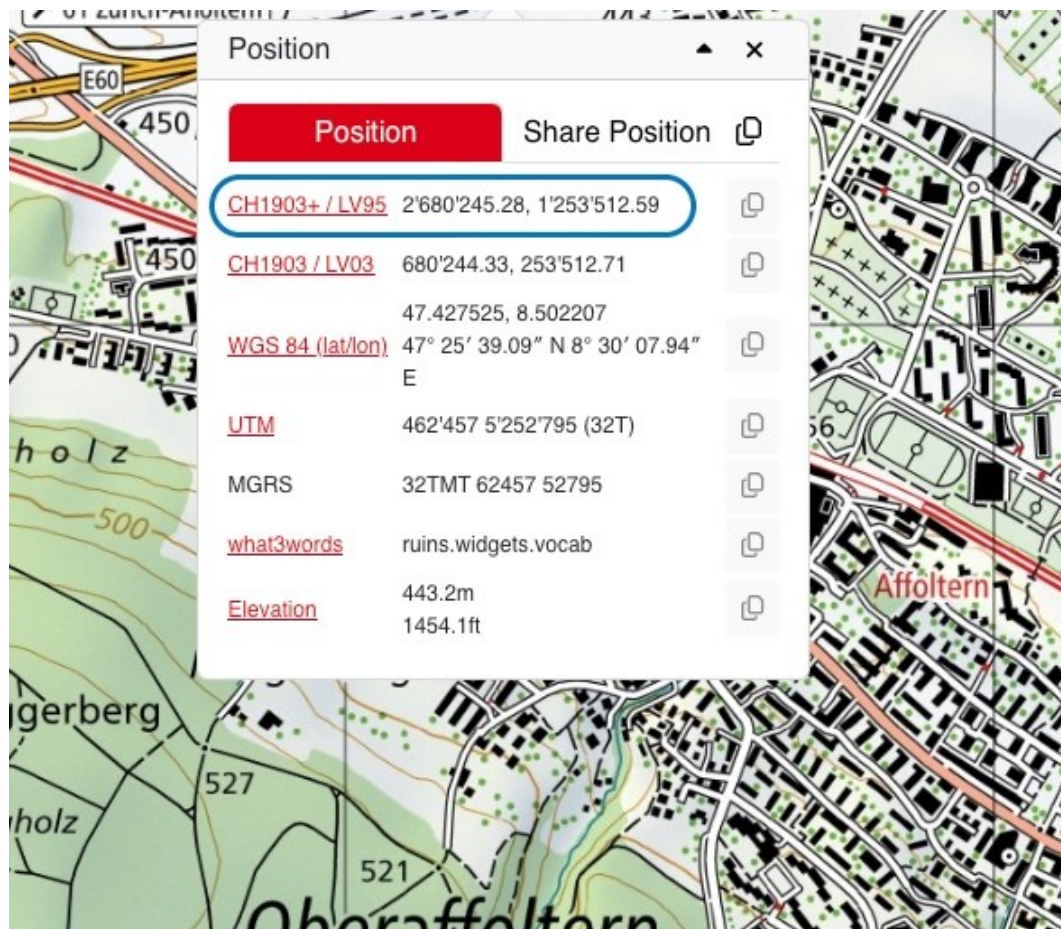


Abbildung 4: Beispiel zum Herauslesen der LV 95 Koordinaten (blau markiert) von der Homepage mao.geo.admin.ch des Bundes und der Höhe über Meer (Elevation).

Für mehrere Einträge am selben Bauwerk genügt in der Regel eine einmalige Angabe der Koordinaten, um nicht unnötigen Erfassungsaufwand zu generieren.

3.1.3.11 Bewittert

Dieser Parameter gibt an, ob das betreffende Bauteil direkt der Witterung ausgesetzt war oder nicht. Dabei kann zwischen «bewittert» oder «unbewittert» unterschieden werden. Unter «bewittert» verstehen wir in diesem Zusammenhang Oberflächen, die Niederschlägen, Sonneneinstrahlung und anderen Umwelteinflüssen unmittelbar ausgesetzt sind. «Unbewittert» hingegen sind Flächen, die durch eine Überdachung oder an der Untersicht geschützt sind oder sich in einem Tunnel befinden. Die Einordnung erfolgt anhand visueller Beurteilung oder vorhandener Planunterlagen.

3.1.3.12 Orientierung der Exposition

Die Orientierung der Bauteile in Bezug zur massgebenden Chloridquelle könnte gemäss der Literaturrecherche (vgl. Kapitel 6) ebenfalls eine entscheidende Rolle spielen – insbesondere bei Bauteilen wie Stützen oder Konsolköpfen.

Bei rechteckigen oder quadratischen Stützen sind in der Regel vier Seiten in Bezug auf die Fahrtrichtung vorhanden, welche in der Datenbank mit den Buchstaben A, B, C und D gekennzeichnet sind (vgl. auch Abbildung 5 (a)).

Ähnlich verhält es sich bei Konsolköpfen. Abhängig von ihrer Position und Orientierung können bestimmte Teile des Konsolkopfes stärker von Chloriden beeinflusst

werden als andere. Um dies zu kategorisieren, haben wir Teile des Konsolkopfes mit den Buchstaben A bis C codiert, entsprechend der Darstellung in Abbildung 5 (b).

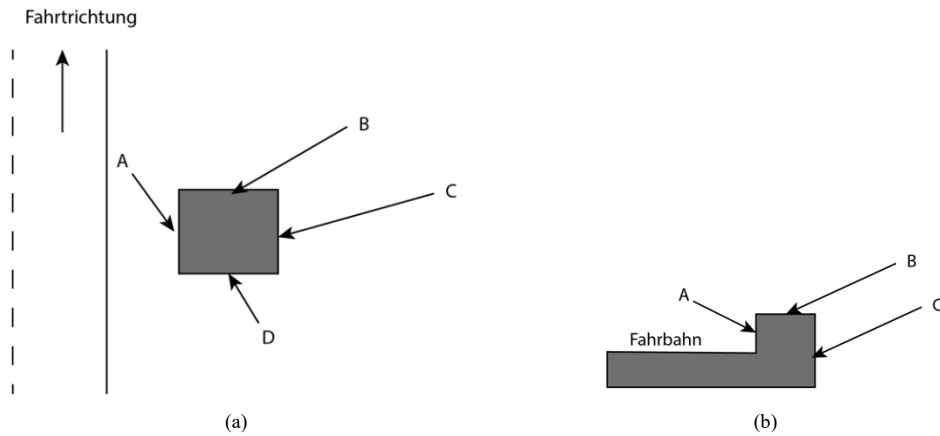


Abbildung 5: Bestimmung der Orientierung der Exposition bei Stützen in (a) und in (b) bei Konsolköpfen.

3.1.3.13 Horizontale Distanz zur Chloridquelle

Die horizontale Distanz zur Chloridquelle wurde definiert als die horizontale Distanz zwischen dem Ende der gesalzenen Fahrstreifen (ab Markierung des Fahrstreifens) und der Betonoberfläche (gemessen in der Normalprojektion). Generell wird von einer Genauigkeit von ± 20 bis 30 cm bei diesem Parameter ausgegangen. Abbildung 6 (a) und (b) zeigen zwei Beispiele für die Bestimmung der horizontalen Distanz bei unterschiedlichen Bauwerksarten.

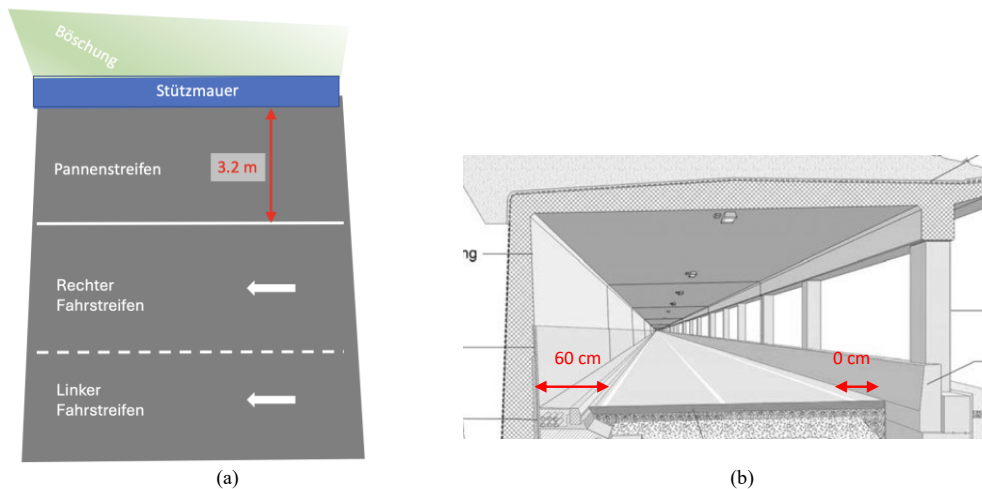


Abbildung 6: Beispiele zur Bestimmung des horizontalen Abstandes zum gesalzenen Fahrstreifen und des Bauwerks (resp. Bauwerksteils) in (a) für ein Stützmauer und in (b) für ein Galerie.

3.1.3.14 Vertikale Distanz zur Chloridquelle

Die vertikale Distanz bezeichnet den Höhenunterschied zwischen dem Ort der Probenahme an der untersuchten Betonoberfläche und der Oberkante der gesalzenen Fahrspur, analog zur horizontalen Distanz.

3.1.3.15 Strassenart

Der Parameter Strassenart beschreibt die Kategorie der Strasse, welche massgeblich für die Chloridbeaufschlagung des betrachteten Bauteils verantwortlich ist. In der Datenbank ist eine Unterteilung in Nationalstrassen, Kantonsstrassen oder Gemeindestrassen vorgesehen.

3.1.3.16 Durchfahrtsgeschwindigkeit

Die Durchfahrtsgeschwindigkeit ist derjenige Parameter, welcher die zulässige Höchstgeschwindigkeit an der Stelle der Probeentnahme angibt. Es wird diejenige Höchstgeschwindigkeit in die Datenbank aufgenommen, welche als massgeblich für die Chloridbeaufschlagung an der Stelle der Chloridentnahmestelle ist (vgl. auch Kapitel 3.1.3.15).

3.1.3.17 Verkehrsbelastung

Zur Beschreibung der Verkehrslast wurde der durchschnittliche Tagesverkehr (DTV) berücksichtigt. Dieser ist definiert als Mittelwert des Stundenverkehrs für eine bestimmte Zeitperiode. Die Daten von der Schweizerischen Automatischen Strassenverkehrszählung (SASVZ) beziehen sich auf die Zeitspanne zwischen 2007 und 2022 und sind mit einer Auflösung von einem Monat übermittelt worden.

Die räumliche Verteilung der Zählstellen der SASVZ ist in Abbildung 7 dargestellt. Abbildung 7 zeigt, dass die Zählstellen über die gesamte Schweiz verteilt sind, wobei eine höhere Dichte in den urbanen Gebieten und entlang der Hauptverkehrsachsen zu erkennen ist. Idealerweise wird jedem Profil die nächste gelegene Zählstelle derselben Strecke zugeordnet.

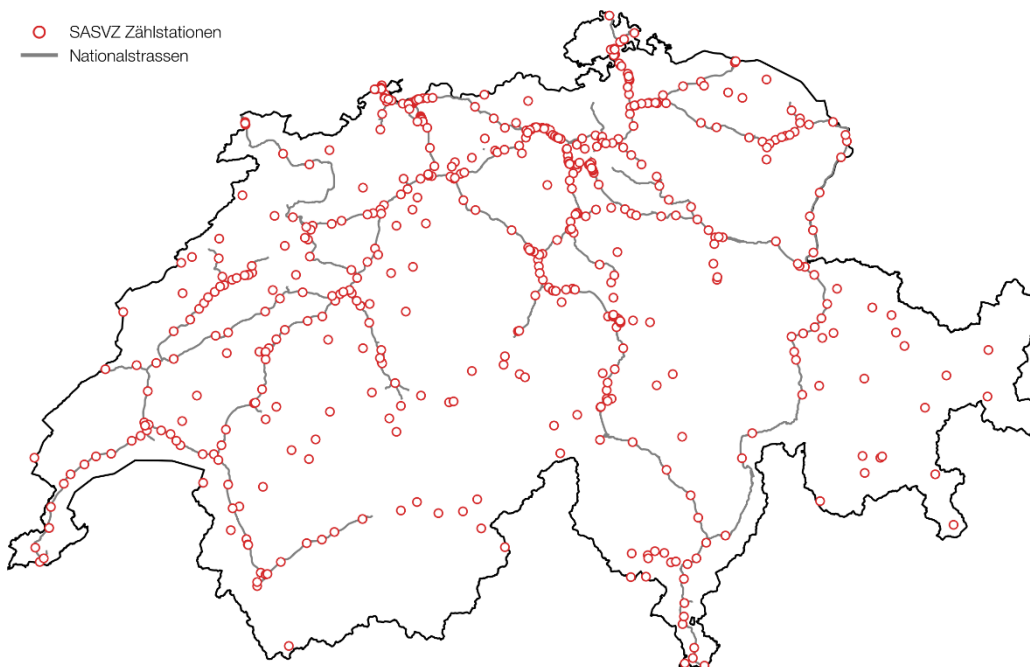


Abbildung 7: Örtliche Verteilung der Zählstationen der Schweizerischen Automatischen Strassenverkehrszählung (SASVZ).

3.1.3.18 Meteorologische Daten

Als für den Chloridgehalt bestimmenden wetterbedingten Einfluss wurde die Neuschneehöhe als relevanter Parameter gewählt. Mit 281 verfügbaren

Wettermessstationen bildet sich ein Netz über die ganze Schweiz, welche sich für die spätere Zuordnung an die Profile eignet. Die Daten wurden vom Datenportal für Lehre und Forschung des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie Meteo Schweiz bezogen [50]. Idealerweise wird jedem Profil die nächstgelegene Wetterstation Strecke zugeordnet, sofern gewisse Kriterien bezüglich Distanz und Höhenunterschied zwischen Messstation und Entnahmeort des Chloridprofils eingehalten werden.

3.1.3.19 Daten zum Taumittleinsatz

Für die in Abbildung 8 dargestellte Region sind für die Nationalstrassen Streudaten zu Tausalz und Sole auf unterschiedlichen Streckenabschnitten verfügbar. Die Daten wurden vom Bundesamt für Strassen für die Jahre 2019 bis 2024 bereitgestellt und umfassen die ausgebrachten Mengen pro Streckenabschnitt in Tonnen pro Kilometer und Jahr. Diese Angaben müssen mit Hilfe der geographischen Koordinaten der Chloridprofilentnahmeorte und den einzelnen Streckenabschnitten räumlich zugeordnet werden.

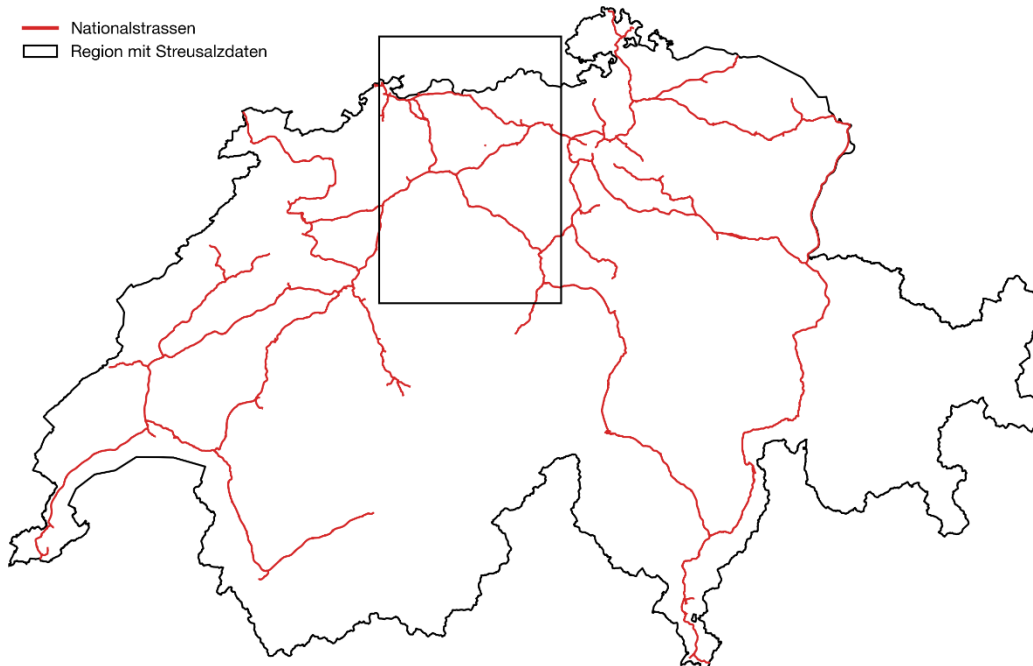


Abbildung 8: Nationalstrassen mit eingezeichneter Region im Nordwesten der Schweiz mit vorhandenen Streudatenangeben über die Jahre 2019 bis 2024.

3.1.3.20 Himmelsrichtung (Orientierung der Fläche)

Die Ausrichtung der Betonoberfläche in Bezug zur Windrose wurde, falls ohne erheblichen Mehraufwand verfügbar, ebenfalls erfasst. Hierbei ist die Himmelsrichtung des aus der Betonoberfläche herausragenden Normalvektors anzugeben. Abbildung 9 veranschaulicht die Bestimmung der Ausrichtung gegenüber der Windrose an einem Beispiel.

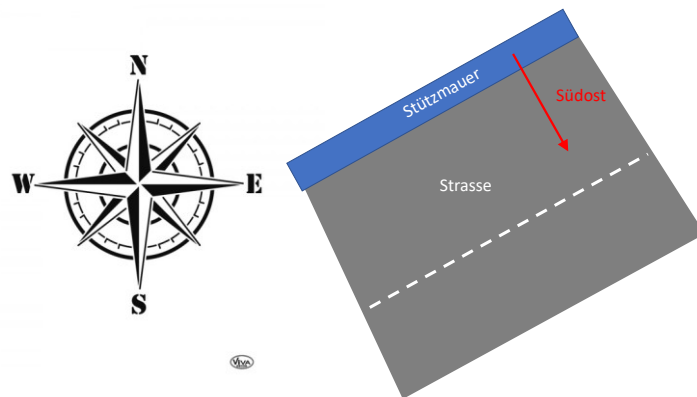


Abbildung 9: Beispiele zur Bestimmung der Orientierung der Fläche gegenüber der Windrose.

3.1.3.21 Winkel relativ zur Vertikalen

Der Winkel relativ gegenüber der Vertikalen beschreibt die Neigung der exponierten Betonoberfläche gegenüber der Lotrechten (Abbildung 10). Positive Winkel beschreiben eine Neigung des Bauwerks hin zur Chloridquelle. Negative Winkel beschreiben eine Neigung des Bauwerks weg von der Chloridquelle. Die Angabe erfolgt in Grad als ganzzahliger Wert.

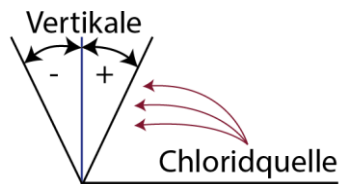


Abbildung 10: Definition des Winkels relativ zur Vertikalen.

3.1.3.22 Neigung des Bauwerksteils im Grundriss relativ zur Fahrspur

Dieser Parameter beschreibt die Abweichung der Ausrichtung eines Bauwerksteils im Grundriss gegenüber der Fahrspur, bezogen auf die horizontale Ebene. Die Neigung wird in Grad als ganzzahliger Wert angegeben. Positive Werte entsprechen einer Drehung hin zur Fahrspur, negative Werte einer Drehung weg davon. Bei bidirektionalem Verkehr ist jene Fahrtrichtung bzw. Spur als Referenz zu wählen, welche primär für die Chloridbeaufschlagung des Bauteils verantwortlich ist. Abbildung 11 veranschaulicht die Definition einer positiven oder negativen Abweichung in Grad gegenüber der Fahrspur.

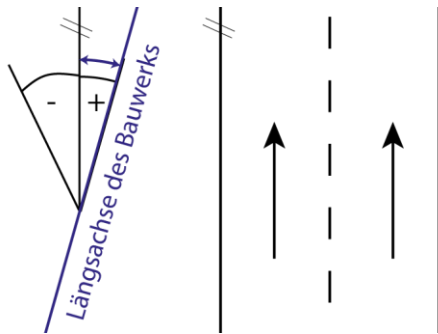


Abbildung 11: Definition der Neigung des Bauwerksteils im Grundriss relativ zur Fahrspur.

3.1.3.23 Exposition nach Norm (XC)

Der Parameter XC beschreibt die Expositionsklasse gemäss Norm SIA 262 für Bewehrungskorrosion in karbonatisiertem Beton. Die Expositionsklasse ist unterteilt in vier Kategorien (XC1 bis XC4) und wird in der Datenbank als String erfasst.

3.1.3.24 Exposition nach Norm (XD)

Der Parameter XD beschreibt die Expositionsklasse gemäss Norm SIA 262 bei chlorid-induzierter Bewehrungskorrosion (vgl. auch Tabelle 1). Dieser Parameter wird als String für das jeweilige Chloridprofil in der Datenbank erfasst.

3.1.3.25 Längsneigung

Die Längsneigung wird ausschliesslich für die Bauwerksart Tunnel erfasst (vgl. Kapitel 3.1.3.5). Der Parameter gibt die Neigung der Tunnelachse in Längsrichtung, bezogen auf die Horizontale. Dabei kennzeichnen positive Werte eine Steigung und negative Werte ein Gefälle. Die Angabe erfolgt in Grad als ganzzahliger Wert. Im Falle eines im Gegenverkehr betriebenen Tunnels orientiert sich die Bestimmung der Längsneigung an derjenigen Fahrspur, welche mutmasslich für die Chlorideinwirkung verantwortlich ist.

3.1.3.26 Verkehrsregime

Das Verkehrsregime wird ebenfalls nur für die Bauwerksart Tunnel erfasst (vgl. Kapitel 3.1.3.5). In Tunnelbauwerken wird zwischen Gegenverkehr und Richtungsverkehr unterschieden. Bei «Gegenverkehr» nutzen Fahrzeuge die gleiche Tunnelröhre in entgegengesetzter Richtung. «Richtungsverkehr» hingegen liegt vor, wenn separate Tunnelröhren für jede Fahrtrichtung vorhanden sind. Die Erfassung des «Verkehrsregime» fusst auf der Annahme, dass Gegenverkehr eher zu Luftturbulenzen führt als Richtungsverkehr, was die Verteilung der Chloride vorab via Sprühnebel im Tunnelprofil beeinflussen dürfte.

3.1.3.27 Distanz zum Portal

Die Distanz zum Portal wird ebenfalls nur für die Bauwerksart Tunnel erfasst (vgl. Kapitel 3.1.3.5). Der Parameter gibt die Entfernung des Chloridprofils vom nächstgelegenen Tunnelportal an. Die Distanz wird in Metern erfasst und als Integer in der Datenbank gespeichert. Die Erfassung der «Distanz zum Portal» gründet auf der Erfahrung aus der Praxis, nämlich dass bei längeren Tunneln oft im Portal-Bereich höhere Chloridgehalte im Beton gemessen werden als weiter im Tunnelinnern.

3.1.3.28 Weitere Bemerkungen

Die Einträge im Feld Bemerkungen sind Freitexte, welche eine zusätzliche Beschreibung zum Bauwerk oder Exposition liefern. Diese Information sind hilfreich für die Datenauswertung, falls dieses Bauwerk besonders bei einer detaillierten Analyse heraussticht.

3.1.3.29 Oberflächenschutzsystem

Dieser Parameter dokumentiert, ob zum Zeitpunkt der Entnahme des Bohrkerns oder des Bohrmehls ein Oberflächenschutzsystem (OS) auf der Bauteiloberfläche vorhanden war. Falls ein OS appliziert wurde, ist dessen Bezeichnung anzugeben (sofern bekannt).

3.1.3.30 Oberflächenschutzsystem – Qualitative Einschätzung

Der Parameter Oberflächenschutzsystem (Kapitel 3.1.3.29) gibt den Typ des Schutzsystems an. Der Parameter «Bemerkungen zum OS» soll eine qualitative Abschätzung über den Zustand bzw. Wirksamkeit des OS abgeben. Dabei werden die drei Kategorien «kein Oberflächenschutzsystem», «eher undicht» und «eher dicht» unterschieden:

- «Eher undicht» umfasst alle OS, die einen geringen oder keinen Widerstand gegen das Eindringen von Chloriden bieten. Dies kann beispielsweise durch eine mögliche Potenzialfeldmessung nach Bewässerung der Betonoberfläche oder eine vergleichsweise hohe Wasseraufnahme im Labor nachgewiesen werden
- «Eher dicht» wird verwendet, wenn die Potenzialfeldmessung nach Bewässerung nicht möglich ist oder eine vergleichsweise geringe Wasseraufnahme im Labor festgestellt wurde
- Die qualitative Einschätzung darf durch den Experten/in erfolgen.

Es ist den Autoren dieser Arbeit bewusst, dass diese Klassifizierung ihre Schwächen aufweist. So ist die Einschätzung subjektiv; ausserdem betrifft sie nur einen bestimmten Zeitpunkt im Leben des Bauwerks und erlaubt keine abschliessende Bewertung der Funktionalität des OS während der vorangehenden Jahre/Jahrzehnte, in welchen die Chloride in den Beton eingetragen wurden. Eine bessere Bewertung des OS und insbesondere der Wirksamkeit des OS über die Zeit, namentlich die Vergangenheit, ist jedoch aufgrund des Mangels an entsprechenden Informationen bedauerlicherweise nicht möglich. Da weiter relativ viele der hier betrachteten Bauwerke in der Schweiz ein OS aufweisen, erschien dem Projektteam ein a-priori Ausschluss aller Datensätze aus Bauwerken, bei denen ein OS vorhanden war, nicht zielführend.

3.1.3.31 Abdichtungssystem

Die Angabe des Abdichtungssystems beschreibt das vorhandene Abdichtungssystem als String. Mit Abdichtungssystem ist hier (im Gegensatz zu OS, siehe oben) ein System gemeint, das entweder eine physikalische Abdichtungsfunktion hat (hydraulische Dichtheit), namentlich als eine Abschirmung des Betons gegenüber Wassereintritt konzipiert ist, beispielsweise als Flüssigkunststoffabdichtung, Bitumenbahnen oder das sich durch seinen Schichtaufbau bzw. Schichtdicke deutlich von einem OS abhebt (z.B. eine Asphaltschicht oder eine Hartbetonschicht).

Falls kein Abdichtungssystem vorhanden ist, kann dieser Parameter leer gelassen werden.

3.1.3.32 Abdichtungssystem – Qualitative Einschätzung

Beim Parameter «Bemerkungen zum Abdichtungssystem» erfolgt die qualitative Einschätzung der Abdichtung anhand ihrer Wirksamkeit und des Aufbaus. Die qualitative Einschätzung darf durch den Experten/in erfolgen. Dabei werden drei Kategorien unterschieden: «keine Abdichtung», «eher undicht» und «eher dicht»:

- «Keine Abdichtung» liegt vor, wenn die Fläche direkt befahren wird oder Asphaltbeton ohne zusätzliche Schutzschicht direkt auf dem Konstruktionsbeton aufgebracht ist.
- «Eher undicht» umfasst Abdichtungen wie schwimmend verlegte Gussasphaltschichten oder Betonbeläge, die nur einen begrenzten Schutz gegen das Eindringen von Chloriden bringen.
- «Eher dicht» bezeichnet Abdichtungen mit einer geklebten Schutzschicht, beispielsweise PBD-Abdichtungen, die einen hohen Widerstand gegen das Eindringen von Schadstoffen wie Chloride aufweisen.

3.1.3.33 Betondruckfestigkeit

Als zusätzlicher Parameter kann bei einem Chloridprofil ebenfalls die Betondruckfestigkeit zugeordnet werden, dies in Form eines numerischen Wertes in der Einheit N/mm^2 .

3.1.3.34 Haftzugfestigkeit

Die Haftzugfestigkeit kann ebenfalls als zusätzlicher Parameter einem Chloridprofil zugeordnet werden. Die Angabe erfolgt in N/mm^2 (Float).

3.1.3.35 Zementart nach Norm (nach Plan)

Die Zementart beeinflusst den Chloridmigrationskoeffizienten, der wiederum positiv mit dem Chlordiffusionskoeffizienten korreliert [28] (positive Korrelation bedeutet in diesem Zusammenhang, wenn eine Variable steigt, steigt auch die andere). Ist dieser Parameter bekannt aus verlässlichen Quellen (z. B. Bauwerksunterlagen), kann er als zusätzlicher Wert in Datenbank aufgenommen werden. Falls keine verlässlichen Informationen vorliegen, soll das Feld leer bleiben.

3.1.3.36 Zementgehalt

Falls der Zementgehalt des verwendeten Betons aus Bauwerksunterlagen bekannt ist, kann dieser Parameter in der Einheit kg/m^3 in die Datenbank aufgenommen werden. Mit dem Zementgehalt lassen sich die Chloridgehalte bezogen auf den Zement umrechnen (vgl. Kommentar in Kapitel 3.1.1).

3.1.3.37 w/z-Wert

Neben dem Zementgehalt (vgl. Kapitel 3.1.3.35) ist auch der Wasser-Zement-Wert (W/Z-Wert) ein wichtiger Parameter für die Bewertung der Chloridpenetration in den Überdeckungsbeton [28]. Der W/Z-Wert ist dimensionslos und beschreibt das Massenverhältnis von Wasser zu Zement im Beton. Die Angabe erfolgt nur, sofern verlässliche Planunterlagen oder Laboranalysen vorliegen. Bei diesem Parameter sollen keine Abschätzungen vorgenommen werden, sofern er unbekannt ist.

3.1.3.38 Weitere Betoneigenschaften

Dieser Parameter dient der Erfassung zusätzlicher Betoneigenschaften, die durch die zuvor genannten Parameter nicht abgedeckt sind. Hier können relevante Informationen in Form eines Freitextes (String) (z. B. Angaben zu Zusatzmitteln) hinterlegt werden.

3.1.3.39 Betonüberdeckung nach Plan

Die Betonüberdeckung nach Plan in Millimetern beschreibt den nominellen Abstand zwischen der Betonoberfläche und der Oberfläche der Bewehrung, wie er in den Plänen vorgesehen ist.

3.1.3.40 Betonüberdeckung gemessen (Mittelwert)

Dieser Parameter erfasst den mittleren Wert der gemessenen Betonüberdeckung vorzugsweise an der Entnahmestelle des Chloridprofils oder am selben Bauwerk/Bauwerksteil, vorausgesetzt, dieser Parameter ist aus den Unterlagen der Zustandsuntersuchung bekannt.

3.1.3.41 Betonüberdeckung gemessen (Standardabweichung)

Die Standardabweichung in Millimetern der am Bauwerk/Bauteil gemessenen Betonüberdeckung kann als zusätzlicher Parameter in die Datenbank aufgenommen werden.

3.1.3.42 Karbonatisierungstiefe Mittelwert

Dieser Parameter gibt den mittleren Wert der gemessenen Karbonatisierungstiefe an der Entnahmestelle des Chloridprofils oder in deren unmittelbarer Nähe an.

3.1.3.43 Karbonatisierungstiefe Minimal

Die geringste gemessene Karbonatisierungstiefe kann als zusätzlicher Parameter in der Datenbank hinterlegt werden. Die Angabe erfolgt in Millimetern (Integer) und sollte in der Nähe des Chloridprofils aufgenommen worden sein.

3.1.3.44 Karbonatisierungstiefe Maximal

Die höchste gemessene Karbonatisierungstiefe kann als zusätzlicher Parameter gespeichert werden. Die Angabe erfolgt in Millimetern (Integer) und der Messwert sollte in der Nähe der Chloridprobeentnahmestelle aufgenommen worden sein.

3.1.3.45 Zusammenfassung der Datenbankkonzeption

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die in Kapitel 3.1.1 beschriebene Datenbank einen umfassenden und systematischen Ansatz zur Erfassung und Analyse von Chloridprofilen aus Ingenieurbauwerken exponiert durch Tausalze darstellt. Die entwickelte detaillierte Klassifizierung der Parameter nach Wichtigkeit und Beschaffungsaufwand (vgl. Abbildung 3) ermöglicht eine praxisnahe Datenerhebung. Standardisierte Eingabeformate erhöhen dabei die Datenkonsistenz.

Die in Kapitel 3.1.2 definierten Parameter, die von Chloridprofilen über Bauwerks- und Expositionsdaten bis hin zu Betoneigenschaften reichen, bieten eine Grundlage für die spätere Analyse des Chlorideintrags in den Überdeckungsbeton. Die Festlegung klarer Kriterien für die Aufnahme und den Ausschluss von Daten, wie z. B. das Ausschließen von Chloridprofilen aus gerissenen Betonbereichen, sollte zur Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit der späteren Analysen in die Praxis beitragen.

Die Flexibilität hinsichtlich der verschiedenen Parameter, sowie die klare Struktur der Datenbank und der Datenformate gewährleistet:

- Erweiterbarkeit um zusätzliche Datensätze
- Nachträgliche Vervollständigung vorhandener Einträge
- Langfristige Nutzbarkeit für wissenschaftliche Fragestellungen
- Qualitativ bestmöglicher Datensatz als Grundlage für weiterführende Analysen

Die systematische Datenerfassung bildet somit die Grundlage für die nachfolgenden Analysen und leistet einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Dauerhaftigkeitsbewertung von Bauwerken.

3.2 Datenauswertung und Datenanalyse: Einbezug von Statistik, KI und Expertenwissen

Nach der systematischen Erfassung der Daten in der Datenbank, wie in Kapitel 3.13.1 beschrieben, geht es im zweiten Schritt darum, die gesammelten Daten zur Chlorideinwirkung auf Betonbauwerke eingehend zu analysieren. In diesem Kapitel werden die Methoden und Verfahren, mit denen aus den Rohdaten wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden sollen, vorgestellt.

Ein zentraler Schritt ist die Auswertung der Chloridprofile dahingehend, die Oberflächenchloridkonzentration C_s zu ermitteln. Dies wird, wie weiter unten beschrieben, durch Anwendung des in der Fachliteratur etablierten Diffusionsgesetzes erfolgen, namentlich durch Fitten der Messwerte mit der Fehlerfunktionsgleichung (4), was neben C_s auch den Diffusionskoeffizienten beinhaltet. Wie in Kapitel 2 beschrieben, ist C_s die sinnvollste Grösse, die als Mass für die Chloridbelastung herangezogen werden kann. Aus diesem Grund bildet die Auswertung der gemessenen und in der Datenbank aggregierten Chloridprofile hinsichtlich C_s die Grundlage für die Analyse der Einflussfaktoren auf die Chloridbelastung.

Bevor die Datenbank für weiterführende Auswertungen verwendet werden konnte, war weiter eine gezielte Vorbereitung erforderlich. Trotz strukturierter Erfassung führten unterschiedliche Datenquellen und Erfassungsmethoden zu Inkonsistenzen – etwa bei Einheiten, Schreibweisen oder unvollständigen Angaben. Auch Freitext in numerischen Feldern stellte eine Herausforderung bei der Auswertung dar. Zur Sicherstellung einer zuverlässigen Analyse wurde ein mehrstufiger Vorverarbeitungsprozess durchgeführt, der die Bereinigung, Vereinheitlichung und Typenumwandlung der relevanten Parameter umfasste. Diese "Kuratierung" der Datenbank war ein zentrales Element in diesem Forschungsprojekt, die nicht nur mit Blick auf die hier anschliessend durchgeführte Auswertung im Fokus stand, sondern auch um eine möglichst qualitativ hochwertige Datenbank für die weitere Verwendung in der wissenschaftlichen Gemeinschaft zu erzielen.

Der verfolgte Analyseansatz beschränkte sich nicht auf rein mathematisch fundierte Modelle. Es wurde ein breiterer Ansatz verfolgt, der sowohl statistische Methoden als auch Techniken des maschinellen Lernens und das Fachwissen von Expertinnen und

Experten einbezieht. Angestrebt wurde ein robustes und interpretierbares Vorhersagemodell, das komplexe Zusammenhänge in den Daten aufdeckt und gleichzeitig, im Idealfall, in der Praxis anwendbar ist.

Die Einbindung von Expertenwissen, das wir durch Workshops und Diskussionen mit Experten aus Baustoffprüflaboren und der Begleitkommission gewonnen haben, ist ein zentraler Bestandteil dieses Kapitels. Durch die Kombination von datengetriebenen Analysen und praktischer Erfahrung erhalten wir eine umfassende Bewertung der Chlorideinwirkung durch Streusalzeinsatz auf Bauwerke im Strassenwesen.

3.2.1 Datenvorverarbeitung

Die Qualität jeder Auswertung steht und fällt mit der Qualität der zugrunde liegenden Daten. Um aus den gesammelten Chloridprofilen resp. Datenbankeinträgen belastbare Aussagen zur Chlorideinwirkung auf Betonbauwerke ableiten zu können, ist eine sorgfältige und strukturierte Datenvorverarbeitung erforderlich. Ziel dieses Arbeitsschritts ist es, die vorliegenden Rohdaten in eine konsistente und auswertbare Form zu überführen. Dabei muss mit fehlenden Werten umgegangen werden und inkonsistente Dateneingabeformate müssen systematisch behandelt und nach Möglichkeit homogenisiert werden.

3.2.1.1 Fehlende Werte

Infolge der gewählten Methodik zur Erstellung der Datenbank – namentlich die Entscheidung, möglichst viele Parameter zu erfassen, unter Inkaufnahme, dass nicht in jedem Fall alle gleichermassen verfügbar sein können - sind fehlende Einträge unvermeidbar (vgl. Kapitel 3.1.1). Je nach Parameter und des mutmasslichen Beschaffungsaufwandes können mehr oder weniger fehlende Datenpunkte in der Datenbank vorhanden sein. Für die erste Analyse der Datenbank werden diese fehlenden Werte ignoriert. Für die Vorhersagemodelle werden bewährte Konzepte eingesetzt, um diese Lücken zu füllen (siehe Kapitel 3.2.4.1).

3.2.1.2 Ausreisser

Ausreisser sind Werte, die eine signifikante Abweichung vom restlichen Datensatz aufweisen und potenziell das endgültige Analyseergebnis stark beeinflussen können. Mögliche Ursachen für diese Abweichungen können fehlerhafte Messungen, inkorrekte Dateneinträge oder aussergewöhnliche Randbedingungen am Bauwerk sein. Zur Identifikation möglicher Ausreisser wurden gezielt Analysen durchgeführt, punktuell zusätzliche Rückfragen bei den Baustoffprüflabors und Validierungen getätigt und in der Datenbank wurden Massnahmen in Form von Bemerkungsfeldern bereits vorgängig implementiert, um solche Ausreisser auch zu einem späteren Zeitpunkt wie zum Beispiel der vertieften Datenanalyse erkennen zu können.

3.2.1.3 Standardisierung, Plausibilisierung und Umwandlung von Datentypen

Ein weiterer wichtiger Schritt der Datenvorbereitung betraf die Standardisierung und Plausibilisierung der Daten. Die Herausforderung bei der Standardisierung lag darin, dass die Daten von unterschiedlichen Baustoffprüflabors aus verschiedenen Projekten und mit unterschiedlichen Erfassungsmethoden erhoben wurden. Trotz einer einheitlichen Vorlage und Erfassungsanweisung führte dies zu Inkonsistenzen in der Schreibweise, Tippfehlern und der Nichteinhaltung der in Kapitel 3.1 definierten Datenformate; was unter anderem auf den sehr hohen Aufwand zurückzuführen ist, der mit

dem Zusammentragen der Daten zusammenhängt. Um diese fehlerhaften und nicht geforderten Einträge zu beheben, wurden systematische Bereinigungsregeln eingeführt und durchgeführt.

Im Folgenden einige Beispiele zur Datenbereinigung aufgelistet:

- Vereinheitlichung von Schreibweisen: In der Spalte "Bauwerk" wurden unterschiedliche Bezeichnungen wie "Stütze Nummer 3" auf "Stütze" standardisiert.
- Anpassung von Einheitsangaben: Werte wie "grösser als 100" wurden in "100" umgewandelt, und fehlende Angaben wurden durch Standardformulierungen wie "nicht genannt", "unbekannt" oder "keine Angabe" ersetzt.
- Extraktion von numerischen Werten aus Strings bei numerischen Parametern, welche einen zusätzlichen Kommentar enthielten: Strings wie "(28) lokal bei BM" mussten in 28 umgewandelt werden.
- Vereinheitlichung von unterschiedlichen Formaten des Datums.

Anschliessend konnten die Datentypen gemäss den in Kapitel 3.1 geplanten Typen umgewandelt werden. Diese Typenkonvertierung bildet auch die Grundlage für die statistische Analyse von numerischen Parametern oder die Anwendung von maschinellem Lernen in einem späteren Schritt.

3.2.2 Anwendung des Diffusionsmodells und Generierung von Zielvariablen

3.2.2.1 Grundlagen und Herausforderungen

Die in Kapitel 3.1 beschriebene Datenbank bildet das Fundament für die tiefergreifende Analyse der Chlorideinwirkung auf Bauwerke. Der Prozess der Datenauswertung und -analyse beginnt mit der mathematischen Anpassung des Diffusionsmodells an die gemessenen Chloridprofile (siehe Gl. (4)), um die beiden grundlegenden Parameter Oberflächenchloridkonzentration und Diffusionskoeffizient pro Chloridprofil zu bestimmen. Diese Parameter bilden mit dem Diffusionsmodell einen Teil der Grundlage für die weiterführende statistische Analyse, die darauf abzielt, die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Chlorideinwirkung zu bestimmen. Die zusätzlichen, in der Datenbank erfassten Parameter erlauben erst die weitergehende Analyse.

Ein wichtiger Aspekt bei der Analyse ist die Entscheidung, ausschliesslich bereits in den Archiven der Baustofflabore vorhandene Chloridprofile zu verwenden, und im Rahmen dieses Projekts keine zusätzlichen Chloridprofile zu messen. Letzteres wäre aus ressourcentechnischen Gründen, primär finanziellen Randbedingungen und angesichts des sehr grossen Bedarfs an Messdaten, im Rahmen dieser Studie nicht möglich gewesen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Tiefenintervalle bei den vorhandenen Chloridprofilen den berechneten Diffusionskoeffizient und den Oberflächenchloridgehalt beeinflussen können. Dazu existieren Ansätze zur Optimierung der Tiefenintervalle (vgl. [51] und Abbildung 12). Bei grösseren Intervallen und bei höheren Chloridwerten an der Oberfläche führt dies an der Oberfläche zu einem flachen Profil und folge dessen zu einem grösseren effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten [24]. Die Abweichungen beim Diffusionskoeffizienten unter Verwendung vom CEM I können bei Intervallbreiten von 30 mm bis zu 15 % betragen [24]. Im vorliegenden Projekt war die Intervallbreite üblicherweise 10 mm oder 15 mm.

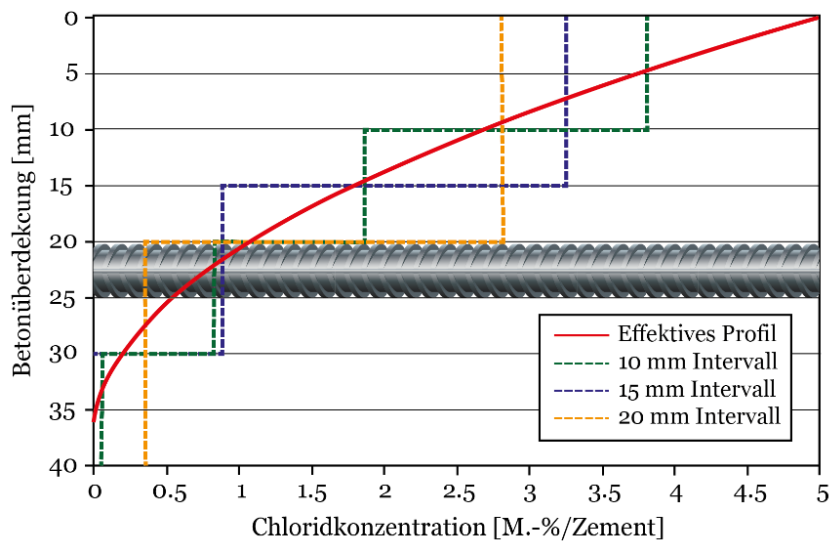


Abbildung 12: Beispiel eines Chloridprofils – Vergleich des effektiven Profils mit stufenweisen Profilen aus Bohrmehl mit unterschiedlichen Intervallen (adaptiert von [51]).

Zusätzlich zu diesen Einschränkungen besteht eine weitere Herausforderung in der Beschaffenheit der vorliegenden Chloridprofile. Da rund 20% der Chloridprofile nur aus zwei Datenpunkten bestehen (vgl. auch Abbildung 34), was das Fitten der Diffusionsgleichung mit 3 Unbekannten erschwert, wurde festgelegt, dass der Alterungskoeffizient auf 0.3 fixiert wird. Dies lässt sich in diesem Projekt gut dadurch rechtfertigen, dass mutmasslich alle betrachteten Bauwerke mit Portlandzement erstellt wurden, wie das in der Schweiz in der Zeit, aus welcher diese Bauwerke stammen, übliche Praxis war. Folge dessen lässt sich Gleichung (4) direkt numerisch auswerten.

Eine vorläufige Analyse der in der Datenbank erfassten Chloridprofile offenbarte unerwartete Abweichungen von der erwarteten monotonen Abnahme der Chloridkonzentration mit zunehmender Tiefe, abgesehen von den ersten beiden Tiefenintervallen. Es waren nur 55% der Chloridprofile strikt monoton fallend. Hierbei gilt es noch zu bemerken, dass je nach Projekt kein Wert auf dem ersten Tiefenintervall erfasst wurde. Es wird angenommen, dass die Messwerte der ersten Tiefenstufe jedes Chloridprofils (0 bis 10 mm oder 0 bis 15 mm) durch die Konvektionszone (vgl. Abbildung 2) beeinflusst wurde, d.h. die gemessenen Werten also unterhalb der gefitteten Kurve liegen dürften. Dies ist ein möglicher Grund dafür, dass die Chloridprofile nicht strikt monoton abfallen. Es wurde in der Literatur häufig beobachtet, dass das Maximum des Chloridprofils sich über die Zeit ins Innere des Betons verschiebt [5], [26], [27]. Weitere mögliche Gründe für "nicht monoton fallende" Chloridprofile liegen in der Ungenauigkeit der Chloridmessverfahren oder im Einfluss von Zuschlagskörner in der untersuchten Betonprobe.

Um den Einfluss der Konvektionszone zu minimieren, wurden die ersten beiden Tiefenstufen bei der nächsten Analyse von der Betrachtung ausgeschlossen. Durch den Ausschluss erhöhte sich der Anteil der monoton fallenden Profile auf 72%. Weitere 47 Profile wiesen keine Veränderung der Chloridkonzentration über die Tiefe auf und können daher nicht mit Gleichung (4) gefittet werden.

Die Herausforderung beim Fitting wird in Abbildung 13 verdeutlicht. Diese Abbildung zeigt die Tiefenstufe, in der die maximalen Chloridgehalte der einzelnen Profile gemessen wurden. Obwohl die höchsten Chloridgehalte am häufigsten im obersten Tiefenintervall auftraten, fanden sich ebenfalls Maximalwerte im Tiefenbereich von 20-30 mm oder sogar 30-40 mm. Diese hohe Variabilität unterstreicht die Herausforderung bei der Modellierung der Chloridprofile.

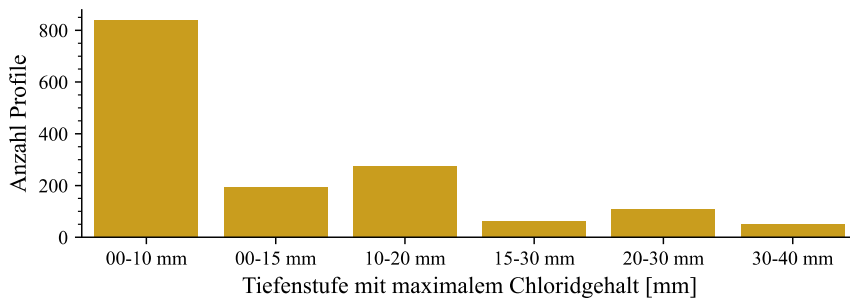


Abbildung 13: Die Tiefenlage der maximalen Chloridgehalte in den gemessenen Profilen zeigt, auf welcher Tiefenstufe der jeweils höchste Chloridgehalt pro untersuchtes Profil festgestellt wurde.

3.2.2.2 Entwicklung einer robusten Fittingroutine

Um die Oberflächenchloridkonzentration und den Diffusionskoeffizient mit Hilfe von Gleichung (4) und (5) zuverlässig zu bestimmen, sollte die Fitting-Methode der kleinsten Quadrate (Least squares) nicht verwendet werden. Diese Methode reagiert empfindlich auf mögliche Ausreisser, deshalb wird die Verwendung von robusteren Methoden angestrebt. Bei der Methode der kleinsten Quadrate ist die Fehlerfunktion die Summe der quadrierten Differenzen zwischen dem vorhandenem Chloridprofil und dessen vorhergesagten Werten. Diese Fehlerfunktion wird während der mathematischen Anpassung (Fitten) minimiert und führt bei grösseren Abweichungen (z. B. Ausreissern) zu grossen Fehlertermen. Um eine robustere Fittingroutine zu erhalten, wurden folgenden Überlegungen angestellt:

- Hinzufügen eines fiktiven Datenpunktes auf einer bestimmten Tiefe, um das Fitting zu stabilisieren
- Verwendung robuster Fehlerfunktionen und Algorithmen
- Gewichtung der Messwerte: Messwerte nahe der Betonoberfläche bekommen weniger Gewicht.

Nachfolgend soll detaillierter auf die drei möglichen Massnahmen eingegangen werden.

Um die Fittingroutine robuster gegenüber möglichen Ausreissern zu gestalten, soll im Innern des Betons ein fiktiver Punkt mit einer geringen Chloridkonzentration angenommen werden. Der fiktive Punkt wurde bei 10 cm Tiefe gesetzt und eine Chloridkonzentration von 0.0001 bezüglich dem Betongewicht. Dieser fiktive Punkt kann begründet werden durch die initial geringe Chloridkonzentration im Zement bzw. Beton (Grundchloridgehalt).

Die Fittingalgorithmen und Fehlerfunktionen umfassen den MAE (Mean Absolute Error), der die absoluten Abweichungen anstelle der Quadrate minimiert, die Huber-

Verlustfunktion [52], welche eine Mischung aus quadratischen und linearen Abweichungen je nach Grösse des Fehlers darstellt, den RANSAC (Random Sample Consensus) [53], einen iterativen Algorithmus, der Ausreisser durch ein iterative Vorgehen ignoriert, und schliesslich die iterative Methode IRLS (Iteratively Reweighted Least Squares) [54], einer Methode, welche die Ausreisser durch iterative Anpassung der Gewichtung reduziert. Es ist jedoch wichtig anzumerken, dass nicht jede Fittingroutine zwangsläufig konvergiert.

Sämtliche Vorgehensweisen wurden auf jedes Profil angewendet und geprüft, ob die Fittingmethode erfolgreich konvergiert hat. Die einzelnen Lösungen können anschliessend miteinander verglichen werden. Hierbei gilt es anzumerken, dass das Bestimmtheitsmass (R^2) zur Beurteilung der Güte einer Modellanpassung mit Bedacht interpretiert werden muss. Die robusten Verfahren sind ausgelegt den Einfluss von Ausreissern zu minimieren, indem sie diese ignorieren oder deren Einfluss reduzieren. Dies hat Auswirkungen auf das Bestimmtheitsmass, welches in der Regel abnimmt.

3.2.2.3 Exemplarische Durchführung des Fittings

Um die entwickelten Fittingroutinen zu veranschaulichen und ihre Leistungsfähigkeit zu bewerten, wurden exemplarisch ausgewählte Chloridprofile aus der Datenbank gefittet. Falls kein Bauwerksalter vorhanden war, wurde kein Fitting durchgeführt. Wenn hingegen das Probeentnahmedatum fehlte, aber das Baujahr bekannt war, wurde das Alter mit dem Referenzjahr 2022 für die Probenentnahme abgeschätzt.

Abbildung 14 zeigt zwölf zufällig ausgewählte Chloridprofile aus dem Datensatz zur Illustration der verwendeten Fittingroutinen. Für die Berechnung des Bestimmtheitsmasses werden jeweils sämtliche vorhandenen Datenpunkte in die Berechnung einbezogen. Die einzelnen Profile haben deutlich unterschiedliche Chloridkonzentrationen in der Nähe der Oberfläche. Die Mehrheit der Profile zeigt erwartungsgemäss einen Abfall der Chloridkonzentration in Abhängigkeit von der Tiefe. Auffällig ist besonders das Profil in der ersten Spalte in Zeile 3 (Nr.7) in Abbildung 14. Es ist eine Erhöhung der Chloridkonzentration bis einschliesslich der dritten Tiefenstufe ersichtlich, gefolgt von einem Abfall der Chloridkonzentration. Das zweite auffälligere Chloridprofil der zufälligen Auswahl ist das Profil Nr. 8. Dieses Profil weist zwei Tiefenstufen mit sehr geringen Chloridkonzentration auf. Profil Nr. 10 besteht scheinbar aus zwei identischen Werten auf unterschiedlichen Tiefenstufen. Im Folgenden werden einige dieser Profile exemplarisch gefittet mit den unterschiedlichen Anpassungsverfahren und gewichteten und ungewichteten Fitting bei der permanenten Verwendung des inneren Stützpunktes. Die Gewichtung (W) bezieht sich jeweils auf den ersten Datenpunkt des Profils und war entweder $W=1.0$ oder $W=0.2$

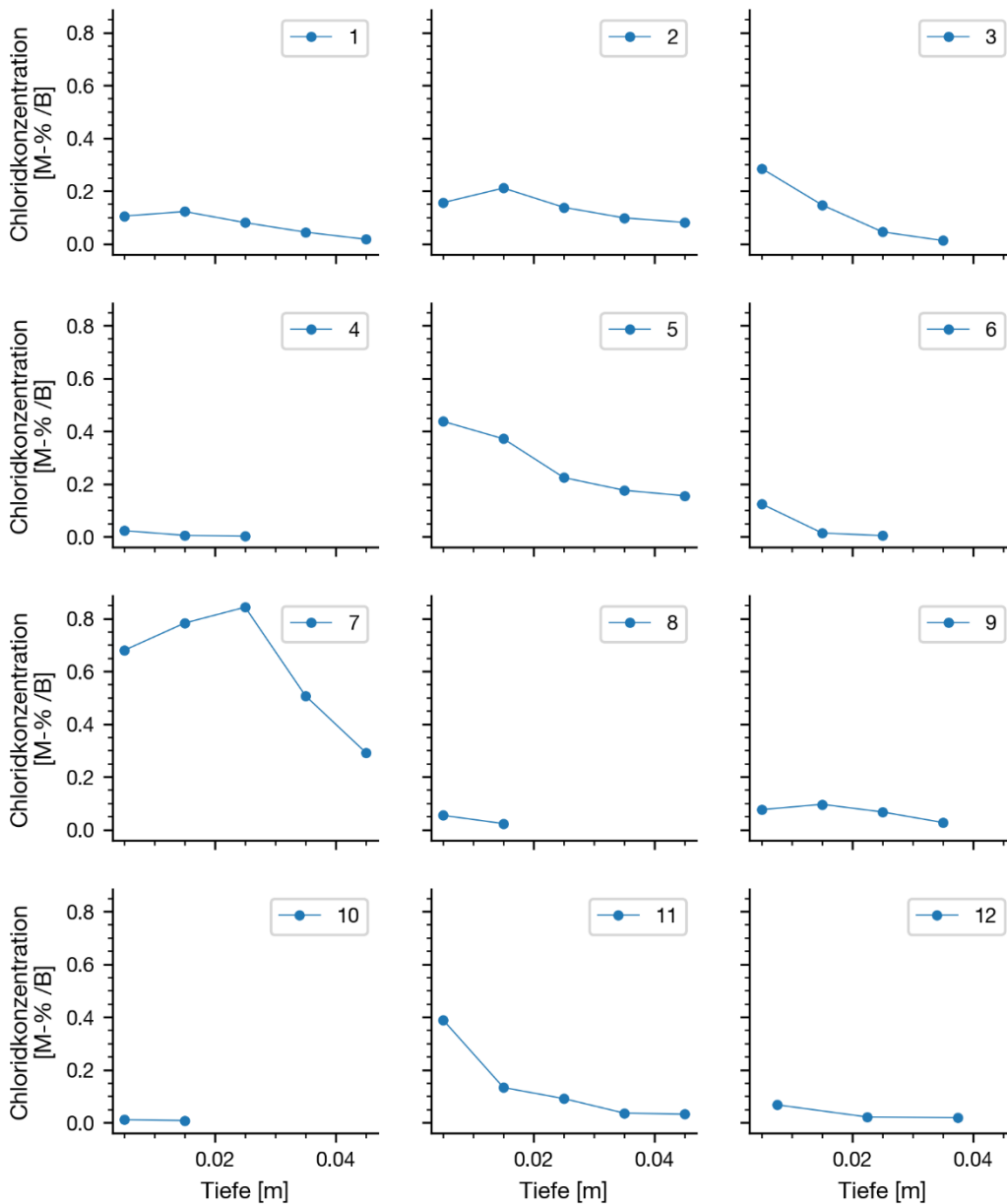


Abbildung 14: Übersicht über zwölf zufällig ausgewählte Chloridprofile in der Datenbank mit unterschiedlicher Anzahl an Tiefenstufen und Wertebereiche für die Chloridkonzentration bezüglich des Betons.

Abbildung 15 zeigt das Fitting des Chloridprofils Nr.2 bei einer unterschiedlichen Gewichtung des ersten Datenpunkts. Die Gewichtung beeinflusst die gefitteten Werte. Die Oberflächenkonzentration variiert zwischen 0.21 und 0.32 in M-%/B. und der Diffusionskoeffizient variiert ebenfalls um einen Faktor ca. 2.

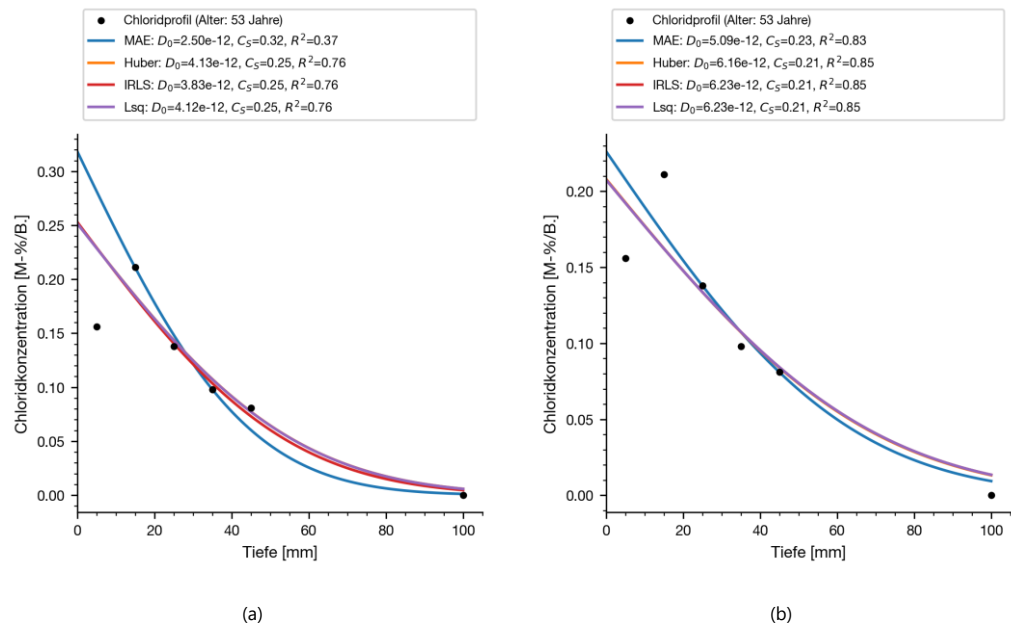


Abbildung 15: Fitting des zweiten Chloridprofils aus **Abbildung 14** in (a) mit einer Gewichtung von 0.2 für den ersten Datenpunkt und (b) mit einer Gewichtung von 1.0 für den ersten Datenpunkt.

Abbildung 16 zeigt die exemplarische die Auswertung am siebten Profil aus **Abbildung 14**. Je nach Fittingroutine und Gewichtung der einzelnen Punkte ändern sich die gefitteten Parameter erheblich. Der dritte Punkt, von der Betonoberfläche her gesehen, auf einer Tiefe von mehr als 20 mm wird in beiden Grafiken von sämtlichen Fittings von den meisten Verfahren kaum berücksichtigt. Zusätzlich ist die Chloridkonzentration an der Betonoberfläche sehr hoch mit Werten von mehr als 1 M.-%/B. Der RANSAC-Algorithmus ist in beiden Fällen nicht konvergiert und daher nicht dargestellt.

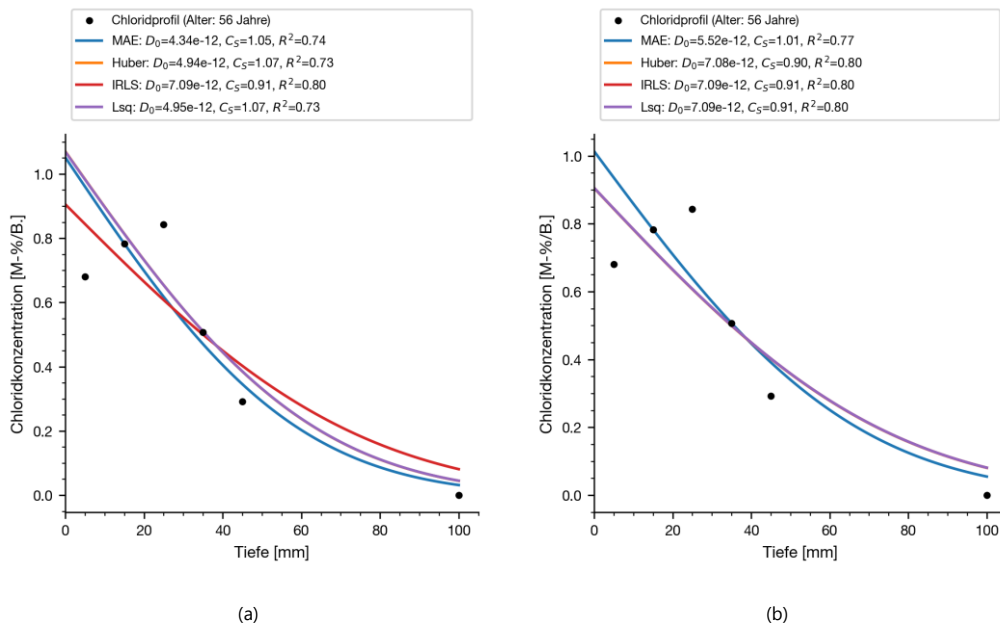


Abbildung 16: Fitting des siebten Chloridprofils aus **Abbildung 14** in (a) mit einer Gewichtung von 0.2 für den ersten Datenpunkt und (b) mit einer Gewichtung von 1.0 für den ersten Datenpunkt.

Abbildung 17 zeigt die Resultate der unterschiedlichen Vorgehensweisen an einem weiteren Beispiel. Unabhängig von der Gewichtung des Datenpunkts am nächsten an der Betonoberfläche liefern sämtliche Verfahren, ausser RANSAC (grün), dieselben Resultate. RANSAC liefert hier unterschiedliche Ergebnisse, weil ein Subsampling nur beschränkte Anzahl an Möglichkeiten bietet.

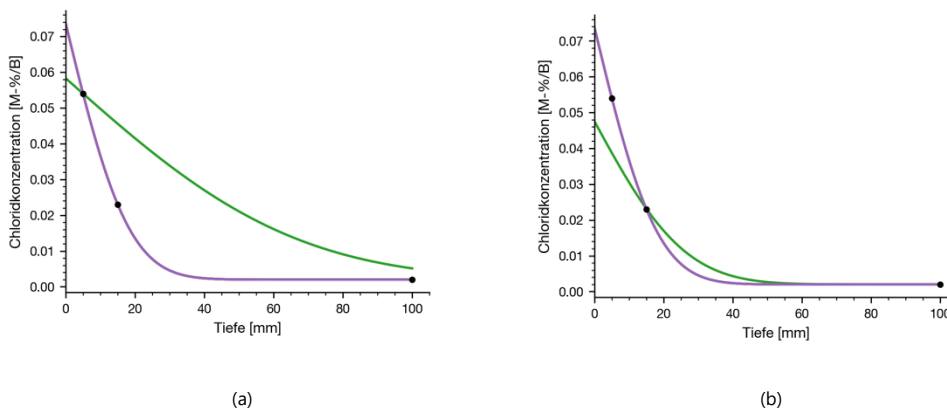


Abbildung 17: Fitting des achten Chloridprofils aus **Abbildung 14** (a) mit einer Gewichtung von 0.2 für den ersten Datenpunkt und (b) mit einer Gewichtung von 1.0 für den ersten Datenpunkt. Grün = RANSAC; Lila = alle anderen Verfahren.

Die durchgeführten Fittings in den Abbildungen (Abbildung 15, Abbildung 16, Abbildung 17) verdeutlichen, dass die ermittelten Parameter je nach Datensatz und verwendeter Fittingroutine deutlich variieren können. Da die Oberflächenchloridkonzentration als Zielvariable in den weiteren Analysen verwendet werden soll, ist eine hohe Verlässlichkeit dieses Wertes entscheidend.

Die Abweichungen der unterschiedlichen Vorgehensweisen werden im nächsten Kapitel mit einer Bewertung versehen, welche erlaubt, zu quantifizieren, wie unterschiedlich resp. verlässlich die unterschiedlichen Fittingroutinen am jeweiligen Chloridprofil sind.

3.2.2.4 Bewertung des Fittings

Es gibt 3 unterschiedliche Bewertungen für die Fittings des jeweiligen Chloridprofils und erfolgt anhand von vier unterschiedlichen Kriterien. Die dreiteilige Einstufung lautet:

- «vertrauenswürdig»
- «fraglich»
- «verwerfen».

Für die finale Einstufung werden die Abweichungen der unterschiedlichen Vorgehensweisen der Fittingroutinen mit vier unterschiedlichen Kriterien begutachtet und gewichtet. Die vier Kriterien umfassen sowohl absolute als auch relative Vergleiche.

Die finale Bewertung basiert auf:

- Genauigkeit der Anpassung am fiktiven inneren Stützpunkt
- Relative Abweichungen des Diffusionskoeffizienten der unterschiedlichen Fittingroutinen
- Relative Abweichungen des Oberflächenchloridgehaltes der unterschiedlichen Fittingroutinen
- Plausibilität des gefitteten Diffusionskoeffizienten

Das erste Kriterium überprüft für jedes Fittingresultat, wie exakt der innere Stützpunkt gefittet wird. Die Abweichung zwischen dem extrapolierten Wert auf eine Tiefe von 100 mm darf nicht grösser sein als das doppelte des Wertes der Konzentration des fiktiven Punktes auf der gleichen Tiefe. Diese Bedingung kann ebenfalls als Plausibilitätsbetrachtung angesehen werden.

Die nächsten beiden Kriterien führen einen relativen Vergleich zum Medianwert des Diffusionskoeffizienten und der Oberflächenchloridkonzentration der unterschiedlichen Fittingroutinen am gleichen Profil durch. Falls die Abweichung zwischen den einzelnen Fittings mehr als 25% vom Median am jeweiligen Chloridprofil beträgt, gilt das Kriterium für das jeweilige Fittingroutine als nicht erfüllt.

Das letzte Kriterium überprüft, ob der Diffusionskoeffizient zwischen $1 \cdot 10^{-12}$ und $30 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ liegt. Diese Grenzwerte können angenommen werden für reinen Portlandzement [28]. Auch dies ist eine Art Plausibilitätskontrolle.

Schlussendlich wird für die Bewertung der Vorgehensweise für das Profil die Summe aller erfüllten Kriterien durch die Summe sämtlicher Kriterien geteilt. Falls 75 % oder mehr erfüllt ist, wird «vertrauenswürdig» zugeordnet. Zwischen 75 % und 50 % wird «fraglich» zugeordnet und für die restlichen Fälle wird «verwerfen» zugeordnet. Für die weitere Zielverfolgung des Projektes wird der Medianwert sämtlicher Fittingroutinen verwendet.

Im Folgenden werden drei exemplarische Chloridprofile mit den drei möglichen Bewertungen dargestellt. Für die einfache Darstellung hat der Rahmen um die Parameter der Fittingroutine basierend auf der Bewertung eine andere Farbe erhalten: Grün für «vertrauenswürdig», orange für «fraglich» und «rot» für verwerfen.

Abbildung 18 zeigt die Bewertung eines Chloridprofil anhand der vier Kriterien eines beliebigen Chloridprofils mit der Bewertung «vertrauenswürdig» aus der Datenbank. Sämtliche Methoden mit der vollen Gewichtung des ersten Datenpunktes geben für diese Profil nahezu identische Werte für den Diffusionskoeffizienten und den Oberflächenchloridgehalt zurück.

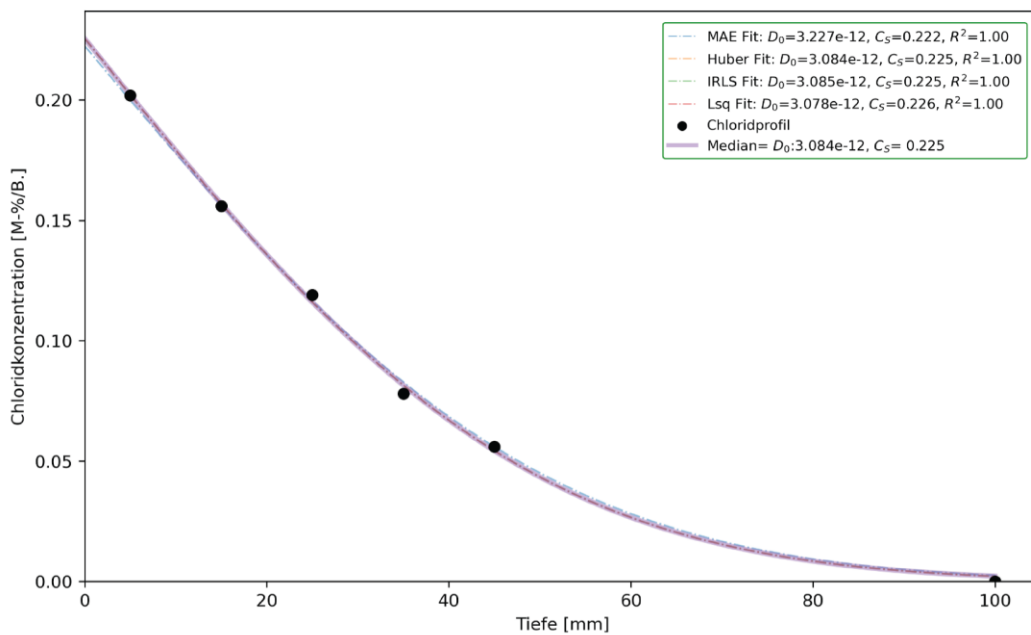


Abbildung 18: Beispiel einer Bewertung eines beliebigen Chloridprofilfittings mit der Einstufung «vertrauenswürdig» mit $W=0.2$.

Abbildung 19 zeigt die Analyse eines Chloridprofilfittings mit der Bewertung «fraglich». Die Fittings zeigen Abweichungen beim Fitten des Punktes an der Nähe der Oberfläche; dies führt zu Abweichungen bei beiden Fittingparametern. Zwei Fittings haben jedoch dieselben Werte. Als Gesamtbewertung wird in diesem Fall «fraglich» gesetzt.

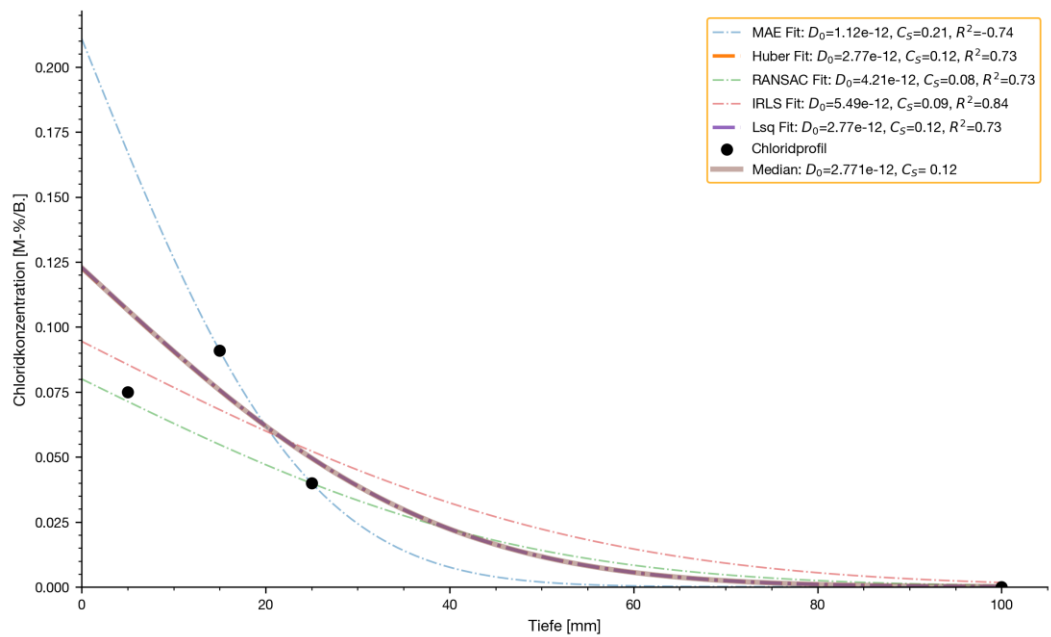


Abbildung 19: Bewertung des siebten Chloridprofils (W=0.2) mit der Bewertung «fraglich».

Die Bewertung «verwerfen» hat das Chloridprofil in Abbildung 20 erhalten. Die einzelnen Vorgehensweisen weisen deutlich voneinander ab. Es wurden zwei Gruppen gebildet, eine mit höherer Oberflächenchloridkonzentration und tieferem Diffusionskoeffizienten und eine zweite mit tieferer Oberflächenchloridkonzentration und höherem Diffusionskoeffizienten.

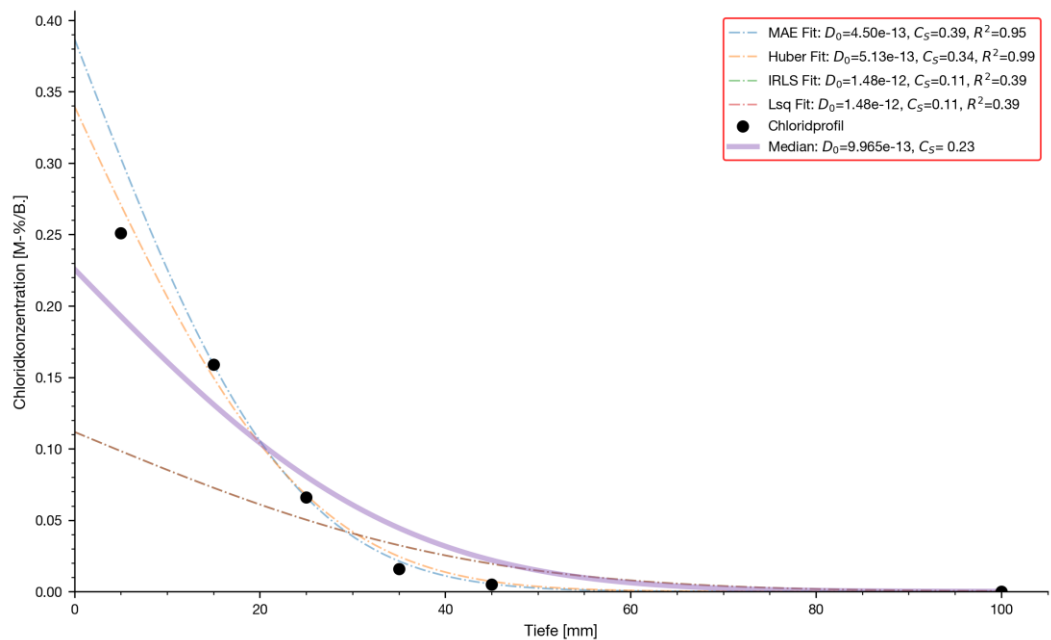


Abbildung 20: Bewertung des ersten Profils aus Abbildung 14 mit W=0.2 mit der finalen Bewertung «verwerfen».

3.2.2.5 Analyse des Fittingroutinen

Die Fittingroutinen wurden mit einer Gewichtung von 0.2 und zum Vergleich mit 1.0 am gesamten Datensatz durchgeführt. Abbildung 21 zeigt eine Gegenüberstellung des Medians der Oberflächenchloridkonzentration bei unterschiedlicher Gewichtung des ersten Messpunktes. Die Abweichungen sind im Boxplot eher als gering einzustufen. Dies kann unter anderem darauf zurückgeführt werden, dass einige Baustoffprüflabore teilweise oberflächennahe Messungen gar nicht erst durchführen, was bedeutet, dass der erste Datenpunkt in vielen Fällen fehlt.

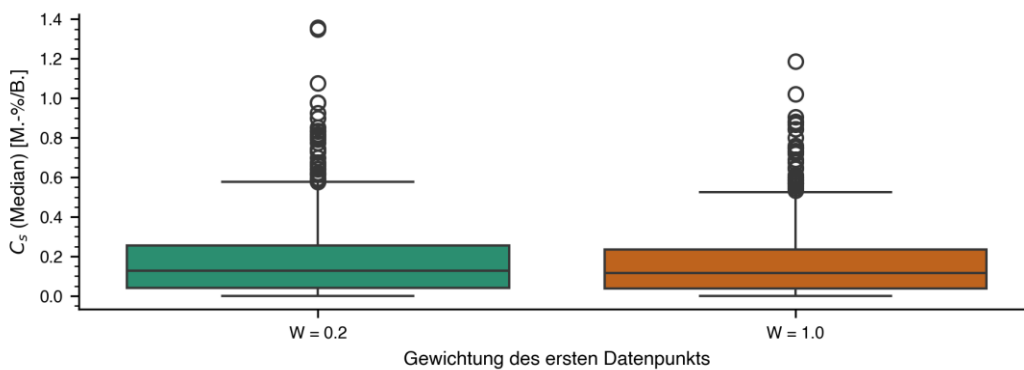


Abbildung 21: Gegenüberstellung des Medians der Fittingroutinen der Oberflächenchloridkonzentration bei unterschiedlicher Gewichtung des ersten Datenpunktes mit $W=0.2$ oder $W=1.0$.

Die Analyse der unterschiedlichen Fittingroutinen zeigen, dass der RANSAC-Algorithmus häufig nicht konvergiert. Die anderen Fittingmethoden führten in den meisten Fällen zu einem konvergierenden Resultat.

Abbildung 22 illustriert die Ergebnisse der Bewertung der Fittings, unterteilt nach den vorgeschlagenen Bewertungen mit einer Gewichtung des ersten Datenpunktes pro Profil mit 0.2: «vertrauenswürdig», «fraglich» oder «verwerfen». Es wird deutlich, dass ein Grossteil der Fittings mit «fraglich» bewertet wird. Nur ein kleiner Anteil von etwa 6% wurde verworfen.

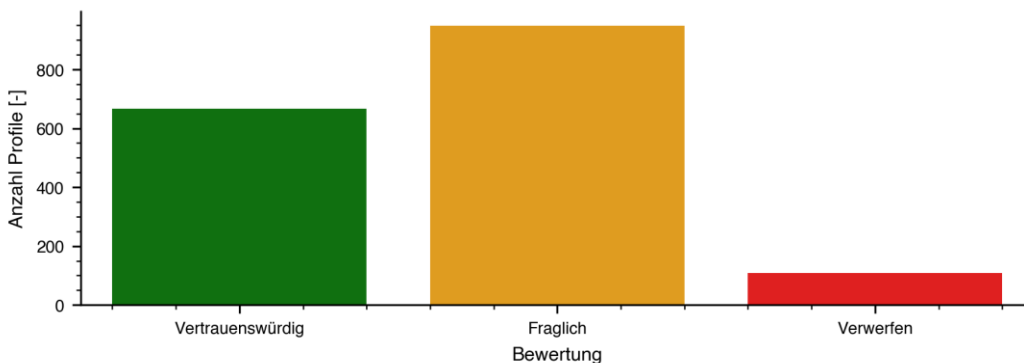


Abbildung 22: Bewertung der Fittings der Chloridprofile bei der Gewichtung des ersten Datenpunktes von 0.2.

In Abbildung 23 ist ein Fitting eines Chloridprofils dargestellt, das auf drei Datenpunkten und dem inneren Stützpunkt basiert. Obwohl sämtliche Fittingroutinen eine sehr geringe Oberflächenkonzentration aufweisen und alle Fitting-Parameter bestimmt wurden, wird dieses Profil nicht als nützlich erachtet. Der Grund dafür ist einerseits

die unrealistische Oberflächenchloridkonzentration, welche an der Begrenzung der zulässigen Bereiche der Parametervariationen innerhalb der Anpassungsroutinen sind. Das Resultat des Fittings ist ebenfalls nach innen aufsteigend.

Es wurden knapp 50 weitere Profile mit einer solch niedrigen Oberflächenchloridkonzentration festgestellt, welche für weitere Auswertung nicht berücksichtigt werden.

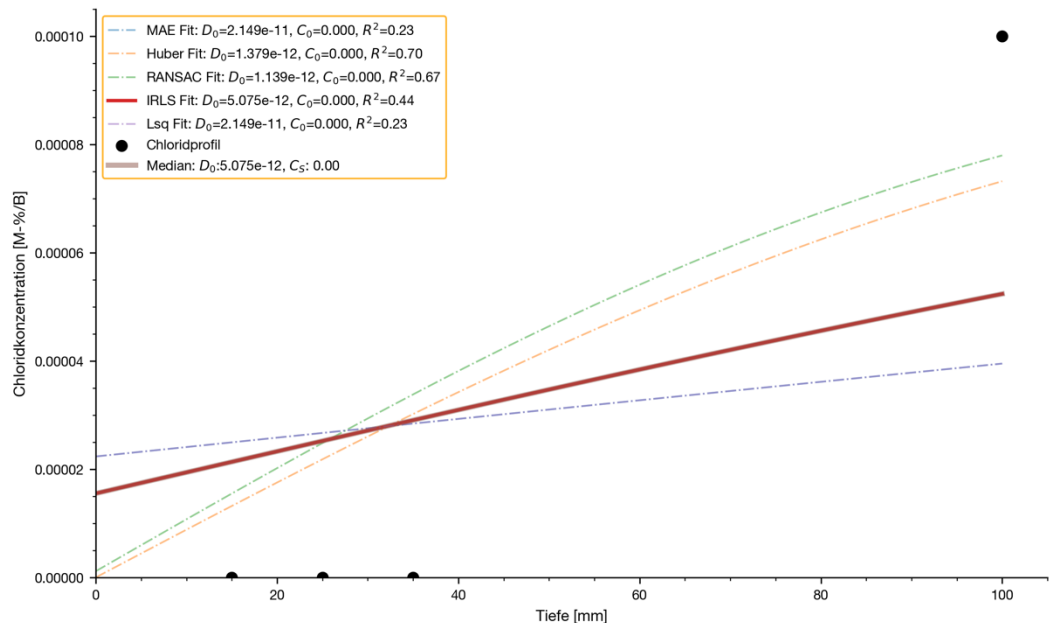


Abbildung 23: Chloridprofil mit einem Alter von 24 Jahren, ohne Abdichtung oder Oberflächenschutzsystem mit einem gemessenen Chloridgehalt unter dem Detektionslimit mit erfolgreichem Fitting mit der Bewertung «fraglich».

3.2.2.6 Bewertung der Fittingroutinen

Trotz der systematischen Entwicklung und Anwendung robuster Fittingroutinen ist das Verfahren noch nicht vollständig ausgereift. Insbesondere in Fällen mit wenigen Messpunkten oder starken Abweichungen vom idealisierten Diffusionsverhalten zeigen sich Grenzen der aktuellen Methodik des Fittings. Es besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der automatisierten Plausibilitätsprüfung, der Bewertung ungewöhnlicher Profile und deren möglichen Ausschlusses.

Für die meisten nachfolgenden Analysen wird eine Oberflächenchloridkonzentration unter 0,01 [M-%/B] als unrealistisch betrachtet und entsprechend herausgefiltert. Darüber hinaus wird für alle weiteren Auswertungen die Gewichtung des ersten Datenpunkts mit $W = 0.2$ verwendet.

Auf Grundlage der Fitting-Ergebnisse werden im Anschluss Zielvariablen für die Modellierung abgeleitet. Diese Zielvariablen bilden die notwendige Grundlage für die Entwicklung der Prognosemodelle oder möglicher Ingenieuransätze.

3.2.3 Datenauswertung

Für die weitere Datenauswertung wurden zusätzliche Einflussgrößen berücksichtigt, die potenziell einen Einfluss auf die Chlorideinwirkung haben und somit auch in einem möglichen Prognosemodell Berücksichtigung finden könnten. Diese ergänzenden

Daten betreffen meteorologische Einflüsse, Verkehrseinwirkungen sowie die gezielte Auswertung des Einsatzes von Taumitteln auf bestimmten Streckenabschnitten.

Hier soll kurz dargelegt werden, wie diese drei zusätzlichen Parameter auf die entsprechenden Chloridprofile umgelegt werden.

3.2.3.1 Meteorologische Daten

Die Daten der Neuschneehöhen (vgl. Kapitel 3.1.3.18) wurden von Meteo Schweiz übermittelt und erstrecken sich über die Zeitspanne zwischen 1950 bis 2023. Die Einheit der Daten ist definiert als die Tagessumme der Neuschneehöhe in Zentimetern, welche am Standort der jeweiligen Wettermessstationen aufgezeichnet wurde.

Mit 281 verfügbaren Wettermessstationen bildet sich ein Netz über die ganze Schweiz, welches dazu dient jedem Chloridprofil eine individuelle Wetterstation zuzuordnen. Die Zuordnung einer Wettermessstation erfolgt aufgrund der radialen Entfernung und des Höhenunterschiedes, sowie der jeweiligen Verfügbarkeit der Daten. Primär wurde versucht die nächstgelegene Wettermessstation zu berücksichtigen. Zu diesem Zweck wurde die Schweizerkarte in Voronoi-Polygone unterteilt, wobei jedes Polygon den Bereich repräsentiert, der der nächstgelegenen Wettermessstation zugeordnet ist. Diese Darstellung veranschaulicht, welche Flächen von den jeweiligen Stationen abgedeckt werden (siehe Abbildung 24).

Die Datensätze der Wettermessstationen verfügen über Lücken in der Aufzeichnung von verschiedener Länge und Häufigkeit. Um die Qualität der ausgewählten Daten in dieser Hinsicht zu verbessern, wurden drei Kriterien eingeführt. Das erste Kriterium stellt sicher, dass nur Wetterstationen mit einer Datenverfügbarkeit von mehr als 25% über den Zeitraum 1950-2023 berücksichtigt werden. Des Weiteren wurden für jedes Chloridprofil einzig Wetterstationen in einem Umkreis von 25 km und einem Höhenunterschied kleiner als 300 m Meter in Betracht gezogen. Falls keine Wetterstation innerhalb der beschriebenen Distanzen verfügbar war, wurde kein Wert zugewiesen und die Wetterdaten des entsprechenden Chloridprofils als leer markiert. Falls mehrere Wetterstationen vorhanden waren, jedoch alle mit weniger als 25% Datenverfügbarkeit, so wurde wiederum die nächstgelegene Wetterstation zugeordnet.

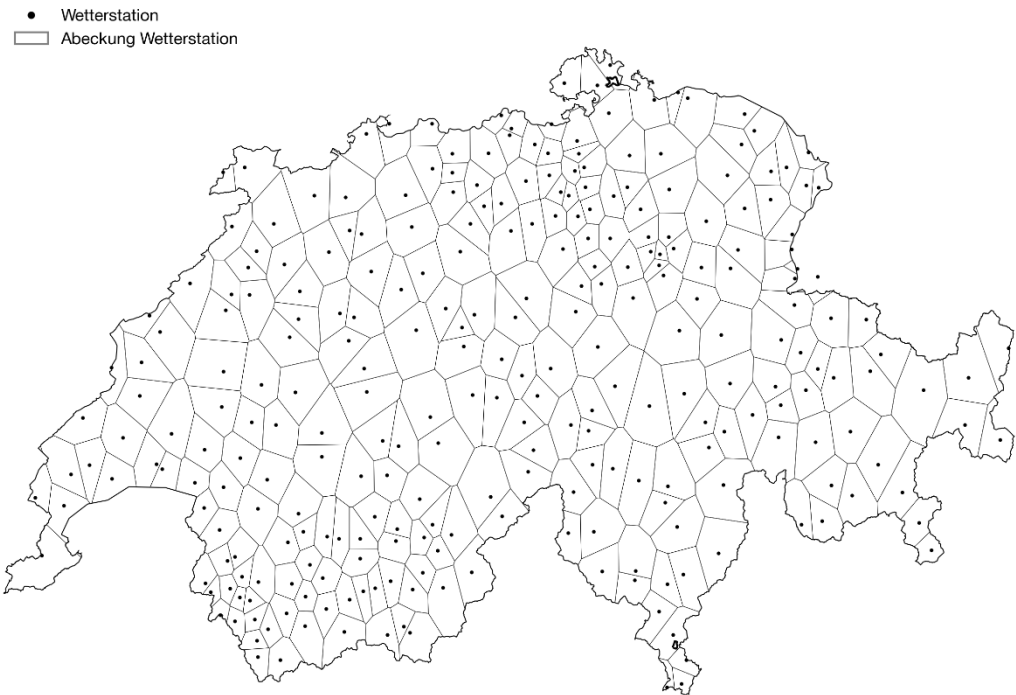


Abbildung 24: Die Schweizerkarte ist in Voronoi-Polygone unterteilt, wobei jedes Polygon den Bereich repräsentiert, der der nächstgelegenen Wettermessstation zugeordnet ist. Diese Darstellung veranschaulicht, welche Flächen von den jeweiligen Stationen abgedeckt werden.

Von den 281 Wetterstationen wurden somit 41 auf die einzelnen Chloridprofile zugeordnet, dessen durchschnittliche Datenverfügbarkeit über den Untersuchungszeitraum 61% betrug. Die zugeordneten Wettermessstationen sind in Abbildung 25 eingezeichnet. Für 246 Chloridprofile konnte aufgrund der eingeführten geometrischen Randbedingungen keine Zuordnung getroffen werden. Weitere 131 Chloridprofile hatten innerhalb der geometrischen Randbedingungen keine Wetterstation mit mehr als 25% Datenverfügbarkeit, weshalb eine tiefere Datenverfügbarkeit akzeptiert wurde. Gesamthaft wurden 85,6% der Chloridprofile Wetterdaten zugewiesen, welche nach den eingeführten Kriterien möglichst repräsentativ sein sollten. Diese Zuordnung wird somit als gut eingestuft.

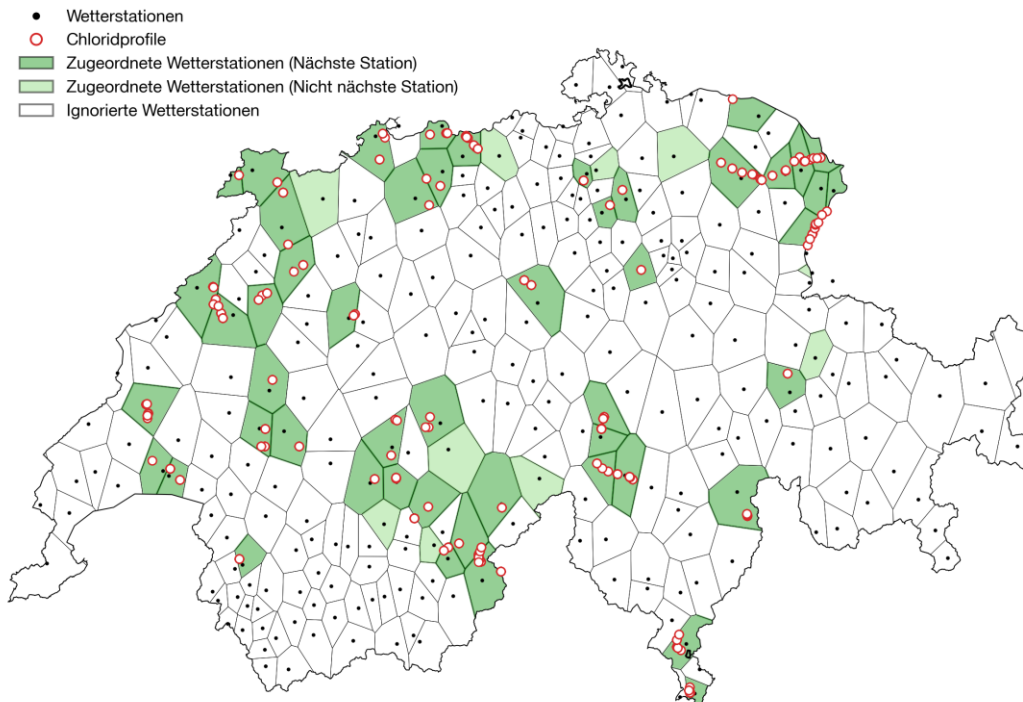


Abbildung 25: Zuordnung der Wetterstationen auf die einzelnen Chloridprofile anhand von Kriterien bezüglich der Höhendifferenz und Distanz zwischen Entnahmeort des entsprechenden Profils, als auch Datenverfügbarkeit über den Untersuchungszeitraum.

3.2.3.2 Verkehrsdaten

Analog zur Vorgehensweise bei den meteorologischen Daten (vgl. Kapitel 3.2.3.1) wurden auch für die Verkehrsdaten jedem Chloridprofil eine Zählstation zugeteilt. Die Zuordnung erfolgte jedoch nur nach minimaler radialer Distanz, wobei Messstationen mit weniger als 50 % Datenverfügbarkeit über die betrachtete Zeitspanne ausgeschlossen wurden. Somit konnten alle Chloridprofile einer Zählstation zugeordnet werden.

Die Zuordnung des Durchschnittlichen Tagesverkehrs (DTV) zu den Chloridprofilen ist in Abbildung 26 dargestellt. Zusätzlich wurde differenziert, ob die Chloridprofile an Nationalstrassen über den Parameter «Strassenart» der Datenbank liegen oder nicht, was in der Abbildung durch unterschiedlich farbige Symbole in der Grafik gekennzeichnet ist. Wie in Abbildung 26 qualitativ zu sehen ist die Zuordnung der 1171 Chloridprofile an Nationalstrassen sehr gut. Hingegen ist für die 519 Chloridprofile, welche nicht an Nationalstrassen sind, die Zuordnung als weniger gut einzustufen.

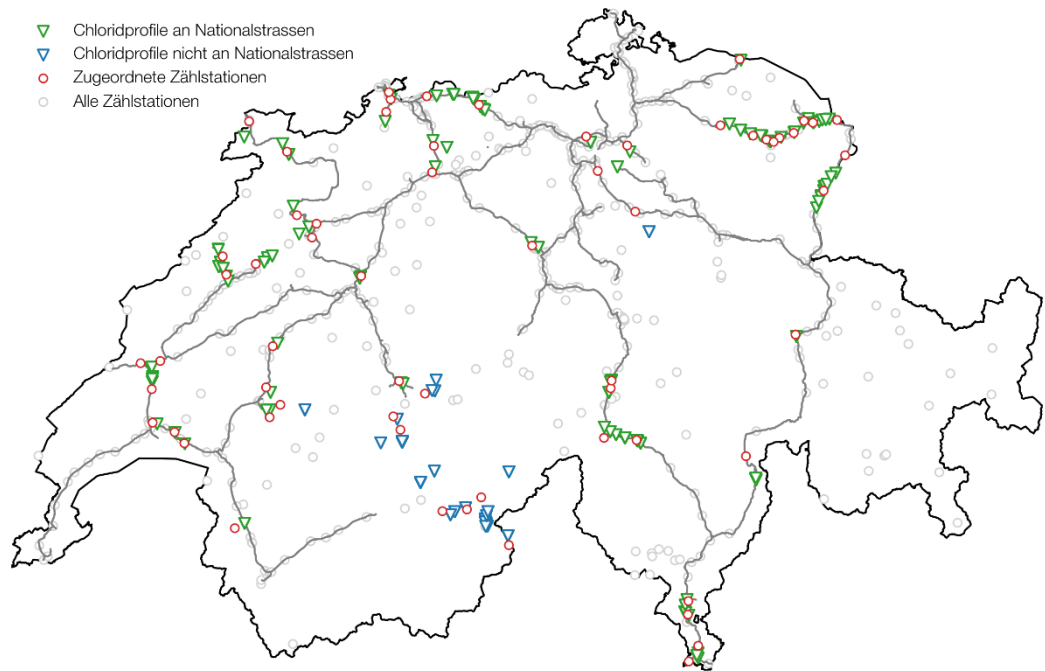


Abbildung 26: Zuordnung der SASVZ Zählstationen auf die Chloridprofile mit Differenzierung bezüglich Lage zu Nationalstrassen.

3.2.3.3 Streusalzeinsatz auf ausgewählten Strecken

Für die eingezeichnete Region in Abbildung 8 sind die Streumengen für Tausalz und Sole für 17 Streckenabschnitte gegeben. Die Daten sind pro Streckenabschnitt gegeben (siehe Abbildung 27) und über die Zeitspanne 2019 bis 2024 bekannt. Übermittelt wurde die Gesamtmasse des Tausalzes und der Sole, sowie die Fahr-, respektive Streukilometer pro Jahr. Über die gesamte Messperiode wurde somit der Mittelwert der Streumenge (in Tonnen) pro Kilometer Strasse berechnet.

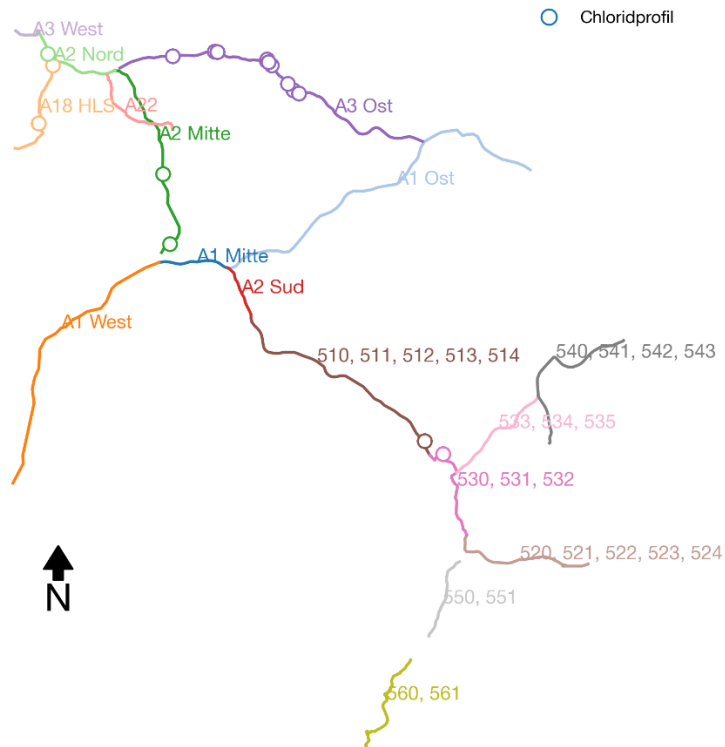


Abbildung 27: Illustration des Layouts der Strassen mit verfügbaren Tausalzdaten und Zuordnung der Chloridprofile.

In Abbildung 28 sind die Mittelwerte pro Streckenabschnitt über die Messzeit illustriert. Der Mittelwert der Tausalzbeaufschlagung schwankt, je nach Streckenabschnitt, um einen Faktor von 2. Im Mittel wurden rund 60 Kilogramm Taumittel pro Fahrkilometer pro Saison aufgebracht.

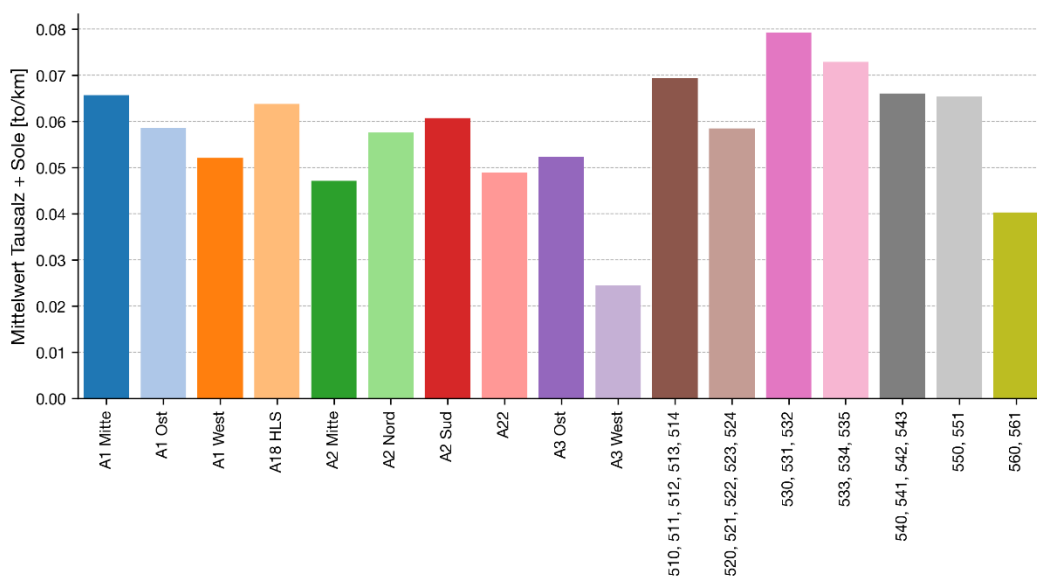


Abbildung 28: Mittelwert über den Betrachtungszeitraum der Tausalz- und Sole-Mengen für die Strassenabschnitte in Tonnen pro Kilometer pro Saison.

Nachdem die Tausalzdaten ermittelt wurden, wurden die Chloridprofile den Streckenabschnitten zugeordnet. Insgesamt sind an den Streckenabschnitten mit verfügbaren Tausalzdaten 140 Chloridprofile vorhanden, welche an sieben unterschiedlichen Streckenabschnitten liegen (siehe Abbildung 29). Die Streckenabschnitte mit den jeweilig zugeordneten Chloridprofilen können ebenfalls in Abbildung 27 gesehen werden.

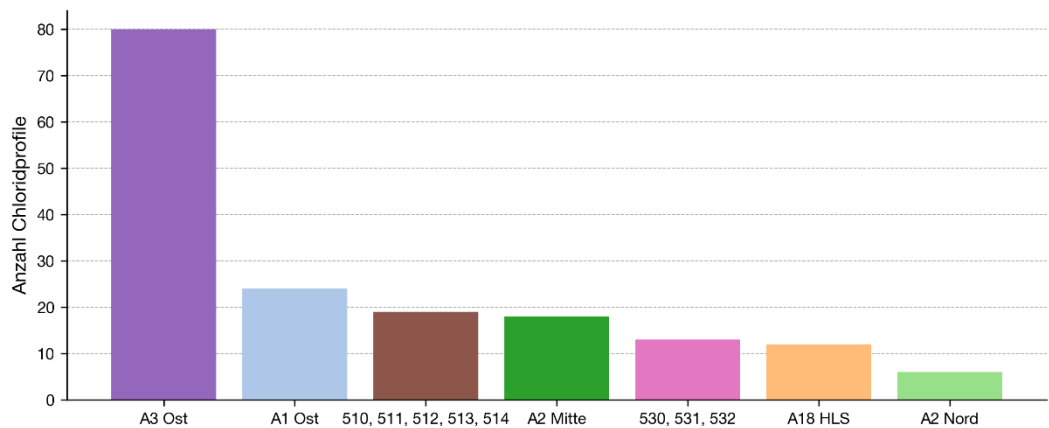


Abbildung 29: Anzahl der zugeordneten Chloridprofile pro Streckenabschnitt.

3.2.4 Datenanalyse

3.2.4.1 Datenvorbereitung

Vor der detaillierten Analyse wurde die Datenbank einer ersten systematischen Aufbereitung unterzogen (vgl. Kapitel 3.2.1). Dies umfasste Bereinigung der Einträge und Aufbereitung der Datenformate. Für die weitere Auswertung wurden Parameter mit grösserer Datenverfügbarkeit und Relevanz (vgl. Kapitel o) für die weitere Analyse priorisiert. Da viele Algorithmen keine fehlenden Werte tolerieren, wurden geeignete Imputationsstrategien (z. B. Median, KNN) eingesetzt.

Betreffend die Typen der Parameter waren sowohl kontinuierliche (z. B. Chloridkonzentration im Profil, w/z-Wert), diskrete (z. B. Baujahr, Verkehrsbelastung) als auch kategoriale Merkmale vorhanden. Kategoriale Variablen können sowohl ohne Ordnung (nominal, z. B. Bauwerksart, Messverfahren) oder mit Ordnung (ordinal, z. B. Expositionsklasse, Zustand des Oberflächenschutzsystems) vorkommen.

Tabelle 5 gibt einen Überblick über die in Kapitel 3.1.2 detailliert beschriebenen Parameter und deren Zuordnung zu den jeweiligen Variablentypen.

Datenbank Zuordnung

Parameter	Art der Variable
Chloridprofil	Kontinuierlich
Probeentnahme Datum	Diskret
Messverfahren	Kategorial (nominal)
Art der Probenentnahme	Kategorial (nominal)
Bemerkung (Chloridprofil)	Kategorial (nominal)
Bauwerksart	Kategorial (nominal)
Bauwerksteil	Kategorial (nominal)
Bemerkung (Bauwerk & Exposition)	Kategorial (nominal)
Baujahr (Mittelwert)	Diskret
Höhe über Meer	Diskret
Koordinaten	Diskret
Bewittert	Kategorial (nominal)
Orientierung der Exposition	Kategorial (nominal)
Distanz zur Chloridquelle (horizontal)	Diskret
Höhe über OK Fahrbahn	Diskret
Strassenart	Kategorial (nominal)
Durchfahrtsgeschwindigkeit	Diskret
Verkehrsbelastung (z. B. DTV)	Diskret
Meteorologische Daten (Neuschneehöhe)	Kontinuierlich
Himmelsrichtung (Orientierung der Fläche)	Kategorial (nominal)
Winkel relativ zur Vertikalen	Diskret
Neigung des Bauwerksteils im Grundriss zur Fahrspur	Diskret
Exposition nach Norm (XC)	Kategorial (ordinal)
Exposition nach Norm (XD)	Kategorial (ordinal)
Längsneigung	Diskret
Verkehrsregime	Kategorial (nominal)
Distanz zum Portal	Diskret
Weitere Bemerkungen (Bauwerk & Exposition)	Kategorial (nominal)
Oberflächenschutzsystem	Kategorial (nominal)
Bemerkungen zum OS	Kategorial (ordinal)
Abdichtungssystem	Kategorial (nominal)
Bemerkungen zum Abdichtungssystem	Kategorial (ordinal)
Betondruckfestigkeit	Kontinuierlich
Haftzugfestigkeit	Kontinuierlich
Zementart nach Norm (nach Plan)	Kategorial (nominal)
Zementgehalt nach Plan	Diskret
w/z- Wert	Kontinuierlich
Weitere Betoneigenschaften	Kategorial (nominal)
Betonüberdeckung nach Plan	Diskret
Betonüberdeckung gemessen Mittelwert	Diskret
Betonüberdeckung gemessen St.-abw.	Kontinuierlich
Karbonatisierungstiefe Mittelwert	Diskret
Karbonatisierungstiefe Minimal	Diskret
Karbonatisierungstiefe Maximal	Diskret

Tabelle 5: Zuordnung der in der Datenbank erfassten Parameter zu ihren jeweiligen Variablentypen.

Zur möglichen Verbesserung der Modellgüte können numerische Variablen einheitlich oder individuell skaliert bzw. normiert werden. Kategoriale Merkmale, wie der Bauwerkstyp oder die Expositionsklasse, wurden mittels One-Hot-Encoding oder Label-Encoding nach Möglichkeit in numerische Form überführt, um ihre Verarbeitung in unterschiedlichen Modellen zu ermöglichen.

Zum Auffüllen fehlender Werte in der Datenbank für weitergehende Analysen wurden je nach Art der Daten unterschiedliche Imputationsverfahren angewendet:

- Kontinuierliche Variablen: Mittelwert, Median- oder KNN (K-Nearest-Neighbors)-Imputation
- Kategoriale Variablen: häufigster Eintrag oder konstanter Platzhalter

Weitere Methoden wie lineare Interpolation basierend auf anderen Variablen oder manuelle Ergänzung durch Expertenwissen sind grundsätzlich möglich, jedoch mit höherem Aufwand verbunden.

Ein Beispiel für die numerische Umwandlung kategorialer Merkmale ist die Umwandlung des Merkmals „Bauwerksart“ in mehrere binäre Variablen mittels des sogenannten One-Hot-Encoding. So werden die verschiedenen Bauwerksarten wie Brücke, Galerie, Stützmauer oder Tunnel in jeweils eigene Spalten überführt, in denen die Zugehörigkeit mit 0 oder 1 codiert wird. Diese Transformation erlaubt eine gleichwertige und modellkompatible Berücksichtigung ohne künstliche Reihenfolge der Kategorien der nominalen kategorischen Variable (Tabelle 5). Dies erhöht jedoch die Anzahl der Variablen im Modell, in diesem Beispiel von 1 auf 5.

Beispiel				
Bauwerksart	Bauwerks- art_Brücke	Bauwerks- art_Galerie	Bauwerks- art_Stützmauer	Bauwerks- art_Tunnel
Brücke	1	0	0	0
Galerie	0	1	0	0
Tunnel	0	0	0	1

Tabelle 6: Beispielhafte One-Hot-Encoding des Merkmals „Bauwerksart“.

Ein weiteres Beispiel ist das Label-Encoding des Merkmals „Exposition nach Norm (XC)“. Die Expositionsklassen weisen eine natürliche Reihenfolge bezüglich der Beanspruchung auf. Diese wurden entsprechend ihrer Intensität numerisch codiert, z. B.: XC1 zu 1, XC2 zu 2, XC3 zu 3 und XC4 zu 4.

3.2.4.2 Zielvariablen für das überwachte Lernen

Für die spätere Datenanalyse, -auswertung und Modellgenerierung wurden sogenannte Zielvariablen definiert. Zielvariablen sind Werte, die im Rahmen der spezifischen Fragestellung prognostiziert werden sollen. Für die Verwendung von Verfahren des überwachten Lernens ist das Vorhandensein einer klar definierten Zielvariablen erforderlich. Im vorliegenden Projekt sind mehrere Optionen möglich.

Für die Modellierung von Chlorideintrag mit Gleichung (4) und im Kontext dieses Forschungsprojekts steht der Oberflächenchloridgehalt C_s als Zielvariable im Zentrum. Es

sei erwähnt, dass dies jedoch in der Praxis messtechnisch nur sehr schwer zu ermitteln ist. Gründe dafür sind einerseits die beschränkte Messauflösung, namentlich, dass Betonmehlproben kaum aus nahezu unendlich dünnen Betonschichten entnommen werden können und somit immer ein über eine gewisse Tiefe gemittelter Wert gemessen wird; andererseits spielen andere Effekte in der Konvektionszone (siehe Kapitel 1) wie oberflächennahe Karbonatisierung des Betons und Auswaschung von Chloriden eine Rolle. Daher kann C_s auf Tiefe $x=0$ mm nur durch Extrapolation bzw. Fitten von gemessenen Chloridprofilen ermittelt werden. Es bleibt sodann ein hypothetischer Wert, der – aus vorangehend genannten Gründen – mit Messwerten aus der Praxis in vielen Fällen nicht validiert werden kann.

Alternativ kann aus dem Fitten von gemessenen Chloridprofilen eine Chloridkonzentration auf einer Tiefe $x>0$ ermittelt werden. Hierbei können Tiefenstufen gewählt werden, welche nach wie vor oberflächennah sind, sich aber in einem Bereich befinden, der oft bereits die Effekte der Konvektionszone überwunden hat. In vielen Fällen dürfte dies auf einer Tiefe von 20-40 mm der Fall sein.

Die Verwendung des mithilfe der aus den Fittings erhaltenen Parameter C_s und D_o prognostizierten Chloridgehaltes auf einer gewissen Tiefe, etwa $x = 20$ mm, birgt jedoch ebenfalls Herausforderungen. Einerseits ist der so prognostizierte Oberflächenchloridgehalt stark von einzelnen Messwerten im Bereich geringer Überdeckungen beeinflusst. Andererseits weisen die erfassten Bauwerke unterschiedliche Baujahre und somit unterschiedliche Expositionsdauern auf, was die Vergleichbarkeit von Chloridprofilen beeinträchtigt. Daher wurde entschieden, zusätzlich die Chloridkonzentration rechnerisch auf ein einheitliches Referenzjahr zurückzurechnen. Dies kann mithilfe von Gleichung 4 direkt erfolgen, sobald aus den Fittings die entsprechenden Parameter, namentlich C_s und D_o , vorliegen.

Im Rahmen dieses Projekts wurden Zielvariablen wie folgt verwendet:

- die Oberflächenchloridkonzentration C_s auf Tiefe $x=0$ mm (als Medianwert der Fittingverfahren)
- der Maximalwert des gemessenen Chloridprofils (dieser kann in verschiedenen Tiefen auftreten, je nach Ausprägung der Konvektionszone im betreffenden Chloridprofil)
- die Chloridkonzentration in definierten Tiefen (z. B. 20 mm oder 30 mm) und zu einer definierten Zeit. Diese Werte wurden mithilfe der Fittingparameter auf verschiedene zeitliche Referenzjahre (25, 50 und 75 Jahre) interpoliert oder extrapoliert, wobei jeweils der Median der entsprechenden Chloridkonzentration aus den Fittingroutinen für die jeweilige Modellierung über die Zeit herangezogen wurde.

Tabelle 7 zeigt eine vollständige Übersicht über die damit acht verwendeten Zielvariablen.

Zielvariablen

Nummer	Zielvariable
1	Median der Oberflächenchloridkonzentration C_s auf Tiefe $x = 0$ mm aus der Fittingroutinen
2	Maximalwert des gemessenen Chloridprofils
3	Chloridkonzentration auf einer bestimmten Tiefe zu einem bestimmten Zeitpunkt, ermittelt aufgrund des Profilfittings und mithilfe des Diffusionsgesetzes (Gleichung (4))
3.1	Chloridkonzentration bei $x = 20$ mm, $t = 25$ Jahre
3.2	Chloridkonzentration bei $x = 20$ mm, $t = 50$ Jahre
3.3	Chloridkonzentration bei $x = 20$ mm, $t = 75$ Jahre
3.4	Chloridkonzentration bei $x = 30$ mm, $t = 25$ Jahre
3.5	Chloridkonzentration bei $x = 30$ mm, $t = 50$ Jahre
3.6	Chloridkonzentration bei $x = 30$ mm, $t = 75$ Jahre

Tabelle 7: Übersicht über Zielvariablen.

3.2.4.3 Zielsetzung der Datenanalyse

Ein Ziel der vorliegenden Datenanalyse ist nach Möglichkeit die Identifikation jener Einflussfaktoren, welche die Chlorideinwirkung auf Stahlbetontragwerke massgeblich bestimmen. Auf Basis der in Kapitel 3.1 beschriebenen Datenbank sollen statistisch abgesicherte Aussagen sowie ein praxistaugliches Prognosemodell erarbeitet werden. Die Datenanalyse erfolgt unter Einbezug datengetriebener Verfahren sowie des Erfahrungswissens aus der Ingenieurpraxis.

Der vorliegende Datensatz wird mit mehreren verschiedenen Methoden ausgewertet. Die Datenanalyse erfolgt über maschinelles Lernen und den Input oder Abgleich von Expertenwissen. So soll ein robustes Modell entstehen, das sowohl datengetriebene Erkenntnisse als auch ingenieurpraktische Erfahrung vereint.

3.2.4.4 Methodisches Vorgehen

Das methodische Vorgehen verfolgt zwei unterschiedliche Ansätze. Einerseits kommen klassische statistische Verfahren sowie Methoden des überwachten maschinellen Lernens zur Anwendung. Andererseits wird das vorhandene Expertenwissen systematisch erfasst und nach Möglichkeit integriert, um die Ergebnisse einerseits im Hinblick auf die Erfahrungen der Experten zu plausibilisieren und zugleich mit der langjährigen Erfahrung aus zahlreichen Zustandserfassungen abzugleichen.

Für die erste Abschätzung der Modellgüte wurden verschiedene Grundmodelle ohne Kreuzvalidierung mit standardisierten, aber bereits erweiterten Datensätzen (inkl. Feature Engineering (vgl. Kapitel 3.2.4.5)) trainiert. Die Auswahl der Modelle umfasst lineare Verfahren (Lineare Regression, Ridge, Lasso), k-Nächste Nachbarn, baumbasierte Modelle (Entscheidungsbaum, Zufallswald), Ensembleverfahren (Gradient Boosting, XGBoost) als auch den HistGradientBoostingRegressor. Die Modellgüte erfolgt anhand des Bestimmtheitsmasses über sämtliche Zielvariablen. Anschliessend sollen Modelle mit höheren Bestimmtheitsmassen detaillierter optimiert und untersucht werden und weiteren Metriken interpretiert werden (siehe auch Kapitel 3.2.4.7).

Neben den Modellen kann bei Bedarf ebenfalls der Datensatz in Subdatensätze unterteilt werden. Die Datensätze können differenziert unterteilt werden, indem beispielsweise berücksichtigt wird, ob die Bauteile ähnlichen Expositionsbedingungen ausgesetzt sind, oder nach spezifischen Parametern aus der Datenbank, wie etwa der Bauwerks- oder Bauteilart. Gegebenenfalls sollten Datenbankeinträge ausgeschlossen werden, die bestimmte Voraussetzungen nicht erfüllen, beispielsweise solche, die potenziell unter einer Abdichtung oder Oberflächenschutzsystem lagen. Dabei ist zu beachten, dass die Subdatensätze nicht zu wenige Einträge aufweisen sollten, da Korrelationen von Einträgen entnommen am selben Bauwerk a-priori nicht ausgeschlossen werden können oder das Modell hinsichtlich des späteren Einsatzes zu spezifisch wird.

3.2.4.5 Feature Engineering

Im Rahmen des sogenannten Feature Engineerings können weitere Parameter ergänzt werden, indem bestehende Größen rechnerisch miteinander kombiniert oder gezielt transformiert werden. Dies umfasst beispielsweise lineare Kombination wie Skalierung, Multiplikation oder Division vorhandener Parameter. Ergänzend können nicht-lineare Umformungen wie Logarithmus-, Wurzel- oder Potenzfunktionen angewendet werden, um den Wertebereich anzupassen oder spezifische Zusammenhänge hervorzuheben. Ebenso ist die Bildung von Interaktionsparametern möglich, welche durch Kombination mehrerer Variablen entstehen und zur Verbesserung der Modellgenauigkeit beitragen können.

Während des Feature Engineering wurden mit dem Open Source Tool «Feature Tools» [55] neue Features generiert, indem automatische Feature Engineerings durchgeführt wurden. Dabei entstanden aus den vorhandenen numerischen und kategorischen Variablen neue erklärende Variablen. Zu diesem Zweck wurden gezielte Transformationen wie Multiplikation, Division, Betragsbildung und Perzentilbildung sowie logische Operationen wie Grösseres oder Ungleich angewendet.

Vor dem Feature Engineering wurden fehlende Werte in zwei Varianten behandelt: Einerseits wurden sie durch Median-Füllung bei numerischen und der jeweils häufigste Wert bei kategorialen Merkmalen ergänzt, andererseits wurden die Lücken bewusst als Lücken belassen, so dass die neuen Features nur auf existierenden Werten in der Datenbank basieren. In beiden Fällen erfolgte abschliessend die Berechnung der Korrelationen der numerischen Features mit den Zielvariablen.

3.2.4.6 Modellselektion und Trainingsstrategie

Mit Blick auf die praktische Anwendbarkeit des angestrebten Prognosemodells wurde besonders auf die Nachvollziehbarkeit der Modellstruktur sowie auf die Interpretation des Modells geachtet (vgl. auch Kapitel 3.2.4.3). Daher werden erklärbare Modelltypen wie Entscheidungsbäume und lineare Regressionsverfahren bevorzugt, während beispielsweise Neuronale Netze aufgrund ihrer “black box” Eigenschaften eher zurückgestellt wurden.

Zur Absicherung der Modellgüte wurden eine fünffache Kreuzvalidierung, eine Hyperparameteroptimierung (mittels Optuna [56]) sowie eine systematische Prüfung von Datenimputationsmethoden und Zielvariablentransformationen durchgeführt. In einem weiteren Schritt wurden ergänzend auch komplexere Modelle wie

HistGradientBoostingRegressor oder Neuronale Netzwerke betrachtet. Diese dienen jedoch primär dem Leistungsvergleich und nicht als Grundlage für ein in der Praxis einsetzbares Ingenieurmodell.

Ein Beispiel für ein besonders einfach zu interpretierbares Modell stellt der Entscheidungsbaum dar. Dieser besteht aus einer Baumstruktur mit einem Wurzelknoten, mehreren Entscheidungsknoten und Blattknoten, in denen die finalen Vorhersagen erfolgen. Die Modellstruktur wird entscheidend durch die Hyperparameter dieses Modells gesteuert. In Scikit-learn [57] stehen hierzu mehrere Steuergrößen zur Verfügung, die im Rahmen der Modellanpassung über eine Optimierung (z. B. mit Optuna [56]) variiert wurden. Zu den Hyperparametern zählen beispielsweise:

- die maximale Tiefe des Baumes
- die minimale Anzahl an Stichproben zur Teilung eines Knotens
- die minimale Anzahl an Stichproben in einem Blattknoten
- das verwendete Kriterium zur Bestimmung der Aufspaltung am Entscheidungsknoten.

Diese Parameter beeinflussen wesentlich die Balance zwischen Überanpassung (Overfitting) und Generalisierungsfähigkeit des Modelles. Abbildung 30 zeigt den schematischen Aufbau und die einzelnen Bestandteile (Wurzelknoten, Entscheidungsknoten und Blattknoten) eines solchen Entscheidungsbaumes.

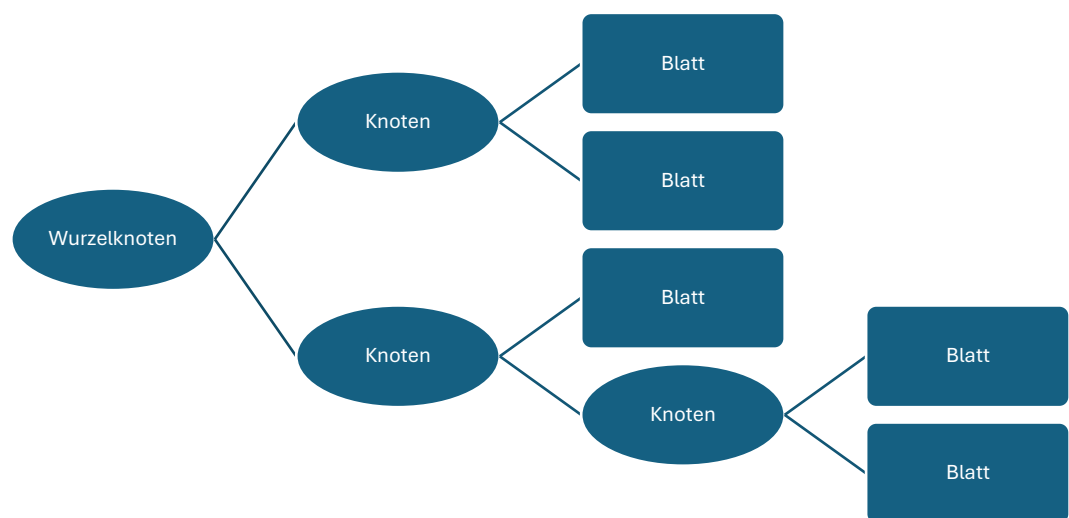


Abbildung 30: Aufbau und Bestandteile eines Entscheidungsbaumes mit 5 Blattknoten und 3 (Entscheidungs-)Knoten und dem Wurzelknoten.

3.2.4.7 Fehlermetriken

Zur Beurteilung der Prognosequalität wurden verschiedene Fehlermaße eingesetzt, die unterschiedliche Aspekte der Abweichung zwischen Modellvorhersage und beobachtetem Wert erfassen, vgl. Tabelle 8. Der mittlere absolute Fehler (MAE) wurde als robuste Kennzahl verwendet, da er unabhängig von der Vorzeichenrichtung des Fehlers ist und direkt die durchschnittliche Abweichung beschreibt. Ergänzend wurde

der mittlere quadratische Fehler (MSE) sowie dessen Quadratwurzel, der RMSE, als Mass für grössere Abweichungen eingesetzt.

Um die Vergleichbarkeit über Zielvariablen mit unterschiedlichen Grössenordnungen zu verbessern, wurde der mittlere absolute prozentuale Fehler (MAPE) berechnet, welcher die Fehlerwerte relativ zum beobachteten Wert normiert. Zusätzlich kam der symmetrische mittlere absolute prozentuale Fehler (SMAPE) zum Einsatz, der eine skalierungsunabhängige Bewertung der Modellgüte erlaubt und insbesondere bei Werten nahe null robuster reagiert als der MAPE.

Fehlermetriken					
Metrik	Beschreibung	Einheit	Vorteil(e)	Nachteile	Typische Werte
MAE	Ø absoluter Fehler	Wie Zielgrösse	Intuitiv, robust gegen Ausreisser	Fehler gleich gewichtet, grosse Fehler werden nicht stärker gewichtet	0–∞
MSE	Ø quadratischer Fehler	Quadrat der Einheit	Bestraft grosse Fehler stark	Nicht intuitiv interpretierbar, anfällig für Ausreisser	0–∞
RMSE	Wurzel aus MSE	Wie Zielgrösse	Betonung grosser Fehler, besser lesbar da Einheit mit Zielgrösse übereinstimmt	Sensibel gegenüber Ausreisser	0–∞
MAPE	Ø absoluter Fehler des gemessenen Werts	Ohne Einheit oder Prozent	Vergleich über Skalen hinweg möglich	Nicht definiert oder instabil bei Zielwerten nahe 0	0–1+
SMAPE	Symmetrische MAPE	Ohne Einheit oder Prozent	Kein Problem bei kleinen Werten	Weniger intuitiv, Interpretation komplex (max. 2)	0–2

Tabelle 8: Übersicht über Fehlermetriken.

3.2.4.8 Ergebnisinterpretation, Analyse der Modellgüte

Die resultierenden Modelle wurden anhand des Bestimmtheitsmasses (R^2) sowie über die Analyse der relativen Bedeutung der einzelnen Einflussgrössen (Feature Importance) beurteilt als auch über die weiteren Fehlermetriken. Es ist dabei zu beachten, dass sowohl die Wahl des Modells als auch dessen spezifische Hyperparameteroptimierung einen erheblichen Einfluss auf die Gewichtung der wichtigsten Einflussgrössen haben. Das bedeutet, dass sich die identifizierten «wichtigen Parameter» (Feature Importance) je nach Modelltyp und gewählter Optimierung verändern können, was bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden muss.

3.2.4.9 Expertenwissen

Zur Ergänzung der datenbasierten Analyse wurde systematisch das Wissen von Fachpersonen einbezogen. Hierzu fand ein Workshop mit Vertreterinnen und Vertretern aus Baustoffprüflaboren, sowie Mitgliedern der Begleitkommission statt. Ziel dieser Veranstaltung war es, das Expertenwissen hinsichtlich der relevanten Einflussfaktoren auf den Chloridgehalt im Beton zu erfassen und mit den Ergebnissen der datengetriebenen Analyse abzugleichen.

Diskutiert wurden unter anderem folgende Aspekte:

- die wichtigsten Parameter für ein praxistaugliches Prognosemodell, basierend auf der erfahrungsbasierten Einschätzung und dem Sachverstand von Fachpersonen (Teil des Projektteams und der Begleitkommission)
- die erwartete Komplexität und Interpretierbarkeit des Modells
- die Verfügbarkeit und Verlässlichkeit der Parameter in der Praxis
- sowie die mögliche Berücksichtigung der Restnutzungsdauer des Bauwerks in der Modellbildung

3.3 Entwicklung eines Ingenieursansatzes

Aus den vorangegangenen Analysen leitet sich das Ziel ab, ein praxistaugliches Konzept zur näherungsweise Bestimmung der Chlorideinwirkung in Strassennähe zu entwickeln, das mit nur wenigen, leicht verfügbaren Parametern auskommt.

Es waren zu Projektbeginn verschiedene Formate für die Bestimmung der Chlorideinwirkung denkbar:

- Nomogramme
- Chloridbelastungskarten
- Flowchart für Entscheidungswege
- Vereinfachte Formeln
- Bauteilspezifische Abschätzungen, z.B. in Tabellenform
- Statistische Verteilungsfunktionen der zu erwarteten Chlorideinwirkungen
- Kombination der genannten Formate

Inwiefern sich diese Ansätze umsetzen lassen, war sodann Gegenstand der in diesem Bericht beschriebenen Arbeiten, namentlich der Resultate der Datenanalysen.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden zuerst die Parameter der Datenbank analysiert (Kapitel 4.1). Anschliessend folgen die Erstellung und erste Analyse der Zielvariablen (Kapitel 4.2).

4.1 Datenbank der Chloridprofile

Die vollständige Datenbank umfasst insgesamt rund 1700 Chloridprofile von über 160 Bauwerken in der Schweiz mit einem Durchschnitt von knapp 10 Chloridprofilen pro Bauwerk.

Die Datenbank kann unter folgendem Link heruntergeladen werden (open access):
<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000748612>

Die Vollständigkeit der wichtigen Variablen variiert in der Datenbank stark. Für bestimmte Parameter, wie beispielsweise das Probenentnahmedatum, die Bauwerksart oder den Bauwerksteil, ist nahezu in jedem Fall ein Eintrag vorhanden. Bei anderen Parametern, wie der Exposition XC oder XD, fehlen jedoch bereits teilweise bis zu 20% der Einträge. Bei anderen Parametern, wie beispielsweise der Ausrichtung der Exposition, sind teilweise über 30% der Daten unvollständig. Ein ähnliches Muster zeigt sich beim Bauwerksalter, welches jedoch durch gezielte Massnahmen bei der Kuratierung der Datenbank erheblich reduziert werden konnte.

4.1.1 Verteilung der Bauwerkstypen und Profilzahlen

Abbildung 31 zeigt die statistische Häufigkeit der Bauwerkstypen und der Chloridprofile des Datensatzes. Es zeigt sich, dass Galerien und Tunneln eher eine grössere Anzahl an Chloridprofilen pro Objekt aufweisen als beispielsweise Unterführungen und Stützbauwerke. Am wenigsten Einträge sind für den Bauwerkstyp «Stützbauwerk» vorhanden.

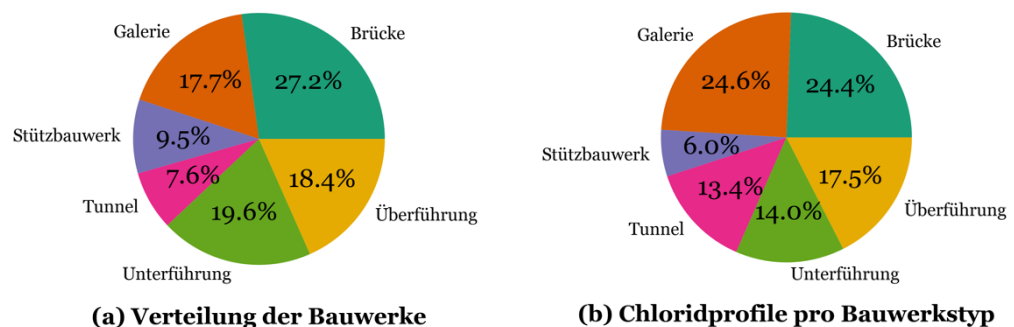


Abbildung 31: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Bauwerkstypen in (a) und der Anzahl der Chloridprofile (Datenbankeintrag) pro Bauwerkstyp in (b).

4.1.2 Chloridprofile

4.1.2.1 Verteilung des Chloridgehaltes

Abbildung 32 zeigt einen sogenannten Violinenplot, der die Dichteverteilung des Chloridgehaltes im Beton in Abhängigkeit von verschiedenen Tiefen darstellt. Die x-Achse repräsentiert pro Kategorie die Tiefe in Millimetern, während die y-Achse den Chloridgehalt in Massenprozenten bezogen auf den Beton angibt. Die Form der Violinen zeigt die Dichte der Messwerte: breitere Bereiche innerhalb der Violine repräsentieren eine höhere Konzentration von Messwerten. Der Medianwert ist durch einen weissen Punkt gekennzeichnet. Insgesamt sind die Tiefen 5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 7.5, 22.5 und 37.5 mm berücksichtigt. Diese Werte entsprechen der Mittelung der Intervallgrenzen der jeweiligen Tiefenstufen (vgl. Kapitel 3.1.3.1).

Über jedem Violinenplot in Abbildung 32 ist die Anzahl der Messungen (N) für die jeweilige Tiefe angegeben. Beispielsweise wurden bei einer Tiefe von 5 mm 1312 Messungen durchgeführt, wohingegen bei 75 mm Tiefe lediglich 6 Messungen vorliegen. Bei der geringsten Tiefenstufe (5 mm) sind weniger Messwerte als auf der Tiefenstufe 10-20 mm vorhanden. Die geringere Datenbasis bei 5 mm erklärt sich dadurch, dass einige Prüflabore diesen ersten Messpunkt wegen den Einflüssen der Konvektionszone oft auslassen.

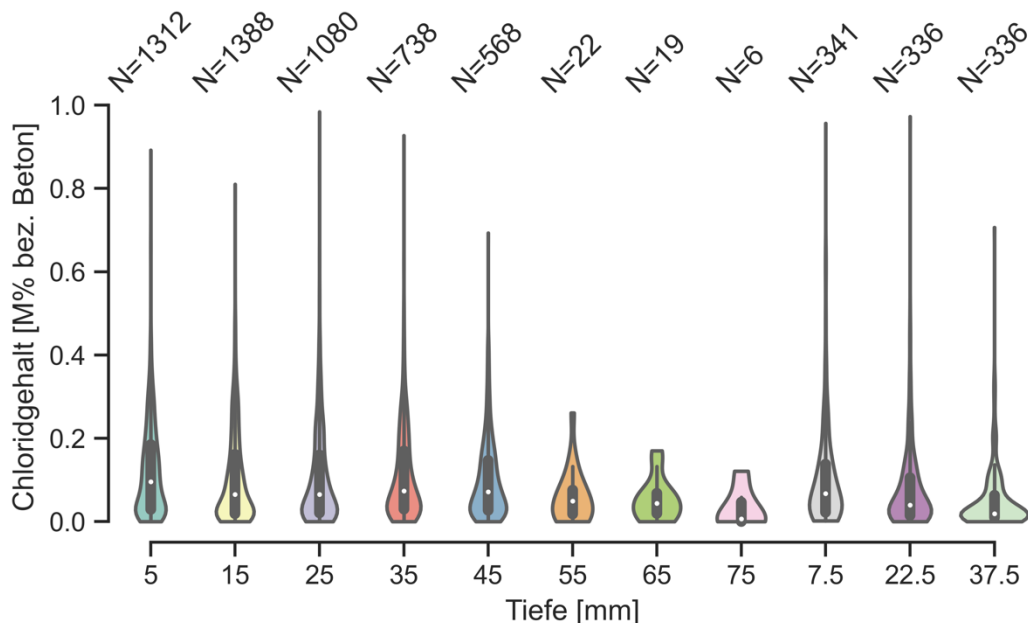


Abbildung 32: Verteilung des Chloridgehalts [M.-% bez. Beton] im Beton in Abhängigkeit von der Tiefe. N = Anzahl Datenpunkte in der Datenbank.

Die Chloridgehalte sind oberflächennah am höchsten und zeigen dort die grösste Streuung, nehmen jedoch mit zunehmender Tiefe deutlich ab und werden homogener (was allerdings auch mit der stark abnehmenden Anzahl Werte, N, zusammenhängen könnte).

4.1.2.2 Räumliche Verteilung der Chloridprofile in der Schweiz gruppiert nach Bauwerksart

Abbildung 33 zeigt auf einer Schweizer Landkarte die räumliche Verteilung der in der Datenbank vorhandenen Bauwerke mit Bezug auf die Entnahmestellen. Als Basis dienten die Koordinaten aus Kapitel 3.1.3.10. An einzelnen Punkten können dabei mehrere Chloridprofile erfasst sein.

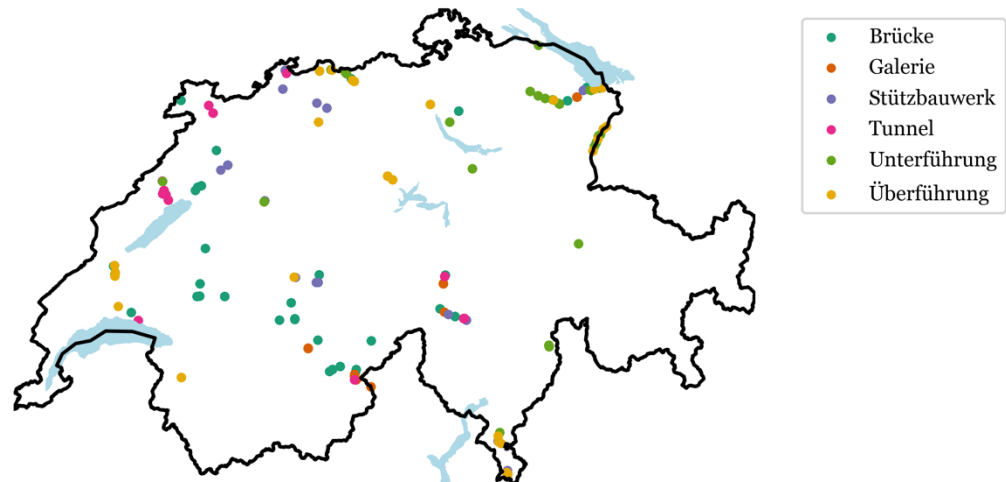


Abbildung 33: Räumliche Verteilung der Datenbankeinträge auf der Schweizerkarte, farblich markiert nach Bauwerkstyp.

Die Karte zeigt deutlich, dass eine Häufung von Bauwerken an der Nationalstrasse A1 zwischen St. Gallen und Zürich untersucht worden ist. Für den Kanton Graubünden und in der Nähe der Stadt Genf enthält die Datenbank kaum Chloridprofile. Brücken sind vor allem im Mittelland zu finden, sind aber über die ganz Schweiz verteilt. Galerien hingegen sind eher in den Alpenregionen zu finden. Insgesamt deckt die geographische Verteilung der in der Datenbank aufgenommenen Werte jedoch die verschiedenen klimatischen Bedingungen gut ab (Jurabogen, Mittelland, alpine Zone, Südalpenraum).

4.1.2.3 Anzahl Tiefenstufen der Chloridprofile

Abbildung 34 zeigt die Verteilung der Anzahl Tiefenstufen pro Datenbankeintrag. Die Mehrzahl der Chloridprofile enthält zwischen 2 und 5 Chloridwerte. Dabei haben 39% der Einträge drei Tiefenstufen, 29% der Einträge fünf Tiefenstufen und 19% der Einträge zwei Tiefenstufen. Vier Tiefenstufen sind bei rund 11% vorhanden. Die verbleibenden Einträge verteilen sich auf sechs und mehr Tiefenstufen mit jeweils einem sehr kleinen Anteil in der Datenbank aus.

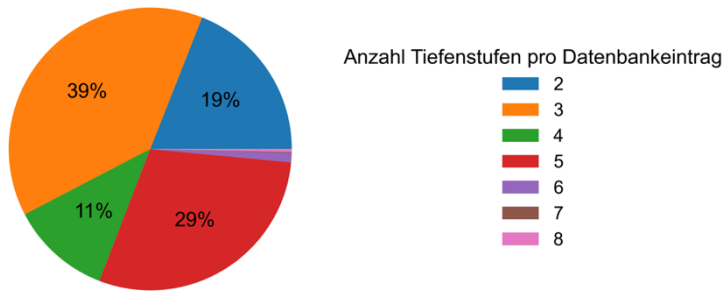


Abbildung 34: Anzahl der Tiefenstufen pro Chloridprofil in der Datenbank.

4.1.2.4 Messverfahren und Art der Probenentnahme für die Chloridprofile

Abbildung 35 zeigt die statistische Verteilung der bei den Datenbankeinträgen verwendeten Messverfahren zur Quantifizierung des Chloridgehaltes. Es wurden insgesamt vier verschiedene Messverfahren zur Quantifizierung des Chloridgehaltes verwendet, nämlich die Verwendung von Ionen-sensitiven Elektroden, (potentiometrische) Titration, mittels Kaltaufschluss mit Salpetersäure und photometrischer Quantifizierung, als auch mit Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF). Bei rund 18% der Datenbankeinträge ist nicht vermerkt, wie der Chloridgehalt bestimmt wurde.

Die Art der Probenentnahme ist bei über 99% der Fälle bekannt, wobei rund drei Viertel mittels Bohrmehlentnahmen erhalten wurden, und in einem Viertel der Fälle Bohrkern entnommen worden sind.

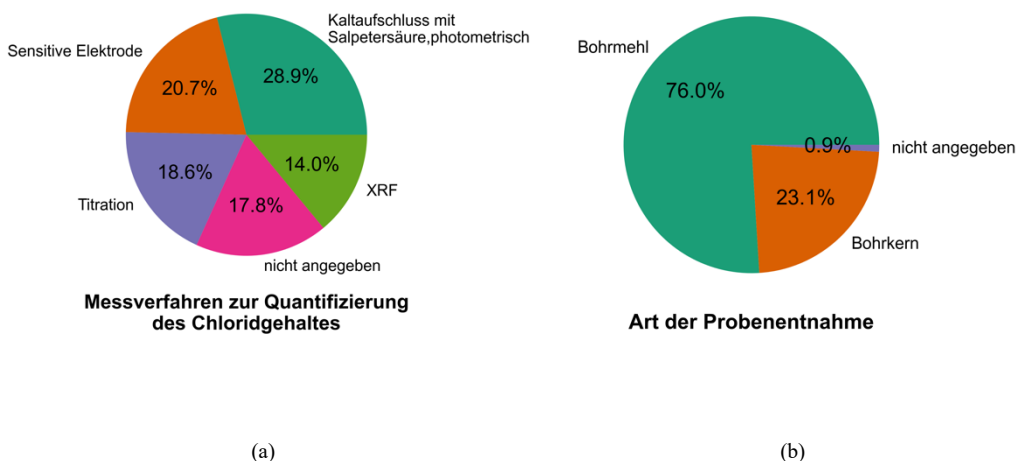


Abbildung 35: Statistische Auswertung in (a) Messverfahren zur Quantifizierung des Chloridgehaltes und in (b) Übersicht zur Art der Probenentnahme an den Bauwerken.

4.1.2.5 Verteilung des maximalen Chloridgehaltes auf unterschiedliche Bauwerke

Der Violinenplot in Abbildung 36 zeigt die Verteilung des maximalen Chloridgehaltes im Chloridprofil, gruppiert nach Bauwerksarten. Auf der horizontalen Achse sind die Bauwerksarten aufgeführt: «Stützbauwerke», «Brücken», «Galerien», «Unterführungen», «Überführungen» und «Tunnel». Die vertikale Achse gibt den maximalen Chloridgehalt in Masseprozent bezogen auf den Betongewicht an.

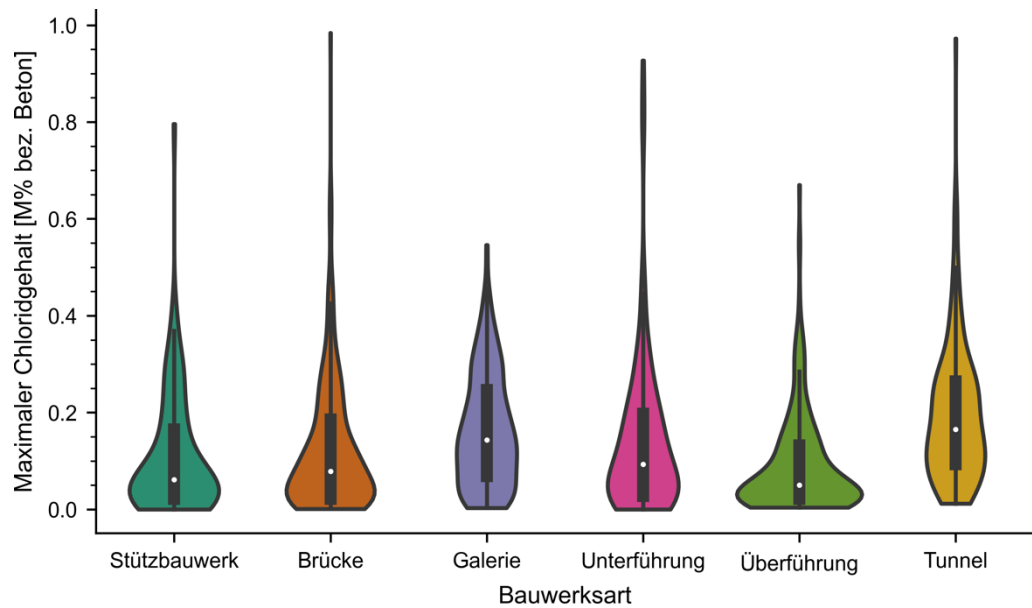


Abbildung 36: Maximaler Chloridgehalt in den Chloridprofilen in der Datenbank, für verschiedene Bauwerksarten, dargestellt in Masseprozent bezogen auf den Beton.

Im Quervergleich zwischen den Bauwerksarten weist der Bauwerkstyp «Tunnel» den höchsten Medianwert auf, gefolgt von «Galerie». Geringere Chloridwerte wurden bei «Stützbauwerken» und «Überführungen» gemessen.

Unter Berücksichtigung des in Kapitel 3.2.2.5 beschriebenen Datensatzes wurde in Abbildung 37 untersucht, ob zwischen den Bauwerksarten die Maxima der Chloridprofile auf unterschiedlichen Tiefenstufen liegen (vgl. auch Abbildung 13). In der Veranschaulichung (Abbildung 37) werden die Daten in Prozent dargestellt, da die Anzahl der Chloridprofile zwischen den verschiedenen Bauwerksarten variieren. Es ist zu beachten, dass nicht alle Profile in sämtlichen Tiefenstufen gemessen wurden (vgl. Abbildung 32). Darüber hinaus wurden lediglich Tiefenstufen bis zu 40 mm berücksichtigt.

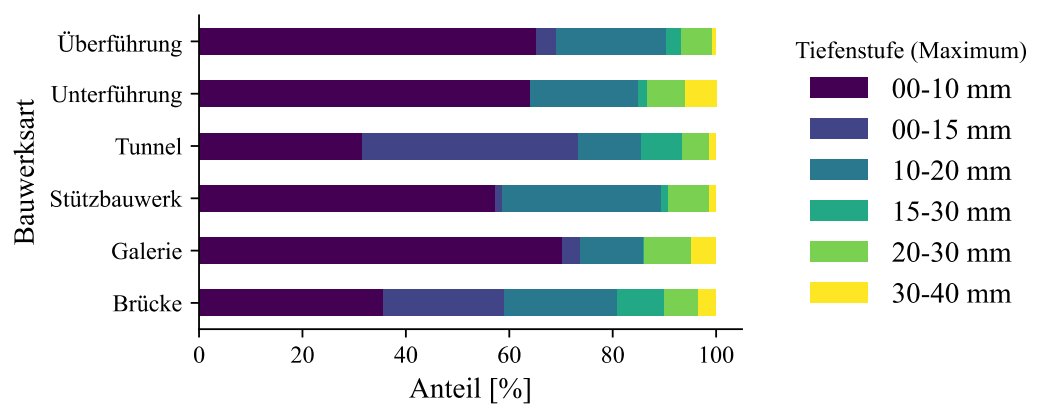


Abbildung 37: Verteilung der Tiefenstufen mit dem jeweils höchsten Chloridgehalt, gruppiert nach Bauwerksart in Prozent.

Das Maximum des Chloridprofils befindet sich in der Regel in den ersten beiden Tiefenstufen, d.h. 0–20 mm. Abhängig von der Bauwerksart entspricht dies etwa 60 bis 70 Prozent der gemessenen Chloridprofile. Am häufigsten wurden prozentual die höchsten Werte im Chloridprofil bei einer Tiefe von 40 mm beim Bauwerksart «Unterführung» festgestellt. Es ist zu bemerken, dass für die Tiefenstufen von 0 bis 15 mm und 15 bis 30 mm fast nur Daten für Tunnel und Brücke vorliegen. Dadurch sind bei den anderen Bauwerkstypen kaum nennenswerte Einflüsse dieser Tiefenstufen vorhanden. Dies deutet darauf hin, dass in den meisten Fällen die Konvektionszone geringer als 20 mm war.

4.1.2.6 Zeitliche Verteilung der Chloridgehalte

Abbildung 38 präsentiert die Boxplots, die die Entwicklung des Chloridgehalts auf zwei unterschiedlichen Tiefenstufen und des Maximalwerts des Profils in Abhängigkeit vom Baujahr des Bauwerks darstellen. Die Werte sind in Fünfjahresintervallen gruppiert und die Anzahl der verwendeten Datenpunkte ist jeweils angegeben.

Es zeigt sich, dass die Verteilung der Chloridkonzentrationen über die Zeit hinweg Schwankungen aufweist. Besonders in der oberflächennahen Tiefe (10–20 mm) ist eine grössere Streuung erkennbar. Zwischen 1960 und 1964 wurden die höchsten Chloridkonzentrationen registriert, wobei die Anzahl der Datenpunkte in diesem Zeitraum begrenzt ist. Die Konzentrationen in der Tiefe von 20–30 mm fallen hingegen etwas geringer aus und sind tendenziell stabiler.

Insgesamt lassen sich in dieser Auswertung jedoch kaum statistisch signifikante Unterschiede feststellen. Dies deutet darauf hin, dass das Bauwerksalter einen untergeordneten Einfluss auf die im oberflächennahen Beton gefundenen Chloridgehalte hat. Dieser Befund lässt sich mit der bereits im Kapitel 1 erwähnten Beobachtung erklären, dass sich der Chloridgehalt in den äussersten Betonschichten in vielen Fällen innerhalb der ersten rund 10 Jahre einpendelt.

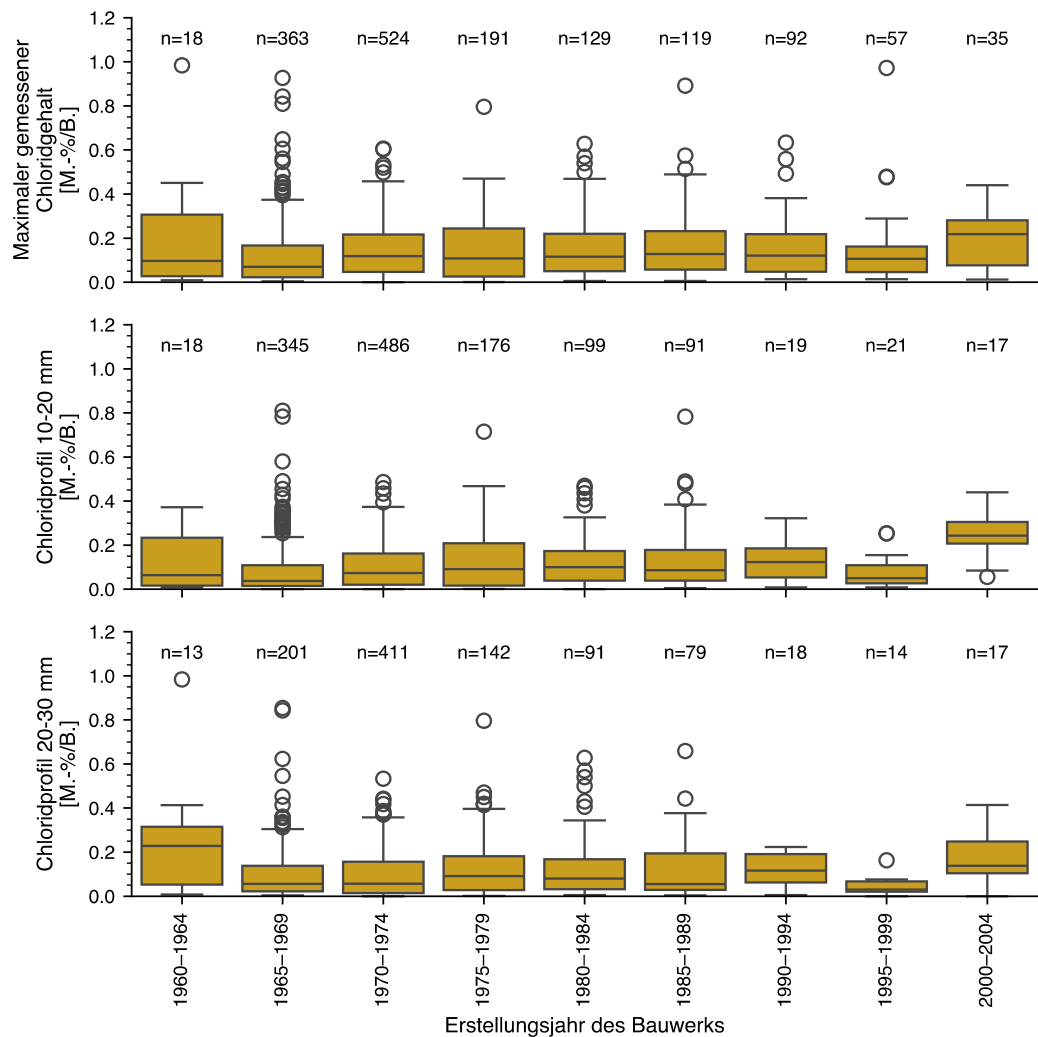


Abbildung 38: Entwicklung des maximalen Chloridgehalts im Profil, sowie der Chloridkonzentrationen in 10–20 mm und 20–30 mm Tiefe in Abhängigkeit vom Baujahr der Bauwerke (5-Jahres-Intervalle).

4.1.2.7 Log-Normalverteilung der Chloridgehalte auf den Tiefenstufen

Tabelle 9 stellt die Parameter einer angepassten Log-Normalverteilung (vgl. Kapitel 2.4.5) an die Werte der unterschiedlichen Tiefenstufen dar. Für die Anpassung standen je nach Tiefe zwischen rund 300 und über 1'000 Werte zur Verfügung (vgl. Kapitel 4.1.2.1). Bis zur Tiefenstufe 30–40 mm und abgesehen von der Tiefenstufe 15–30 mm ist der Mittelwerte der Verteilung bei rund 0.1 M.-%/B. Anschließend nimmt der Mittelwert als auch die Standardabweichung mit der Erhöhung der Entfernung zur Betonoberfläche ab. Der Variationskoeffizient variiert zwischen 1.4 und 2.0.

Variationskoeffizienten

Tiefenstufe [mm]	Mittelwert [M.-%/B.]	Standardabweichung [M.-%/B.]	Variationskoeffizient [-]	Umfang des Datensatzes [-]
00-10	0.142	0.229	1.609	1309
00-15	0.114	0.180	1.579	321
10-20	0.126	0.253	2.007	1386
15-30	0.081	0.133	1.654	304
20-30	0.131	0.268	2.050	1071
30-40	0.127	0.177	1.394	714
30-45	0.050	0.073	1.453	295
40-50	0.111	0.168	1.504	571

Tabelle 9: Variationskoeffizienten für die unterschiedlichen Tiefenstufen im Chloridprofil angepasst an eine Log-Normal-Verteilung.

Eine Überprüfung der Annahme einer Log-Normalverteilung mittels Kolmogorov-Smirnov-Tests ergab bei allen betrachteten Tiefenstufen signifikante Abweichungen ($p < 0.05$), sodass die Verteilungshypothese auf dem 5 %-Signifikanzniveau verworfen werden muss. Dies im Gegensatz zu [24], wo die Hypothese mit dem Smirnov-Test mit $p < 0.05$ nicht verworfen werden musste. Trotz der formalen Ablehnung erscheint die Annahme einer Log-Normalverteilung aufgrund der ausgeprägten Rechtsschiefe als näherungsweise für einen Vergleich geeignet. Eine ergänzende Analyse auf dem bestehenden Datensatz zeigte jedoch, dass alternative rechts-schiefe Verteilungen wie die Gamma- und Weibullverteilung deutlich bessere Anpassungen liefern (vgl. Abbildung 39). Insbesondere die höheren Quantile werden besser durch die Gamma- oder Weibullverteilung angenähert.

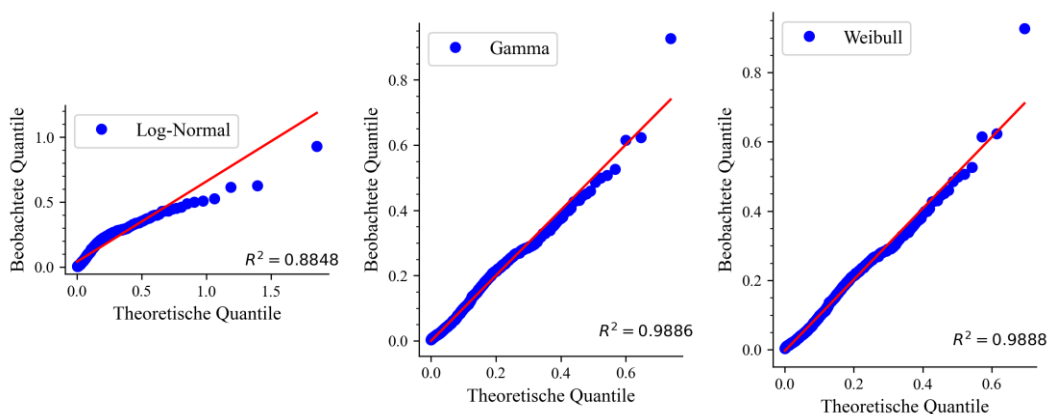


Abbildung 39: Q-Q-Plot für unterschiedliche Verteilung für die Chloridwerte auf der Tiefenstufe 30-40 mm.

Im Vergleich zu Werten aus Kapteina [24] sind einerseits die Mittelwerte und Standardabweichungen, für den Vergleich mit einem Faktor 7 auf M.-%/Z. umgerechnet, auf sämtlichen Tiefenstufen deutlich erhöht. Während in der Literaturstelle von einer eher homogenen Chloridbeaufschlagung ausgegangen wird, fallen die hier berechneten Variationskoeffizienten wesentlich höher aus. Dabei ist zu beachten, dass in dieser Auswertung sämtliche horizontalen und vertikalen Distanzen berücksichtigt wurden,

wodurch eine grössere Streuung und damit ein höherer Variationskoeffizient zu erwarten war.

4.1.3 Verteilung der Bauwerksteile in den Bauwerksarten

Diese Auswertung gibt einen ersten Einblick in die Repräsentation einzelner Bauteile innerhalb der verschiedenen Bauwerkstypen, wie sie in der Datenbank erfasst wurden («Rohfassung»). In Abbildung 40 wird die Anzahl der Nennungen spezifischer Bauwerksteile dargestellt, welche anschliessend nach Bauwerksart gruppiert sind. Berücksichtigt werden dabei nur Kombinationen mit mindestens 10 Nennungen. Andernfalls wäre eine umfassende Darstellung aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Bauwerksteilen, die je nach Bauwerksart vorhanden sind, nicht möglich gewesen.

In der Datenbank fand sich das Bauwerksteil «Stütze» am häufigsten. Das Bauwerksteil «Stütze» findet sich in nahezu sämtlichen Bauwerksarten. Eine ähnliche Verteilung zeigt sich ebenfalls für das Bauwerksteil «Wand». Daneben befinden sich auch Bauwerksart spezifische Bauteile, welche nur Nennungen in einer Bauwerksart enthalten. So ist beispielsweise das Bauwerksteil «Stützbauwerk» ausschliesslich bei der Bauwerksart «Stützbauwerk» erfasst, während «Träger» ausschliesslich bei «Brücken» genannt wird.

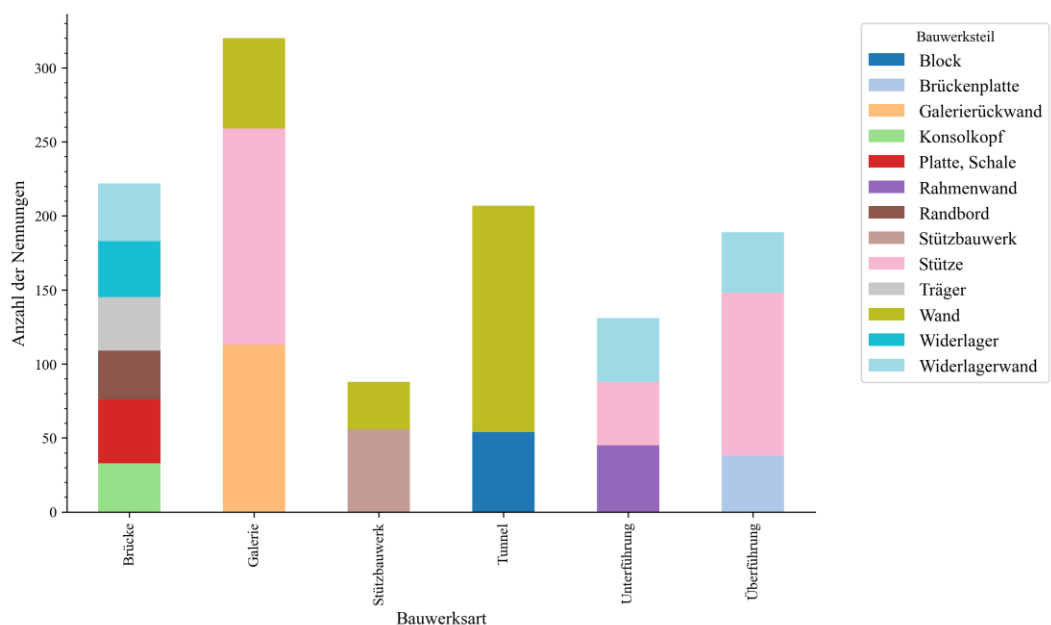


Abbildung 40: Anzahl der Nennungen verschiedener Bauwerksteile, gruppiert nach Bauwerksart. Es wurden nur Kombinationen berücksichtigt, die in mindestens 10 Nennungen vorkommen.

4.1.4 Bemerkungen

Im Feld «Bemerkungen» traten unterschiedliche Angaben auf. Diese reichten von Angaben zu Testausführungen über das Detektionslimit für die Analyse der Chloride bis hin zu Angaben zur Höhe oder der Expositionsdauer in Jahren mit Nachkommastellen. Zudem wurden fehlerhafte Bauwerksnamen angegeben, und es gab Anmerkungen, dass in diesen Fällen die erste Oberflächenstufe von 0 bis 10 mm nicht gemessen wurde. Teilweise wurde auch angemerkt, dass die Chloridkonzentration im Vorbeton mit einer Dicke von 50 Millimetern erfasst wurde.

4.1.5 Orientierung der Exposition

Die Ausrichtung der Exposition beschreibt die Orientierung der Fläche gegenüber der Fahrtrichtung der Fahrzeuge (vgl. Kapitel 3.1.3.12) und ist möglicherweise ein wichtiger Parameter zur Beschreibung der Chloridbeaufschlagung. Die nachfolgenden Abbildungen bieten eine Übersicht über die Chloridverteilungen, unterteilt nach Ausrichtungen und Tiefenstufen für Stützen und Konsolköpfe im Datensatz, und erlauben eine erste Beurteilung möglicher Zusammenhänge zwischen gemessenem Chloridgehalt und Ausrichtung für diese Bauwerksteile gegenüber der Fahrbahn.

Abbildung 41 zeigt den Chloridgehalt auf sämtlichen Tiefenstufen des Teildatensatzes mit dem Filter für «Stützen» im Feld «Bauwerksteil», aufgeschlüsselt nach der Ausrichtung (vgl. Kapitel 3.1.3.12). Die Darstellung ermöglicht einen direkten Vergleich der Chloridbelastung in Abhängigkeit von der Expositionsrichtung bei Stützen. Insgesamt sind über 250 Einträge vorhanden. Die Mehrheit mit über 90 % wurden mit der Ausrichtung A in die Datenbank aufgenommen. Für die anderen drei Ausrichtungen sind deutlich weniger Daten verfügbar. Über jeder Tiefenstufe ist die jeweilige Stichprobengröße angegeben, welche für B, C und D deutlich abnimmt.

Die höchsten Chloridgehalte für die Ausrichtung A wurden auf einer Tiefenstufe von 00 bis 10 mm gemessen. Die Standardabweichung war für die Tiefenstufe 10 bis 20 mm am höchsten. Es zeigen sich insbesondere in oberflächennahen Schichten deutliche Unterschiede in der Höhe und Streuung der Chloridgehalte zwischen den Ausrichtungen. Obwohl zu berücksichtigen ist, dass für die Ausrichtungen B und C nur sehr wenige Datenpunkte vorliegen.

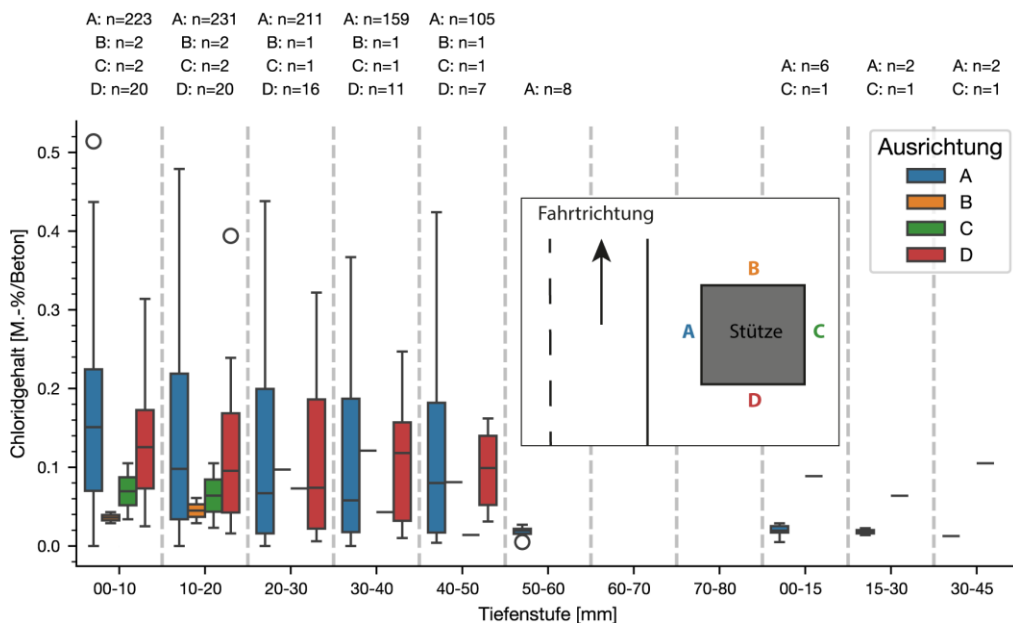


Abbildung 41: Ausrichtung der Exposition gegenüber der Strasse für als Stützen gekennzeichnete Einträge im Eintrag Bauwerksteile der Datenbank.

Eine analoge Grafik lässt sich für die Exposition an Konsolköpfen erstellen und ist in Abbildung 42 dargestellt. Für Konsolköpfe gab es 3 Möglichkeiten (A, B, C) zur

Beschreibung der Exponierung. Je nach Ausrichtung und Tiefenstufe lagen zwischen 5 und 36 Werte vor. Für die Tiefenstufen 0 bis 15, 15 bis 30 und 30 bis 40 mm liegen keine Daten vor. Für jede Ausrichtung ist der Mittelwert tendenziell mit Erhöhung der Betonüberdeckung fallend und die Unterschiede in tieferen Lagen werden zunehmend geringer. Die strassenzugewandte Seite (A) zeigt die höchsten Werte, gefolgt von der horizontalen Fläche B und der abgewandten Seite C.

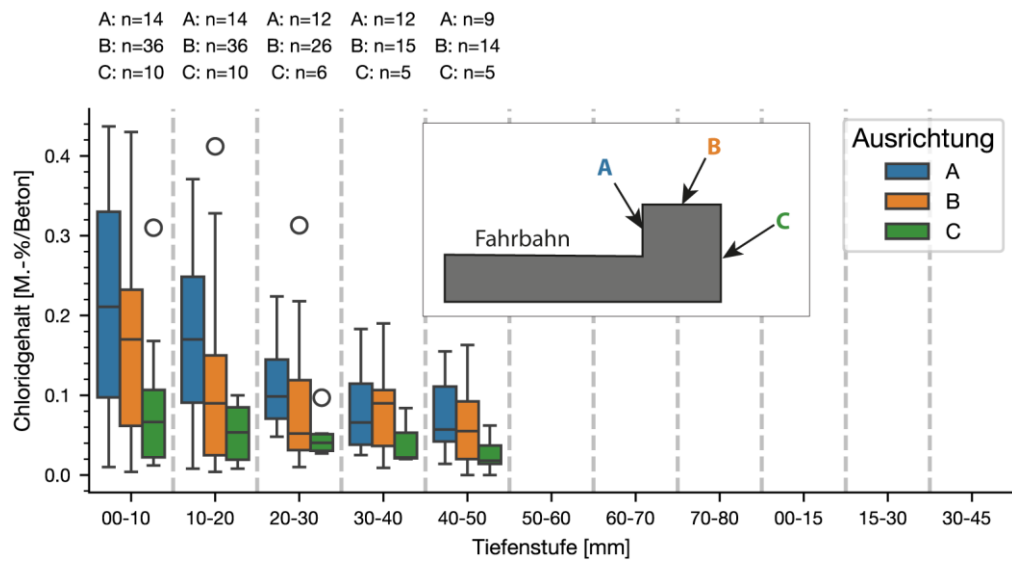


Abbildung 42: Ausrichtung der Exposition gegenüber der Strasse für als Konsolköpfen gekennzeichnete Einträge im Eintrag Bauwerksteile der Datenbank.

Diese beiden Auswertungen zeigen deutlich, dass die Ausrichtung der Betonoberfläche in Bezug auf die Chloridquelle einen signifikanten Einfluss auf die Chloridbelastung haben. Der Strasse (Chloridquelle) zugewandte Betonflächen bei Stützen und Konsolköpfen weisen signifikant höhere Chloridgehalt auf, als der Strasse abgewandte oder zur Strasse senkrecht stehende Flächen. Dieser Befund deckt sich mit der fachlichen Einschätzung und der Erwartung von fachkundigen Personen.

Eine detaillierte Analyse der Chloridgehalte für Stützen und der Ausrichtung A auf einer Tiefenstufe von 10 bis 20 mm ist in Abbildung 43 dargestellt. Die Chloridgehalte bezüglich des Betons wurden in vier gleich grosse Klassen (anzahlmässig) zur einfacheren visuellen Darstellung unterteilt. Dies resultierte in Klassenbreiten von 0.00 bis 0.03, 0.03 bis 0.10, 0.10 bis 0.22 und 0.22 bis 0.48. Es lassen sich kaum verlässliche Trends in der Grafik identifizieren.

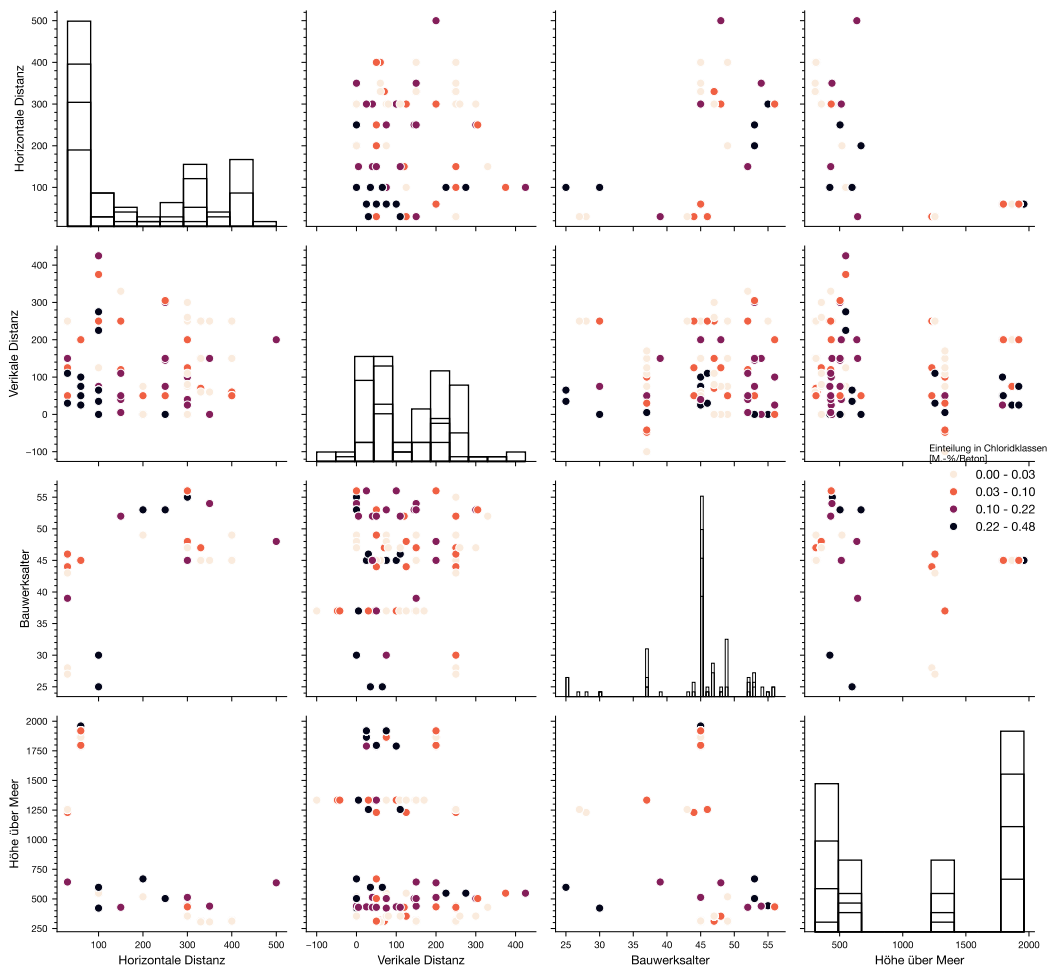


Abbildung 43: Übersicht über Zusammenhänge unterschiedlicher Parameter in der Datenbank für Stützen mit der Ausrichtung A, aufgeteilt in 4 gleichgrosse Klassen bezüglich des Chloridgehaltes zwischen 10 und 20 mm.

Abbildung 44 zeigt eine alternative Darstellung der Abbildung 43. Die Unterschiede zwischen den Grafiken ist die Klasseneinteilung, welche in der Abbildung 44 anhand der Quantile des Chloridgehaltes auf der Tiefenstufe 10 bis 20 mm erfolgt ist. Die Unterteilung anhand der Quantile wurde ausgewählt, um mögliche Ausreisser zu isolieren und generelle Trends zu erkennen. Die Klasseneinteilung erfolgte in drei Quantilbereiche von 0 bis 15 %, einen mittleren Bereich von 15 bis 85 % und 85 bis 100 %. Dies führte zu Grenzen für den Chloridgehalt bezüglich des Betons auf dieser Tiefenstufe von 0 bis 0.02 für den tiefen Bereich, 0.02 bis 0.28 für das mittlere Intervall und 0.28 bis 0.48 für den Bereich mit den höchsten Chloridwerten. Es fällt auch hier schwer, in der Grafik eindeutige Trends zu erkennen.

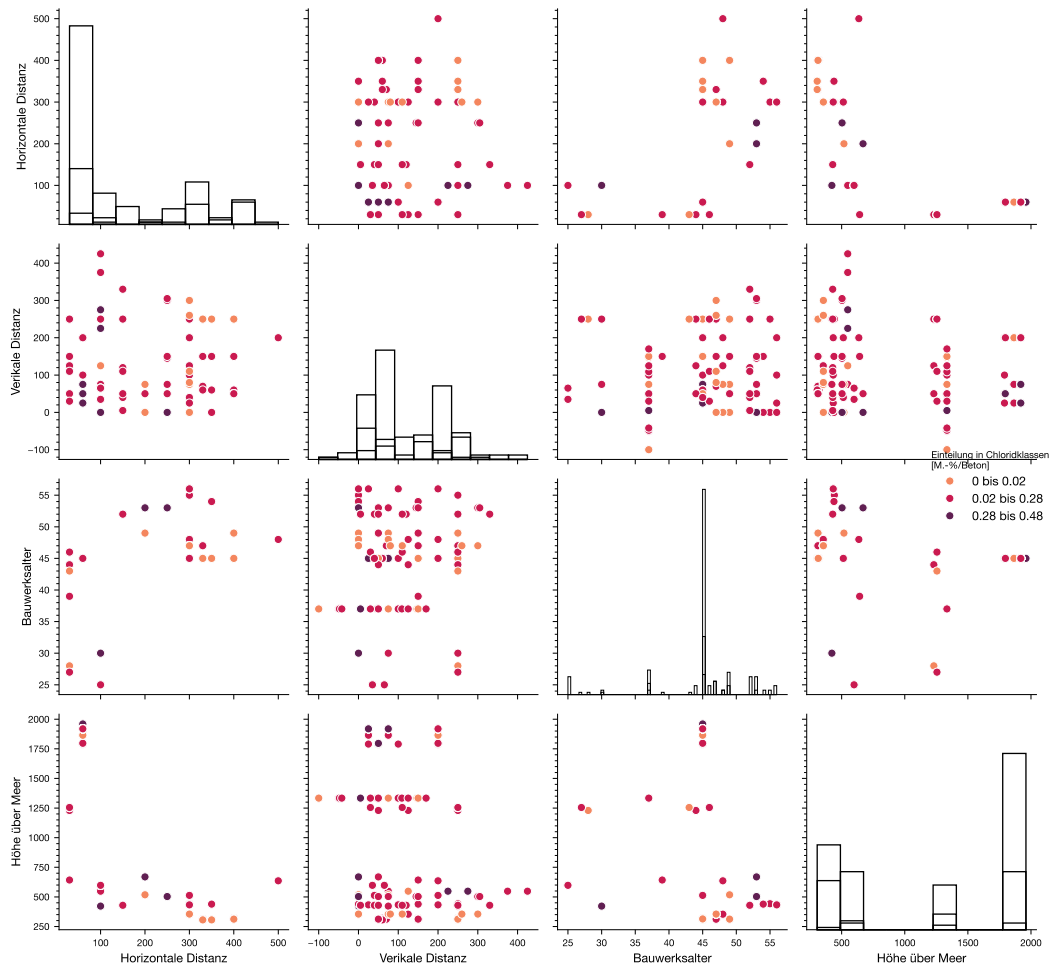


Abbildung 44: Übersicht über mögliche Zusammenhänge unterschiedlicher Parameter in der Datenbank für Stützen mit der Ausrichtung A, aufgeteilt in drei Quantilbereiche (0 bis 15 %, 15 bis 85 % und 85 bis 100 %) bezüglich des Chloridgehaltes zwischen 10 und 20 mm.

Die letzte detaillierte Auswertung zeigt eine Darstellung bezüglich der Zielvariablen 3.4. Das Histogramm der Zielvariablen (Abbildung 45) hat sehr viele Werte bei geringen Chloridgehalten auf einer Tiefe von 20 mm. Die Unterteilung in Klassen erfolgte anhand der Quantile, aber aufgrund des Histogramms der Zielvariablen wurden entschieden in drei Quantilbereiche von 0 bis 50 %, 50 bis 75 % und 75 bis 100 % zu unterteilen, resp. zu Chloridkonzentration bezüglich des Betons von 0.0 bis 0.02, 0.02 bis 0.10 und 0.10 bis 0.29. In der Grafik lassen sich ebenfalls kaum klare Trends erkennen.

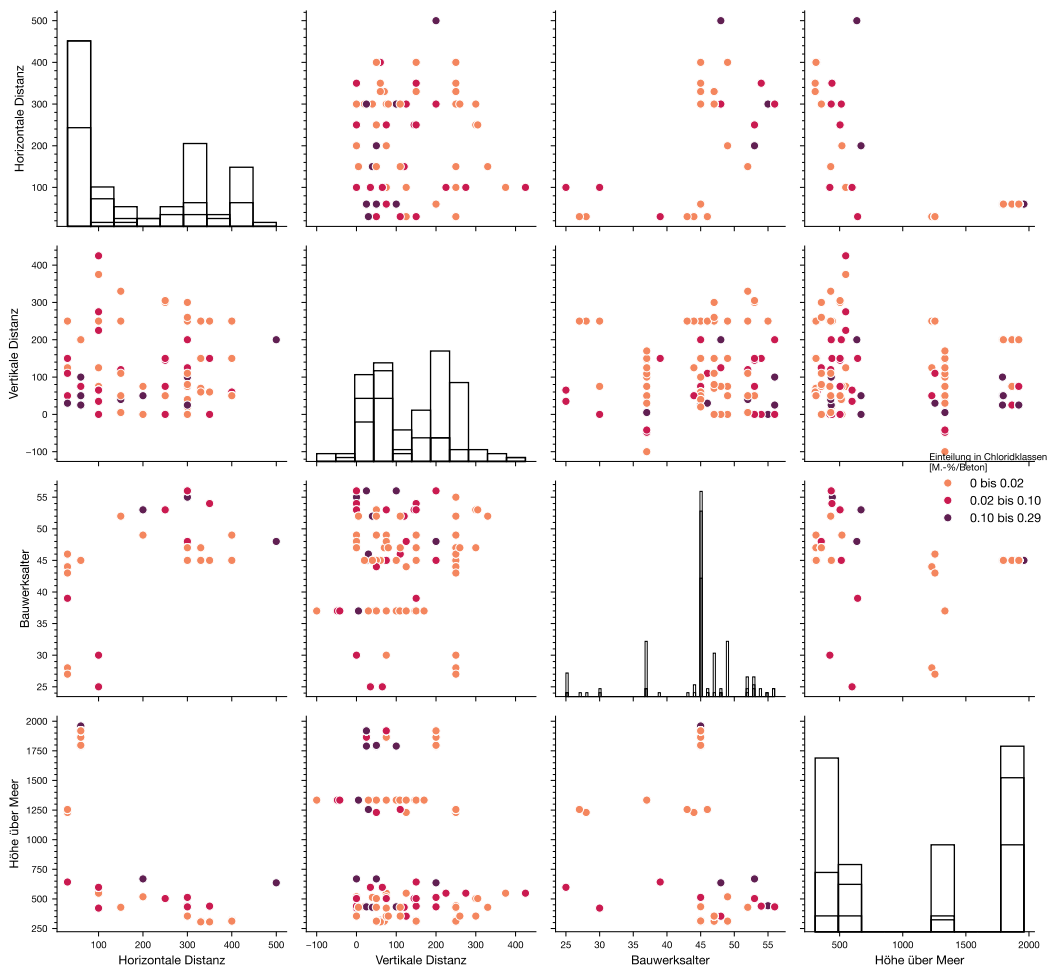


Abbildung 45: Übersicht über mögliche Zusammenhänge unterschiedlicher Parameter in der Datenbank für Stützen mit der Ausrichtung A, aufgeteilt in drei Quantilbereiche (0 bis 50%, 50 bis 75% und 75 bis 100%) bezüglich der Zielvariablen 3.4.

Zusammenfassend zeigt die Analyse der Stützen und Konsolköpfen, namentlich der der Strasse zugewandten Seite (A), dass sich klare und verlässliche Trends zwischen der Chloridbelastung und potenziellen Einflussfaktoren wie horizontale Distanz, vertikale Distanz, Bauwerksalter und Höhe über Meer schwer erkennen lassen.

Dies bedeutet, dass diesen mutmasslichen Einflussfaktoren keine übergeordnete Bedeutung zukommt, d.h. dass sie nicht vorrangig, in einer dominanten Weise die Chloridbelastung beeinflussen. Vielmehr lässt sich daraus schliessen, dass auch andere Einflussgrößen (vgl. Tabelle 3) eine Rolle spielen und die resultierende Chloridbelastung eine komplexeres Ursache-Wirkung Zusammenspiel aufweist.

4.1.6 Verteilung nach Baujahr

Abbildung 46 zeigt die Verteilung der verfügbaren Chloridprofile in Abhängigkeit vom Baujahr der untersuchten Stahlbetonbauwerke im Zeitraum von 1960 bis 2000. Für 17 Bauwerke wurde kein Baujahr in die Datenbank aufgenommen.

Über diese 40 Jahre gibt es eine ungleichmässige Verteilung der Daten. Rund 20% der Chloridprofile wurden an Bauwerken aus den 1970-er Jahren entnommen.

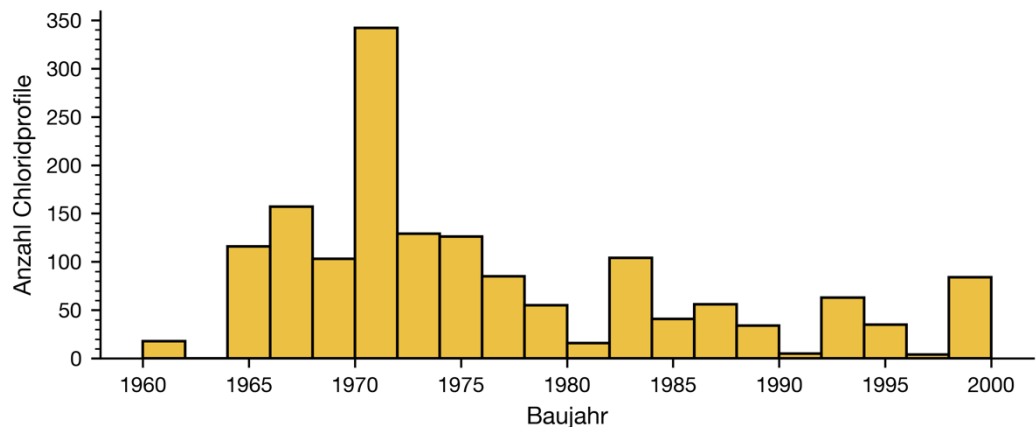


Abbildung 46: Verteilung des Baujahrs nach der Anzahl der in der Datenbank verfügbaren Chloridprofile.

Im Mittel wurden die Chloridprofile aus Bauwerken mit einem Erstellungsjahr von 1975 entnommen. Die Standardabweichung beträgt knapp 10 Jahre. Das am häufigste erfasste Erstellungsjahr des Bauwerks war 1972.

4.1.7 Verteilung der Höhe über dem Meeresspiegel

Die Datenbankeinträge stammen aus unterschiedlichen Höhen gegenüber dem Meeresspiegel, wobei das Minimum bei 265 Metern und das Maximum bei 2'079 Metern liegt.

Die Mehrheit der Proben wurde aus mittleren Höhenlagen (zwischen 500 und 1000 m ü. M.) entnommen. Zwischen 1'250 und 1'750 m ü. M. sind kaum Daten erhoben worden. Hingegen sind ab 1'750 m ü. M. sind mehrere Hundert Datenbankeinträge vorhanden. Die gesamte Verteilung ist in Abbildung 47 in einem Histogramm dargestellt. Die Autoren sind der Ansicht, dass die Datenbank die verschiedenen Expositionslagen in der Schweiz, vom Flachland bis in sehr alpine Lagen, daher sehr gut abbildet.

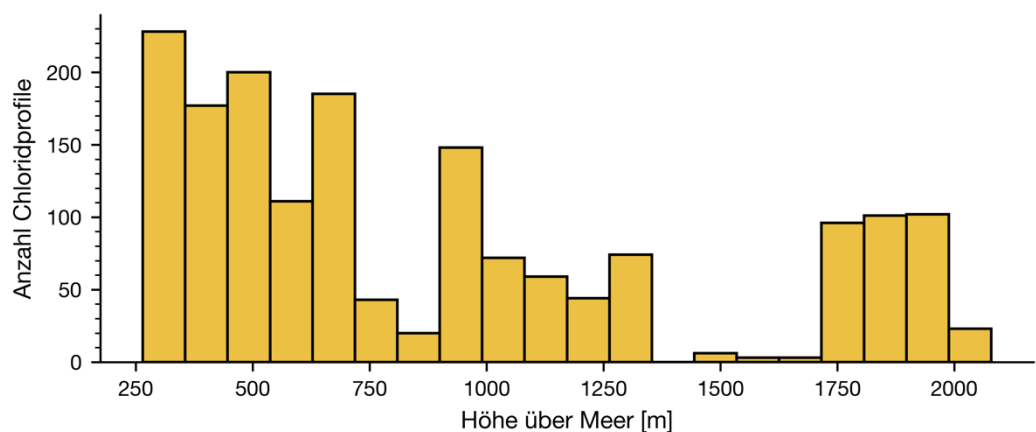


Abbildung 47: Verteilung der Höhe über Meer der in der Datenbank enthaltenen Bauwerke.

4.1.8 Auswertung der Expositionsklassen

Die Expositionsklassen, definiert nach Norm SIA 262, für Bewehrungskorrosion in karbonatisiertem Beton und Bewehrungskorrosion induziert durch Chloride befinden

sich in Tabelle 10 und Tabelle 11. Die meisten Chloridprofile befinden in Expositions-klasse XC3 und XC4 und für 237 Chloridprofile liess sich keine Expositions-klasse gegenüber Bewehrungskorrosion in karbonatisiertem Beton ermitteln. Gegen den Chloridangriff wurden die Mehrheit der Chloridprofile der Expositions-klasse XD3 zugeteilt, gefolgt von XD1 mit 555 und für 180 Chloridprofile wurde die Expositions-klasse nicht zugeteilt.

Expositionsklassen für karbonatisierten Beton

Exposition	Anzahl Chloridprofile
XC1	111
XC2	0
XC3	413
XC4	963
Ohne Angabe	237

Tabelle 10: Expositionsklassen der in der Datenbank enthaltenen Datensätze betreffend Bewehrungskorrosion in karbonatisiertem Beton.

Expositionsklassen für chloridinduzierte Korrosion

Exposition	Anzahl Chloridprofile
XD1	560
XD2	1
XD3	983
Ohne Angabe	180

Tabelle 11: Expositionsklassen der in der Datenbank enthaltenen Datensätze betreffend Bewehrungskorrosion induziert durch Chloride.

Damit enthält die Datenbank im Wesentlichen Daten in Sprühnebelexposition (XD1) und Daten in Spritzwasserexposition (XD3), wie dies vorgesehen war. Abbildung 48 zeigt eine Gegenüberstellung der Expositionsklassen XD1 und XD3 für die 8 Zielvariablen und Chloridgehalte auf den Tiefenstufen 00-10 mm, 10-20 mm und 20-30 mm. Die Exposition XD3 zeigt gegenüber der Expositions-klasse XD1 in sämtlichen Gegenüberstellungen einen höheren Mittelwert. Dies spricht für eine grundsätzlich plausible Zuteilung der Expositionsklassen in der vorliegenden Datenbank.

Auf der Tiefenstufe 10-20 mm sind die höchsten Werte bei der Exposition XD1 zu erkennen. Die vertiefte Betrachtung dieser Werte zeigt, dass im Feld Bemerkungen (vgl. Kapitel 4.1.8.14) bei den 5 höchsten Werten in diesem Eintrag zweimal die Anmerkung «Fliessspur» (damit streng genommen nicht XD1 Exposition) und einmal die Anmerkung «XD1/XD3» (also unklare Expositions-klasse) erfasst wurden. Die beiden anderen Einträge weisen in diesem Feld keine Bemerkung auf. Dies unterstreicht nochmals die Bedeutung dieser zusätzlichen Informationen für die Interpretation der Auswertungen.

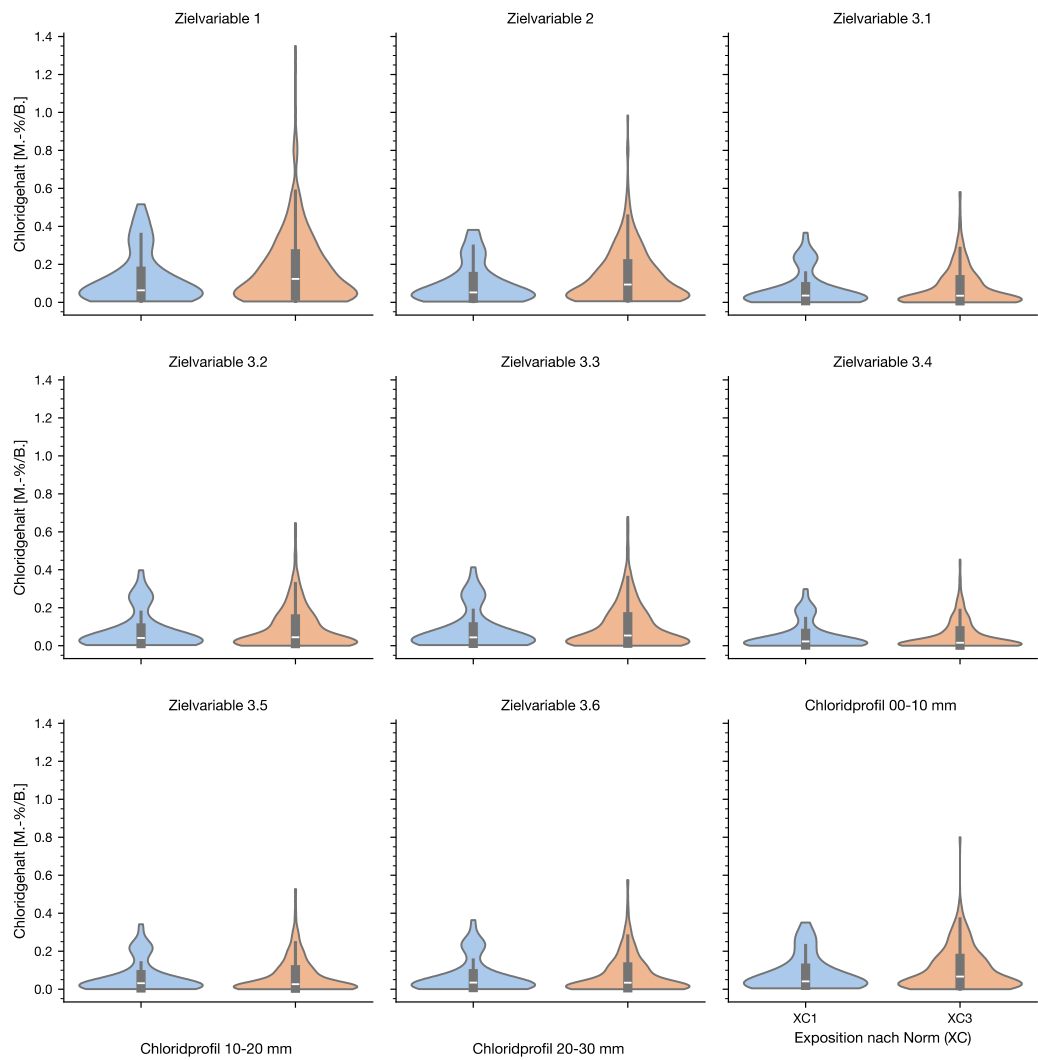


Abbildung 48: Vergleich der Chloridkonzentrationen für sämtliche Zielvariablen und die Chloridprofile auf den Tiefenstufen 00-10 mm, 10-20 mm und 20-30 mm aufgeschlüsselt nach der Exposition XD1 (blau) und XD3 (orange).

4.1.8.1 Horizontale Distanz zur Chloridquelle

Die Distanz zur Chloridquelle wurde sowohl horizontal als auch vertikal (Höhe gegenüber Fahrbahn) erfasst und ist bei rund Dreivierteln der Einträge in der Datenbank vorhanden. Erwartungsgemäss ist die horizontale Distanz für die meisten Chloridprofile in der Datenbank geringer als 1 m, was auf eine relativ unmittelbare Nähe der Betonoberfläche zur Chloridquelle (Strasse) in den meisten Datensätzen hinweist. Die grösste horizontale Distanz im Datensatz beträgt rund 10 m.

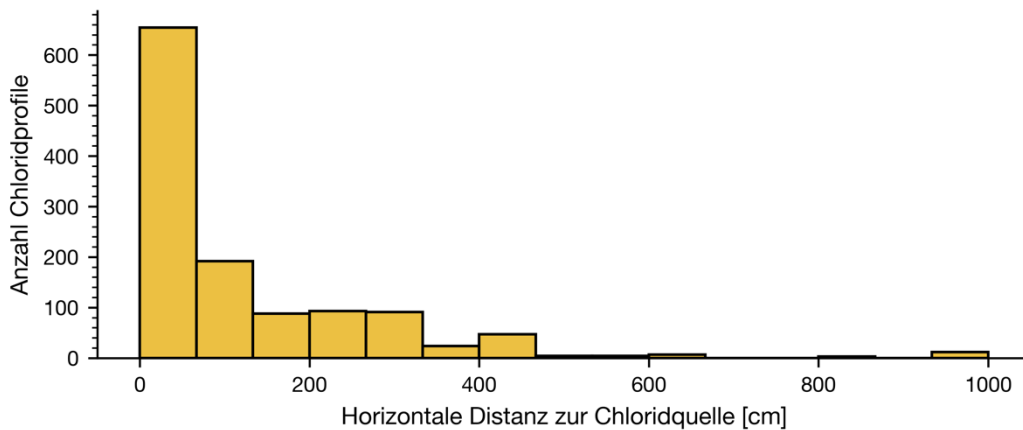


Abbildung 49: Histogramm der horizontalen Distanz zwischen dem Ende der Fahrspur und der exponierten Betonoberfläche, wo das entsprechende Chloridprofil entnommen worden ist.

Abbildung 50 zeigt den Chloridgehalt auf Tiefenstufe 10-20 mm als Funktion der horizontalen Distanz zur Chloridquelle (Strasse), wobei Datenpunkte mit auffälligen Spezialbedingungen wie Fliessspuren oder Abplatzungen herausgefiltert worden sind. Es ist zu erkennen, dass die Chloridgehalte mit ansteigender Distanz zur Chloridquelle tendenziell abnehmen. Jedoch finden sich auch in Bereichen mit geringer horizontaler Distanz zur Chloridquelle (z. B. innerhalb 1 m von der Strasse entfernt) Datensätze mit der gesamten Streubreite der in der Datenbank enthaltenen Chloridgehalte. Dies weist, wie intuitiv erwartet, daraufhin, dass auch andere Parameter nebst dem horizontalen Abstand zur Strasse einen Einfluss haben. Bei Konsolköpfen kann etwa das Vorhandensein von Schneemassen als «Chloridschirm» eine Rolle spielen.

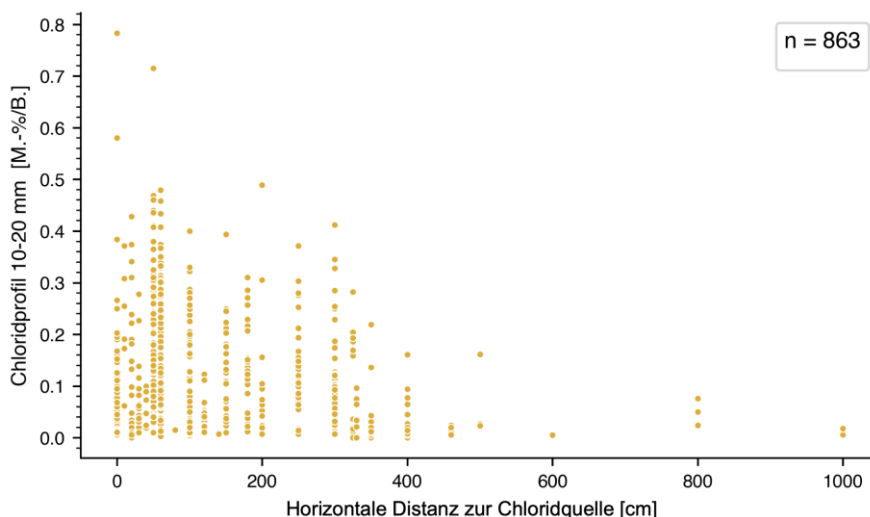


Abbildung 50: Chloridgehalt auf Tiefenstufe 10-20 mm als Funktion der horizontalen Distanz zur Chloridquelle (Strasse). Datensätze mit auffälligen Spezialbedingungen (Fließspuren, Abplatzungen, Hohlstellen, etc.) ausgeschlossen.

4.1.8.2 Höhe über OK Fahrbahn

Die Abbildung 51 zeigt das Histogramm der Höhe über der Fahrbahn der in der Datenbank enthaltenen Chloridprofile, respektive den vertikalen Abstand zur Fahrbanoberfläche, welche für die Chloridbeaufschlagung massgeblich ist. Bei einigen Bauwerken erfolgte die Probeentnahme auch unterhalb der Fahrbahn, weshalb der

Wertebereich von - 2 m bis 8 m über der Strasse reicht. Negative Werte im Vergleich fanden sich bei Bauwerksarten: «Brücke», «Stützbauwerk», «Galerie» und «Überführung». Wie erwartet, befindet sich der Grossteil der Chloridprofile in einer Höhe von 0 bis 2 m über der Fahrhahnoberkante.

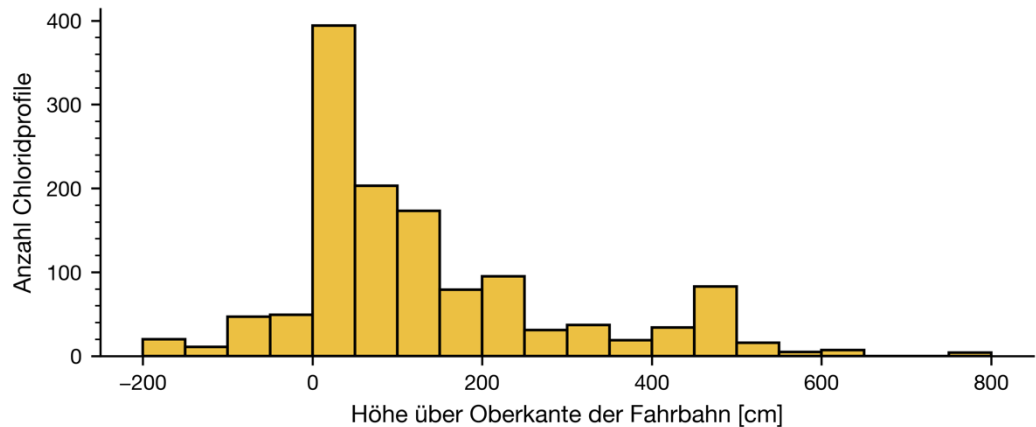


Abbildung 51: Histogramm der vertikalen Distanz zwischen dem Ende der Fahrspur und der exponierten Betonoberfläche, wo das entsprechende Chloridprofil entnommen worden ist.

Abbildung 52 zeigt den Chloridgehalt auf Tiefenstufe 10-20 mm als Funktion der Höhe über Oberkante Fahrbahn mit über 700 Datenpunkten. Es ist ersichtlich, dass die Chloridgehalte mit ansteigender Höhe über Fahrbahn tendenziell abnehmen. Jedoch finden sich auch in Bereichen mit geringer Höhe über Fahrbahn (z. B. unterhalb 1 m) Datensätze mit geringem Chloridgehalt, was – wie erwartet – darauf hinweist, dass auch andere Parameter nebst der Höhe über Fahrbahn einen Einfluss haben.

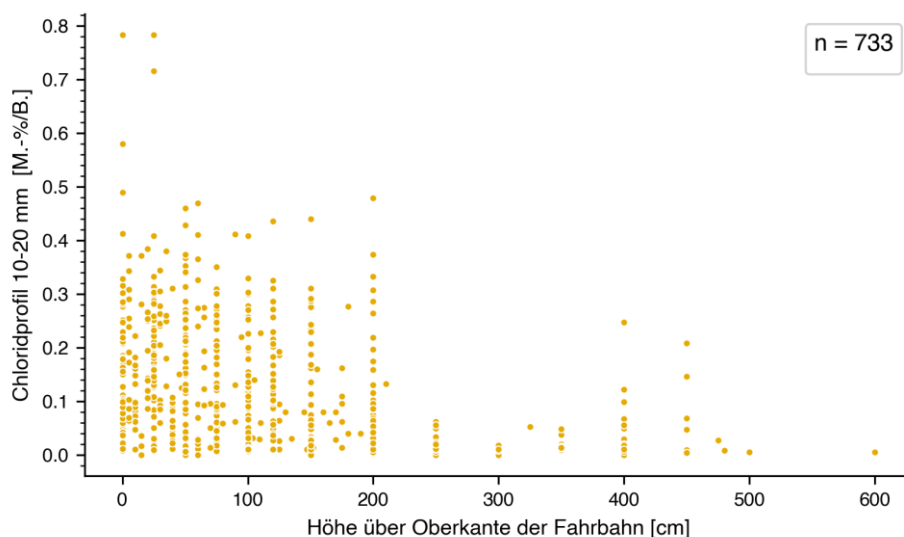


Abbildung 52: Chloridgehalt auf Tiefenstufe 10-20 mm als Funktion der Höhe über Fahrbahn. Nur Daten mit positiver Höhe über Fahrbahn berücksichtigt, sowie spezielle Expositionsfälle (Einzelfälle in der Datenbank), namentlich «Fliesspuren», «Hohlstellen», etc. und Bauwerke/-teile («Überführungen», «Träger», etc.) ausgeschlossen.

4.1.8.3 Strassenart

Der grösste Teil der Datensätze in der Datenbank steht im Zusammenhang mit Bauwerken an Nationalstrassen (knapp 1000 Fälle, was knapp 60% aller erfassten Chloridprofile entspricht). An zweiter Stelle folgen die Kantonsstrassen mit 381 Chloridprofilen bzw. 19,8%. Die restlichen Nennungen betrafen Zufahrtsstrasse, Hauptstrasse, Dorfstrasse oder keine Angabe. Der hohe Anteil an Einträgen entlang von Nationalstrassen reflektiert die prioritäre Behandlung dieser Strassenart bei der Datenerhebung, wie dies vorgesehen war.

4.1.8.4 Durchfahrtsgeschwindigkeit

Die Auswertung der Durchfahrtsgeschwindigkeiten basiert auf einzelnen Profilen und nicht auf den Bauwerken selbst (siehe Tabelle 12). Am häufigsten kam die Durchfahrtsgeschwindigkeit 80 km/h vor. Dieser Wert wurde bei 818 Profilen erfasst, was knapp die Hälfte aller Datenbankinträge ausmacht. An zweiter Stelle folgt eine Geschwindigkeit von 120 km/h mit 442 Profilen. Die weiteren Angaben verteilen sich auf Geschwindigkeiten zwischen 60 und 30 km/h. Bei rund 5% wurde keine Angabe über die Durchfahrtsgeschwindigkeit in der Datenbank hinterlegt.

Damit entspricht die Mehrzahl der Datenbankinträge Durchfahrtsgeschwindigkeiten wie sie auf Nationalstrassen üblich sind (80-120 km/h).

Durchfahrtsgeschwindigkeit	
Erfasste Durchfahrtsgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl Nennungen
120	442
100	50
80	818
60	60
50	236
30	8
Nicht angegeben	90

Tabelle 12: Erfasste Durchfahrtsgeschwindigkeit der Fahrzeuge bei der Entnahmestelle der in der Datenbank enthaltenen Chloridprofilen.

4.1.8.5 Bewittert

Der Parameter „bewittert“ erforderte einige bereinigende Vorarbeiten, da dieser nicht immer korrekt gemäss Kapitel 3.1.3.11 erfasst wurde. Zur Bereinigung wurde unter anderem der Expositionsparameter verwendet, der spezifisch angibt, wo Einträge wie beispielsweise unter Belag oder Betonlage lokalisiert sind. Zudem wurde der Parameter „bewittert“ modifiziert, da teilweise Einträge unter „Abdichtung“ oder erneut unter „Belag“ erfasst wurden. Bei sämtlichen Bauwerksarten liessen sich sowohl «bewitterte» als auch «unbewitterte» Bauteile finden.

Schlussendlich lässt sich feststellen, dass rund 68 % der Chloridprofile als «unbewittert» klassifiziert werden, während knapp 30 % als bewittert gelten. Bei weniger als 3% bleibt der Parameter nicht erfasst.

Abbildung 53 illustriert den Einfluss der Bewitterung auf den maximalen Chloridgehalt im Beton für verschiedene Bauwerksarten. Dabei wird jeweils der mittlere Maximalwert der Chloridkonzentration separat für bewitterte und unbewitterte Bauteile

dargestellt. Je nach Bauwerksart ist der durchschnittliche maximale Chloridgehalt höher bei bewitterten oder unbewitterten Bauteilen (Brücke, Unterführung, Tunnel), auch wenn die Unterschiede kaum statistische Signifikanz aufweisen. Auf Stufe «Bauwerksart» lässt sich kein eindeutiger Trend feststellen. Eine mögliche Ursache für die uneinheitlichen Befunde könnten unterschiedliche Mikroklimata sein, die je nach Bauwerksgeometrie und Umgebung variieren und die Chloridexposition lokal beeinflussen.

Dieser Befund bedeutet, dass die Bewitterung kein stark dominierender Faktor ist, der die Chloridbelastung massgeblich allein bestimmt.

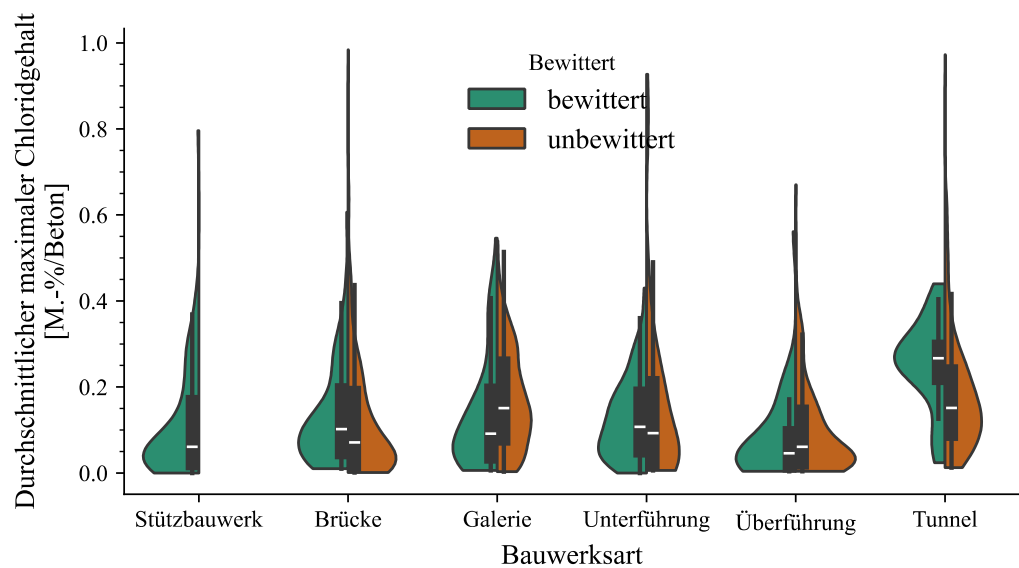


Abbildung 53: Einfluss der Bewitterung auf den durchschnittlichen maximalen Chloridgehalt in Abhängigkeit der Bauwerksart.

4.1.8.6 Zementgehalt, -art und W/Z-Wert

Die Zementart war bei nur 258 Chloridprofilen angegeben und in Abbildung 54 als Kuchendiagramm dargestellt. In über 90% der Angaben war die Planangabe, dass ein reiner Portlandzement verwendet wurde. Neben den vorwiegend reinen Portlandzementen wurden auch einige Betone, welche Silikastaub, Flugasche oder Hüttensand enthielten, berücksichtigt. Dieser Befund entspricht auch der Erwartung, da es in der Schweiz lange übliche Praxis war, reinen Portlandzement für den Infrastrukturbau zu verwenden.

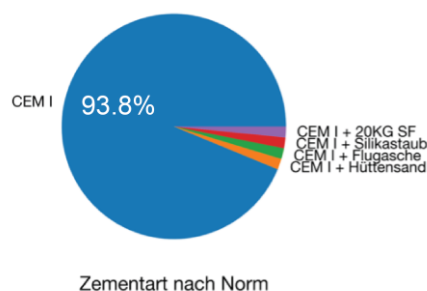


Abbildung 54: Aufschlüsselung des Parameters Zementart nach Norm aus der Chloridatenbank.

Tabelle 13 zeigt die detaillierte Zusammenstellung der angegebenen Zementgehalte in der Datenbank. Für die meisten Chloridprofile waren keine Informationen verfügbar. Bei 153 Chloridprofilen war der Zementgehalt bei 300 kg/m³. Der maximale Zementgehalt betrug 367 kg/m³ und wurde bei vier Profilen angegeben. Bei rund 16 Angaben des Zementgehaltes handelt es sich um Portlandkompositzement mit Zugabe von Zuschlagsstoffen.

Zementgehalt		
Zementgehalt [kg/m³]	Anzahl Chloridprofile	Bemerkung
300	153	
325	20	
350	12	
367	4	
249 + 50	4	CEM I und Hüttensand
269+40	2	CEM I + Flugasche
277+19	4	CEM I + Silikastaub
249+40	2	CEM I + Flugasche
305 + 20	4	CEM I + Silikastaub
n.a.	1466	Nicht angegeben oder unbekannt

Tabelle 13: Zementgehalt in der Datenbank

Der Wasser-Zement-Wert schwankte zwischen 0.35 und 0.5 und war bei 28 Chloridprofilen angegeben. Eine Übersicht findet sich in Abbildung 55. Für die Mehrheit der Chloridprofile (über 1'400 Einträge) war kein Zementgehalt erfasst oder die Information war nicht verfügbar.

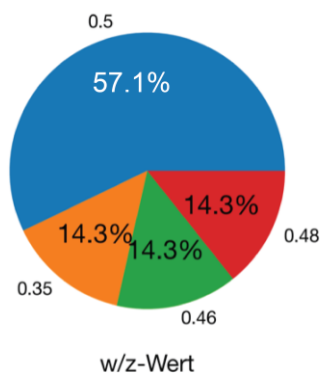


Abbildung 55: Angegebene Wasser-Zemente-Werte im Datensatz.

Die geringe Datenverfügbarkeit schränkte die direkte Nutzbarkeit dieser Parameter für weitergehende Modellierungen ein.

4.1.8.7 Meteorologische Daten

Von den 281 vorhandenen Wetterstationen wurden 51 nach den eingeführten Kriterien auf die Chloridprofile zugeordnet, wovon die durchschnittliche Verfügbarkeit der zugeordneten Daten 59.8% war, beobachtet über die Messperiode von 1949 – 2022.

Die zeitliche Entwicklung der Tagesneuschneehöhen aller Wetterstationen ist in Abbildung 56 ersichtlich. Wie zu erkennen, unterliegen die Messungen Fluktuationen über die Monate, wie auch Jahre. Diese gemessenen Fluktuationen (Variationskoeffizient) nehmen tendenziell mit sinkender Messstationshöhe zu, wie in Abbildung 57 ersichtlich.

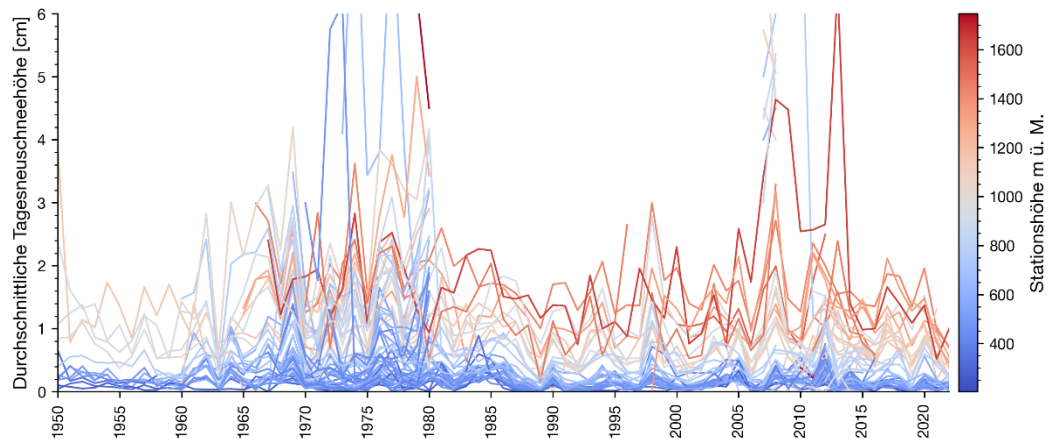


Abbildung 56: Entwicklung der Tagesneuschneehöhe über die betrachtete Zeitspanne aller Wetterstationen, die den in der Datenbank enthaltenen Bauwerken zugeordnet wurden.

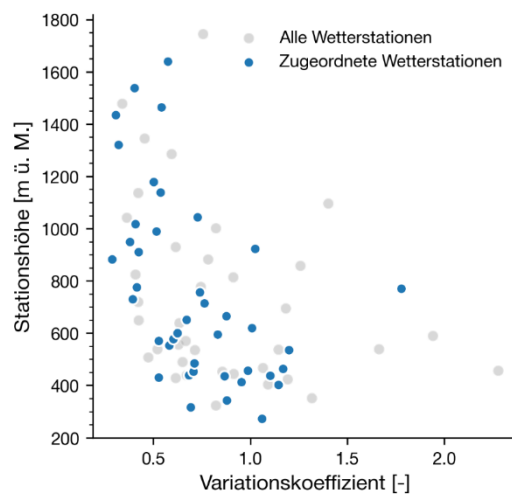


Abbildung 57: Variationskoeffizienten der Wetterdaten der zugeordneten Wetterstationen der durchschnittlichen Tagesneuschneehöhen über die betrachtete Zeitspanne.

Um grössere Variationen und Datenlücken (siehe Abbildung 58) innerhalb des Datensatzes einer Messstation nicht gesondert berücksichtigen zu müssen, wird über die vorhandenen Messperioden ein Gesamtmittel bezüglich der Neuschneehöhe berechnet. Dieser Wert soll als Grundlage für weitere Analysen dienen. Die Verteilung der berechneten Gesamtmittel, welche auf die Chloridprofile zugeordnet wurden, sind in Abbildung 58 ersichtlich. Die Daten, welche auf die Chloridprofile zugeordnet werden, sollen als eine Annäherung betrachten werden, wie in Abbildung 59 illustriert, die mittlere horizontale und vertikale Distanz zwischen Wetterstationen und Chloridprofilen 9103 m, respektive 96 m ist. Aufgrund dieser Distanzen ist bei der Interpretation der meteorologischen Einflussgrößen eine gewisse Unsicherheit zu berücksichtigen.

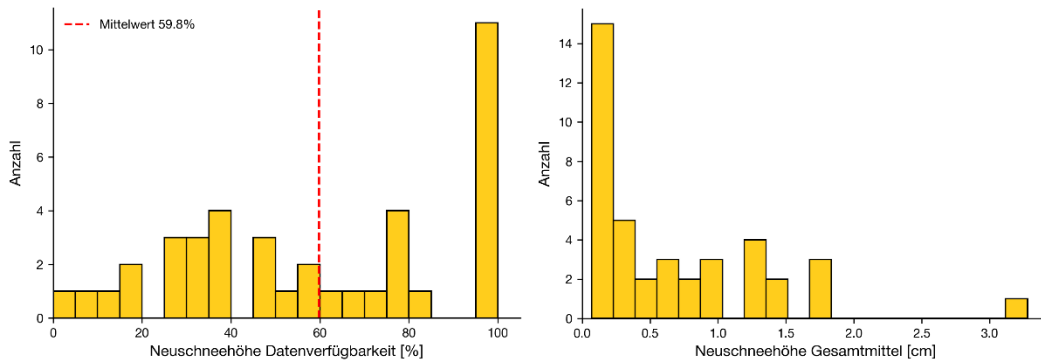


Abbildung 58: Links: Datenverfügbarkeit der zugeordneten Wetterstationen. Rechts: Gesamtmittel über die Messperiode der Neuschneehöhen der zugeordneten Wetterstationen.

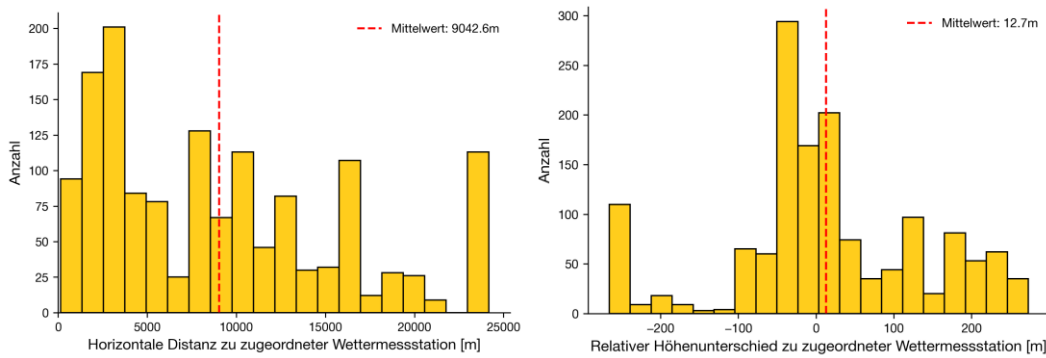


Abbildung 59: Links: Höhenunterschied von Chloridprofilen und zugeordneten Wetterstationen. Rechts: Horizontale Distanz von Chloridprofilen zu den zugeordneten Wetterstationen.

4.1.8.8 Verkehrsdaten

Die zeitliche Entwicklung des durchschnittlichen täglichen Verkehrsaufkommens (DTV) an den zugeordneten Zählstationen ist in Abbildung 60 dargestellt. Wie zu erkennen ist, unterliegen die Aufzeichnungen klaren zeitlichen Schwankungen, welche sich periodisch (saisonal) zu wiederholen scheinen.

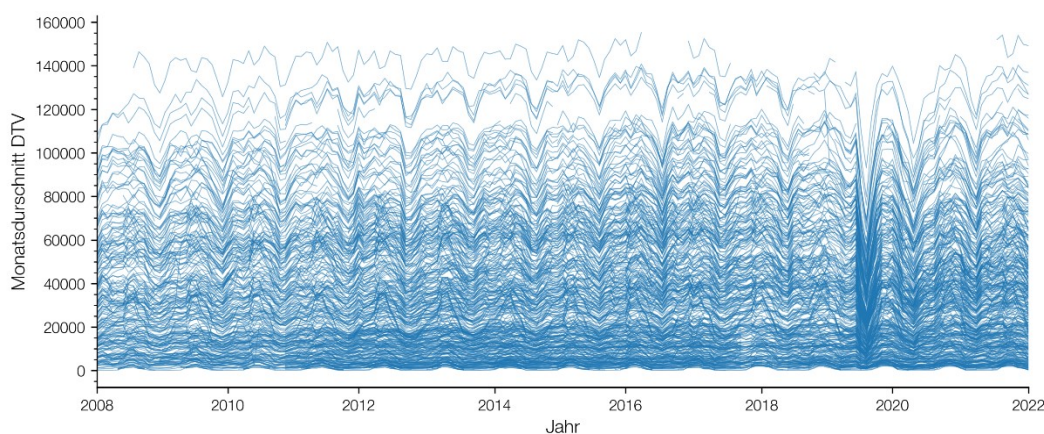


Abbildung 60: Entwicklung des Monatsdurchschnitt des Durchschnittlichen Tagesverkehr (DTV) aller den in der Datenbank enthaltenen Datensätzen zugeordneten Zählstationen.

Es kann aber gesehen werden, unter anderem auch in Abbildung 61, dass die Messwerte pro Station über die gesamte Messperiode um einen relativ konstanten Mittelwert schwanken. Dies erlaubt die Vereinfachung, für jede Zählstation einen einzigen mittleren DTV-Wert als repräsentativ zu verwenden.

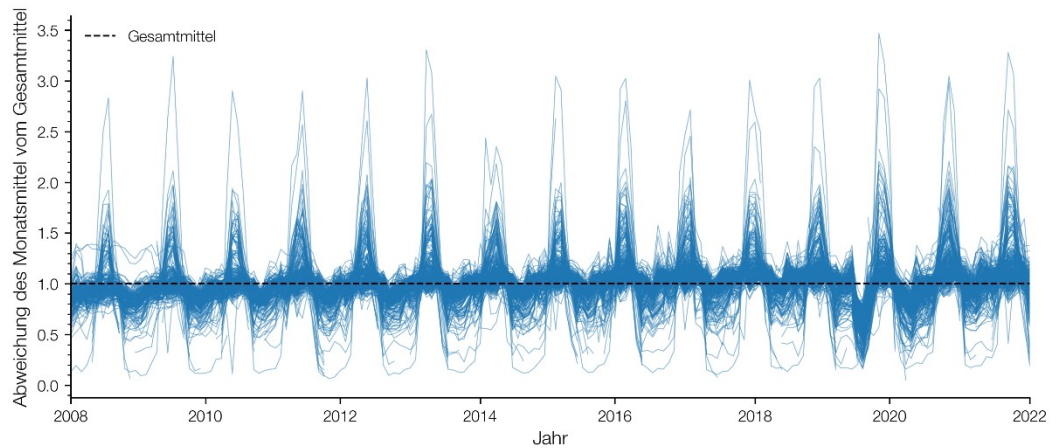


Abbildung 61: Abweichung des monatlichen Mittel des Durchschnittlichen Tagesverkehr (DTV) vom Gesamtmittel für jede Zählstation.

Von den 528 analysierten DTV-Zählstationen konnten 63 Stationen eindeutig den Chloridprofilen zugeordnet werden. Die durchschnittliche Datenverfügbarkeit dieser Stationen über den Messzeitraum von 2008 bis 2022 beträgt 79 % (vgl. Abbildung 63).

Wie in Abbildung 62 illustriert kann ein qualitativer Zusammenhang zwischen tiefen DTV Mittelwerten und einem höheren Variationskoeffizienten festgestellt werden. Umgekehrt weisen Stationen mit hohem durchschnittlichem Verkehrsaufkommen eine geringere Streuung auf. Die Mehrheit der den Chloridprofilen zugeordneten Stationen gehört zur letzteren Gruppe mit hohen DTV-Werten und stabiler Verkehrsbelastung (vgl. Abbildung 62 und Abbildung 63).

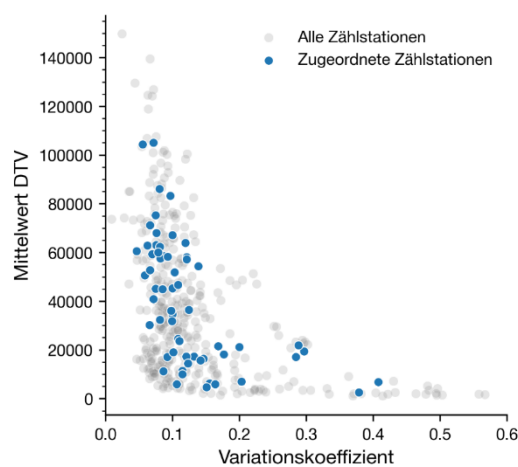


Abbildung 62: Verteilung der Variationskoeffizienten des monatlichen Mittel der Durchschnittlichen Tagesverkehrsdaten (DTV) über die betrachtete Zeitspanne.

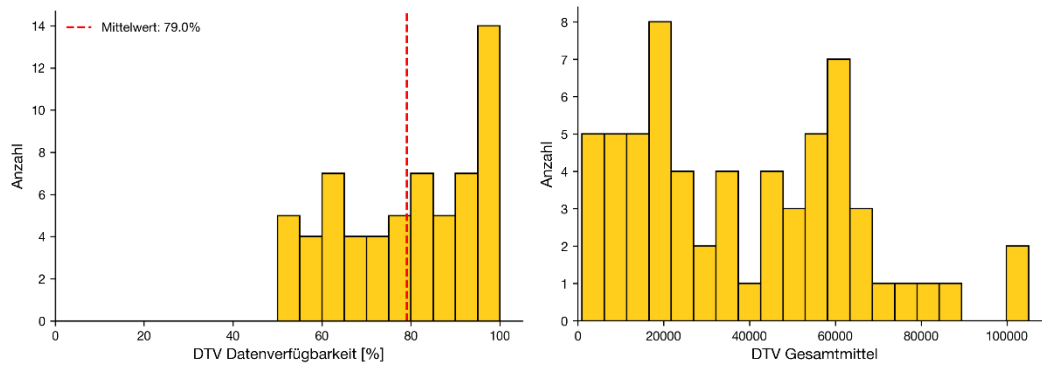


Abbildung 63: Links: Datenverfügbarkeit der ausgewählten DTV Zählstationen über gesamte Messperiode, Rechts: Mittel der ausgewählten DTV Zählstationen über die gesamte Messperiode.

Abbildung 64 zeigt die Chloridkonzentration im Beton der unterschiedlichen Zielvariablen vs. DTV. Für die Definitionen der Zielvariablen sei auf Tabelle 7 verwiesen. Es zeigt sich kein direkter Trend, also beispielsweise keine systematische Zunahme des Chloridgehalts im Beton mit zunehmender Verkehrsbelastung der Strasse.

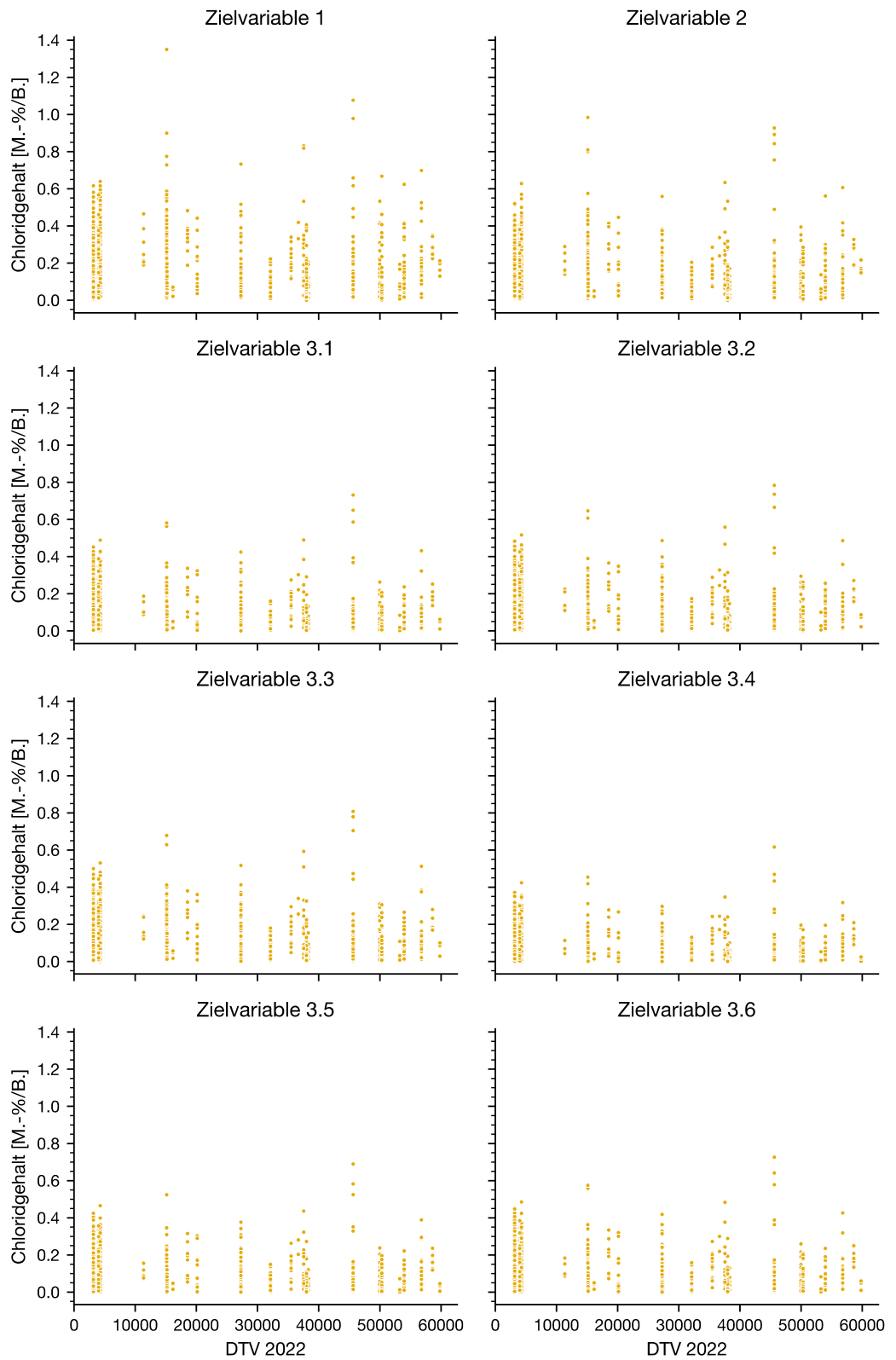


Abbildung 64: Vergleich des Chloridgehaltes der 8 Zielvariablen gegenüber dem DTV des Jahres 2022.

4.1.8.9 Winkel relativ zur Vertikalen

Abbildung 65 stellt den Winkel relativ zur Vertikalen in Abhängigkeit von der Anzahl der Nennungen in der Datenbank dar. Der häufigste aufgeführte Wert war mit etwa 200 Einträgen eine Exposition 0-Grad-Winkel, gefolgt von einem 90-Grad-Winkel bei über 100 Einträgen. Die restlichen Einträge befinden sich zwischen 270-Grad und leicht über 90 Grad. Die vergleichsweise geringe Streuung der Winkelangaben deutet darauf hin, dass vor allem vertikale oder nahezu vertikal orientierte Flächen in die Datenerhebung aufgenommen wurden

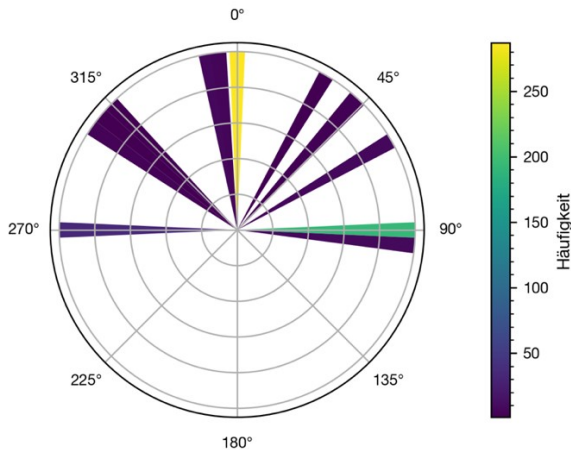


Abbildung 65: Auswertung des Parameters «Winkel relativ zur Vertikalen».

4.1.8.10 Winkel des Bauwerks im Grundriss relativ zur Fahrspur

Der Parameter «Winkel der Betonoberfläche relativ zur Fahrspur im Grundriss» wurde bei etwa 30% der erfassten Chloridprofile dokumentiert. Die häufigste Angabe war mit rund 27% eine Abweichung von 0 Grad. In etwa 13 Fällen wurde ein Wert von -90 Grad in der Datenbank verzeichnet. Viermal wurde der Wert 45 Grad und dreimal der Eintrag «0 Grad (Rückseite)» erfasst. Die übrigen, vereinzelt Messwerte streuten zwischen -135 und 38 Grad.

4.1.8.11 Längsneigung

Die Längsneigung wurde nur bei einem minimalen Anteil der Datenbankeinträge erfasst, da der Parameter nur für Tunnelbauwerke erfasst wurde. Insgesamt wurden 32 Proben mit einer Längsneigung von 0 Grad erfasst, während 7 Proben eine Längsneigung von -5 Grad und 3 Profile eine Längsneigung von 5 Grad zugeordnet bekommen haben. Die geringe Anzahl verfügbarer Werte lässt keine fundierte statistische Analyse zu.

4.1.8.12 Verkehrsregime

Das Verkehrsregime wurde lediglich bei der Bauwerksart «Tunnel» erfasst. Insgesamt wären über 220 Chloridprofile verfügbar gewesen, jedoch wurden lediglich 41 mit Richtungsverkehr erfasst, und einmal wurde Gegenverkehr dokumentiert. Bei den verbleibenden 162 Chloridprofilen sind keine Werte hinterlegt. Aus diesem Grund kann dieser Parameter nur sehr begrenzt bei der Auswertung berücksichtigt werden.

4.1.8.13 Distanz zum Portal

Die Distanz zum Portal wurde bei Bauwerken der Art Tunnel erfasst. Die meisten Chloridprofile wurden in den ersten hundert Metern der Portalbereiche aufgenommen (vgl. Abbildung 66).

Der gesamte Wertebereich erstreckt sich jedoch bis zu 700 Meter davon entfernt. Die Verteilung der Daten lässt darauf schliessen, dass die Entnahmeorte der Chloridprofile auf ungefähr 100 Meter Genauigkeit geschätzt wurden, sobald die Distanz zum Portal 100 Meter überschritten hatte.

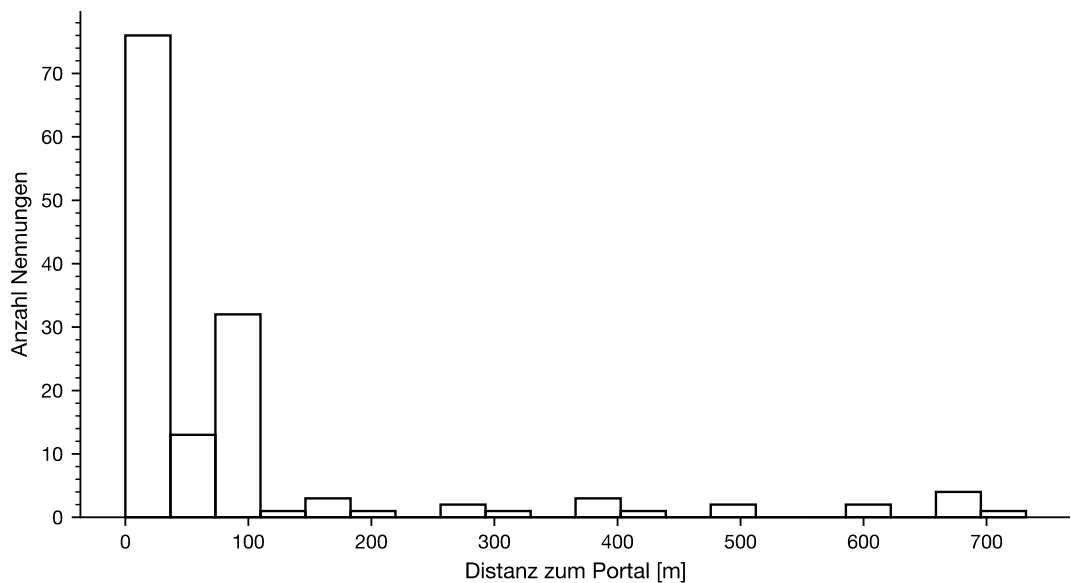


Abbildung 66: Histogramm des Parameters «Distanz zum Portal».

Abbildung 67 zeigt die räumliche Verteilung des maximalen Chloridgehalts in Tunnelbauwerken in Abhängigkeit von der Distanz zum Portal und der Höhe über OK Fahrbahn. Zur besseren Interpretation wurden die Chloridkonzentrationen in fünf Klassen unterteilt. Hohe Konzentrationen finden sich nahezu ausschliesslich in Höhenbereichen bis ca. 150 cm über der Fahrbahn.

In grösseren Höhen über Fahrbahn oberhalb von ca. 200 cm wurden kaum erhöhte Chloridwerte gemessen. Dies ist auf Grund der Datenlage aber mit Vorsicht zu betrachten.

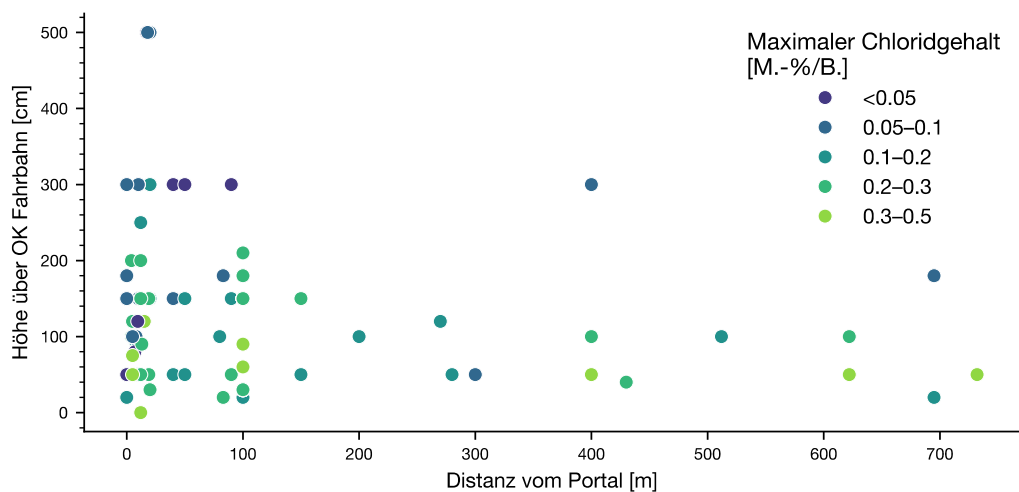


Abbildung 67: Räumliche Verteilung des maximalen Chloridgehalts abgestuft in 5 Klassen in Tunnelbauwerken in Abhängigkeit von der Distanz zum Portal und der Höhe über OK Fahrbahn.

4.1.8.14 Bemerkungen

Je nach Chloridprofil wurden Bemerkungen bezüglich spezieller Eigenschaften des Bauwerks, der Lage oder anderer Faktoren hinzugefügt. Die Art und die Anzahl der Bemerkungen sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

Bemerkungen	
Bemerkung	Anzahl
XD1/XD3	56
Fliessspuren	47
Brückenplatte	9
Riss	9
Vorspannung	8
Hohlstelle	6
Abplatzung	5
Brückenplatte in der Nähe einer Fuge	4
Brückenplatte Untersicht	4
Untersicht	4
Rostspuren	3
Aussinterungen	2
Fuge	1
Andere	14

Tabelle 14: Art und Anzahl der Bemerkungen der Datenaufnahme.

Am häufigsten wurden Bemerkungen zur Expositionsklassenzuordnung «XD1/XD3» (56 Nennungen) sowie zu «Fliessspuren» (47 Nennungen) dokumentiert. Weitere wiederkehrende Angaben betrafen u. a. Brückenplatten, Rissbildungen, Vorspannungen oder Hohlstellen. Einige Bemerkungen verweisen auf spezifische Schäden oder

konstruktive Details, wie etwa «Abplatzung» oder «Brückenplatte in der Nähe einer Fuge».

Zur Einordnung der qualitativen Bemerkungen in Bezug auf die Chloridbelastung wurde untersucht, ob bestimmte Einträge im Feld «Bemerkungen» systematisch mit erhöhten Chloridgehalten einhergehen. Dazu wurden ein Teil der häufigsten Einträge aus dem Freitextfeld der Datenbank nach inhaltlich verwandten Kategorien bereinigt (z. B. „Fliesspuren“, „Riss“, „Hohlstelle“) und mit den jeweils zugehörigen maximalen Chloridgehalten in Beziehung gesetzt. Es wurden diejenigen priorisiert selektiert, welche potenziell zu erhöhten Chloridgehalten geführt haben.

Abbildung 68 zeigt die Übersicht mit dem Mittelwert der maximalen Chloridwerte. Beim Eintrag «Fliesspuren» liegt die Mehrzahl der Einträge unter dem Mittelwert, die Streuung hingegen ist hoch. Bei «Hohlstellen» liegt die Mehrzahl der Einträge über dem Mittelwert, für Risse tendenziell unter dem Mittelwert, hingegen bei Abplatzungen gerade die Hälfte über resp. unter dem Mittelwert. Für die beiden letztgenannten liegen jedoch zu wenig Werte für eine fundierte Interpretation vor.

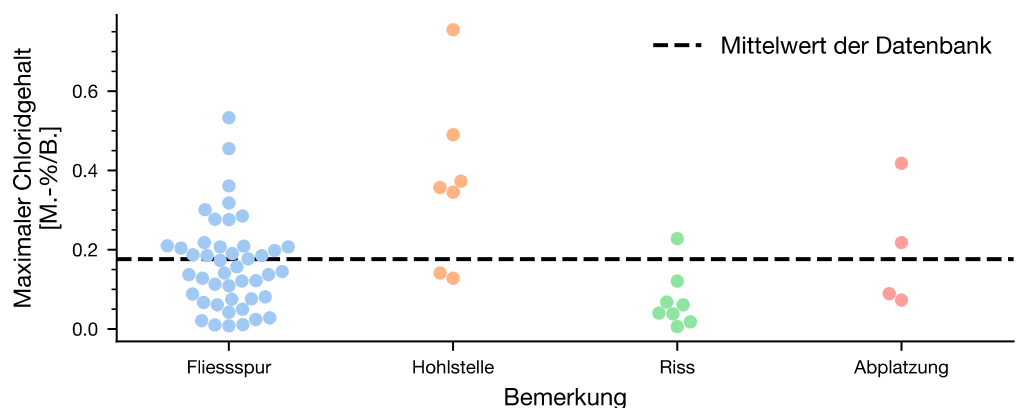


Abbildung 68: Schwarm der maximalen Chloridgehalte [M.-%/B.] für ausgewählte Einträge im Feld «Bemerkungen» aus der Datenbank mit Angabe des Mittelwertes sämtlicher Einträge.

4.1.8.15 Oberflächenschutzsystem und qualitative Einschätzung

In diesem Abschnitt wird das Oberflächenschutzsystem (OS) in Kombination mit der qualitativen Einschätzung der Dichtheit ausgewertet. Abbildung 69 zeigt ein gruppiertes Balkendiagramm mit einer unterbrochenen y-Achse, das die Häufigkeitsverteilung verschiedener Oberflächenschutzsysteme (vgl. Kapitel 3.1.3.29) in Kombination mit einer qualitativen Dichtheitsbewertung veranschaulicht (vgl. Kapitel 3.1.3.30). Die horizontale Achse listet die verschiedenen OS-Typen auf, darunter Anstrichbeschichtungen, OS9 sowie nicht spezifizierte oder unbekannte Systeme. Die vertikale Achse ist aufgrund stark variierender Häufigkeiten in zwei Bereiche unterteilt: Der untere Bereich skaliert von 0 bis 350 für die Darstellung häufiger bis mittlerer OS-Typen, während der obere Bereich ab etwa 800 für die Darstellung stark überrepräsentierter OS-Kategorien «unbekannt» dient. Diese Art Darstellung ermöglicht trotz der ungleichmässigen Verteilung der Häufigkeiten einen direkten Vergleich zwischen den verschiedenen OS-Typen und deren jeweiligen Dichtheitsbewertungen.

Besonders hervorzuheben ist die Kategorie «unbekannt», die mit über 900 Einträgen die mit Abstand höchste Häufigkeit aufweist. Diese Überrepräsentation erforderte die Verwendung einer unterbrochenen Achse im Diagramm. Die Farbkodierung in der Legende gibt Aufschluss über die Häufigkeit, mit der ein OS-Typ als 'eher dicht', 'eher undicht', 'keine Bewertung' oder 'unbekannt' eingestuft wurde. Die qualitative Einschätzung durch die Experten/innen zeigt eindeutig auf, dass kaum «eher dichte» OS vorgefunden wurden.

Aufgrund des grossen Anteils an Datensätzen mit «unbekannter» OS-Art und Wirksamkeit erscheint es schwierig, den Einfluss der OS auszuwerten.

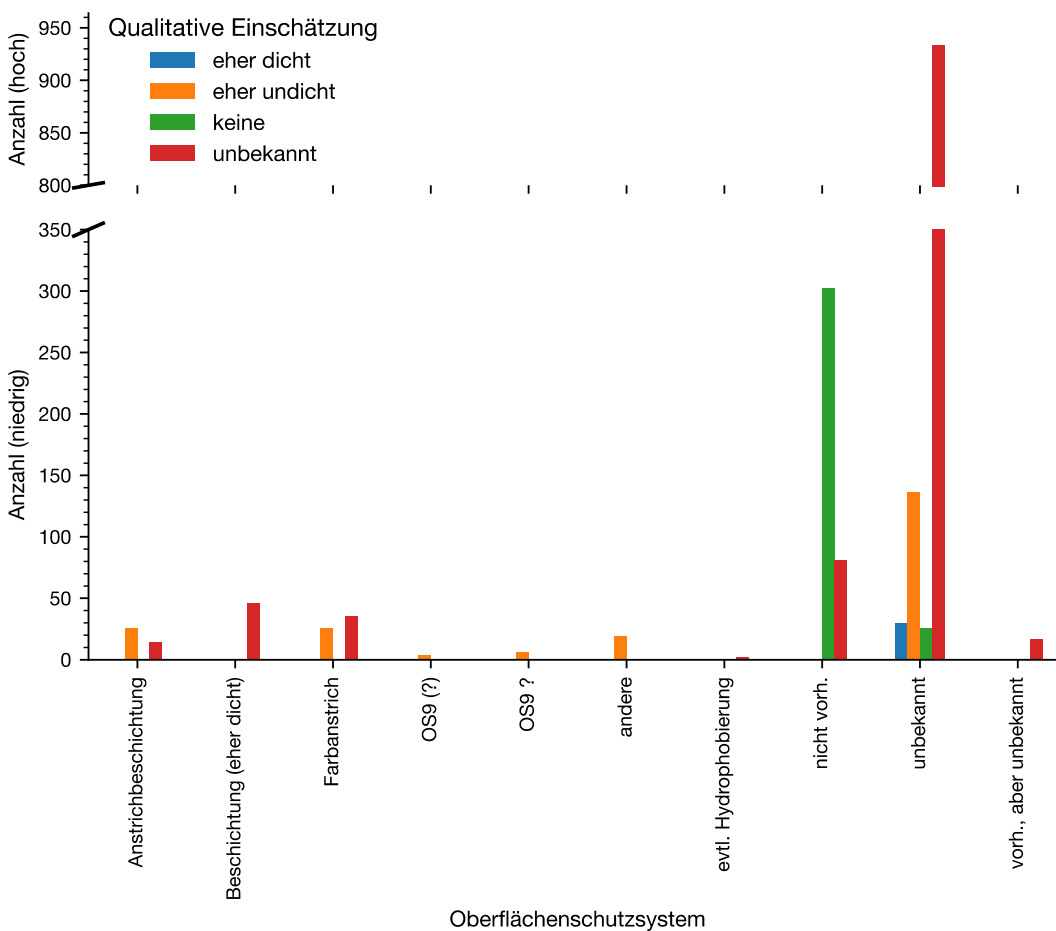


Abbildung 69: Häufigkeit verschiedener Oberflächenschutzsysteme in Kombination mit der qualitativen Einschätzung der Dichtheit; Darstellung mit gebrochener y-Achse zur besseren Vergleichbarkeit.

4.1.8.16 Abdichtung und qualitative Einschätzung

In diesem Abschnitt wird das Abdichtungssystem in Kombination mit der qualitativen Einschätzung der Dichtheit ausgewertet. Abbildung 70 zeigt ein gruppiertes Balkendiagramm mit gebrochener y-Achse, dass die Häufigkeit verschiedener Abdichtungssysteme in Verbindung mit der qualitativen Einschätzung der Dichtheit darstellt. Die qualitative Einschätzung ist farblich codiert und umfasst die Kategorien «eher dicht», «eher undicht», «keine Angabe» und «unbekannt». Die x-Achse listet unterschiedliche Abdichtungssysteme wie Asphalt, Beschichtung, Betonbelag oder Spachtel geklebt,

einschliesslich unbekannt und keine Abdichtung. Die y-Achse ist aufgeteilt in einen unteren Bereich (0–400) und einen oberen (ab 800), um die stark überrepräsentierte Kategorie „unbekannt“ darzustellen.

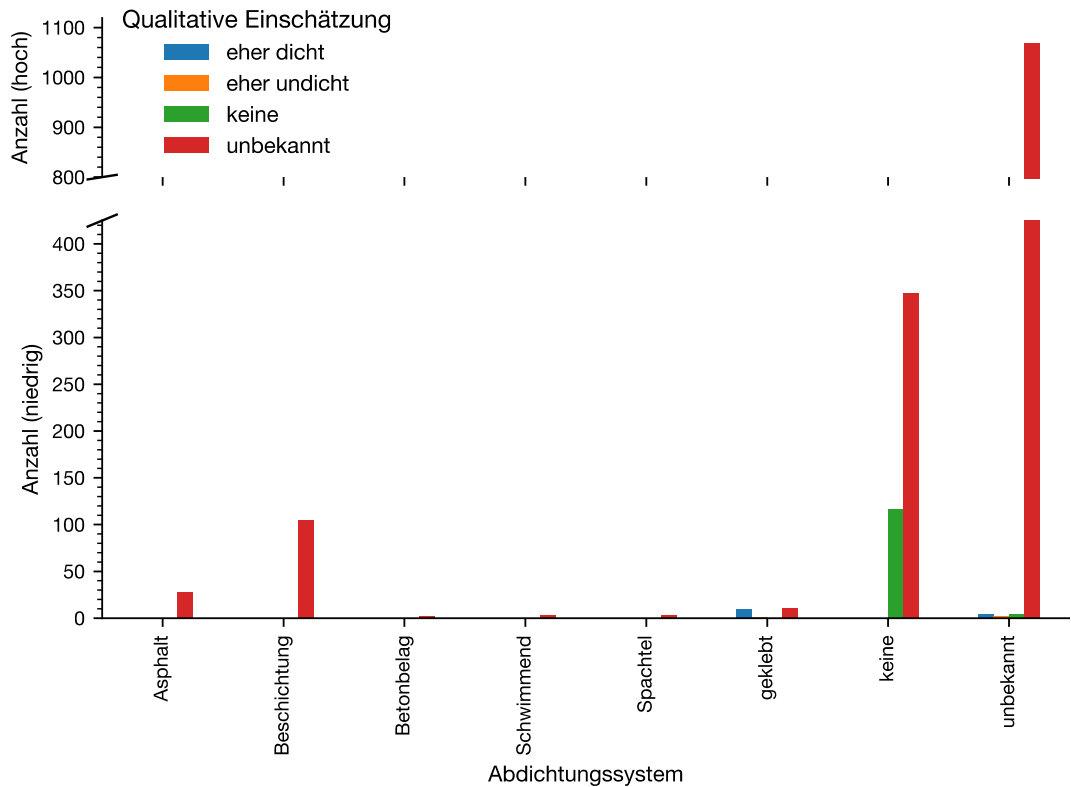


Abbildung 70: Häufigkeit verschiedener Abdichtungssysteme in Kombination mit der qualitativen Einschätzung der Dichtheit; Darstellung mit gebrochener y-Achse zur besseren Vergleichbarkeit.

Die Auswertung zeigt, dass bei den meisten Einträgen keine oder eine unbekannte Abdichtung in der Datenbank erfasst wurde. Nur wenige Einträge enthalten überhaupt eine qualitativ bewertete Abdichtung. Auch hier gilt deshalb, aufgrund des grossen Anteils an Datensätzen mit «unbekannter» Abdichtung bzw. Wirksamkeit, dass es nahezu unmöglich sein dürfte, mit dem vorliegenden Datensatz den Einfluss von Abdichtungen zu eruieren.

4.1.8.17 Betondruckfestigkeit

Das Histogramm in Abbildung 71 zeigt die Häufigkeitsverteilung der über 180 erfassten Betondruckfestigkeiten in der Datenbank an. Die Mehrzahl der Werte liegt um 80 N/mm², während eine relative Häufung bei etwa 95 N/mm² und rund 42 N/mm² zu beobachten ist. Der gesamte Wertebereich beginnt bei 45 N/mm² und reicht bis über 110 N/mm² und zeigt eine deutliche Streuung.

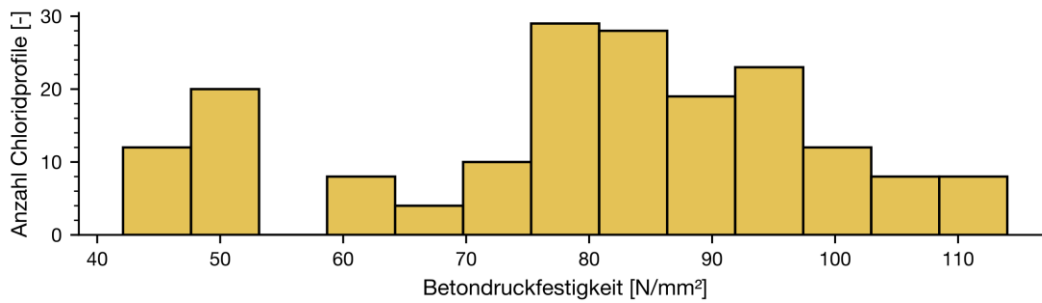


Abbildung 71: Histogramm der Betondruckfestigkeiten der in der Datenbank erfassten Einträge, mit Häufung um 80 N/mm².

Zur Ergänzung zeigt Abbildung 72 den Zusammenhang zwischen der Betondruckfestigkeit und dem Erstellungsjahr des Bauwerks. Während für ältere Bauwerke (bis ca. 1980) teilweise sehr hohe Festigkeiten über 100 N/mm² gemessen wurden, liegen die Werte für jüngere Bauwerke erwartungsgemäss tendenziell tiefer.

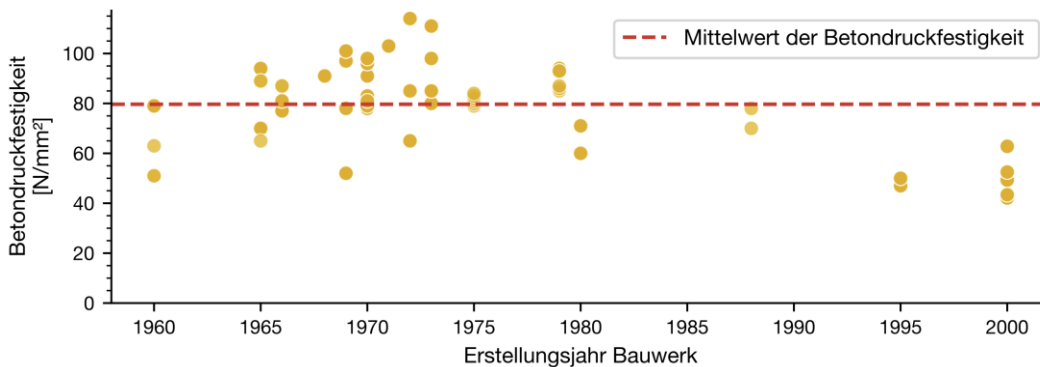


Abbildung 72: Zusammenhang zwischen Betondruckfestigkeit und dem Erstellungsjahr des Bauwerks.

4.1.8.18 Haftzugfestigkeit

Die Betonhaftzugfestigkeit war lediglich bei einem Bruchteil der Profile als Parameter erfasst. In diesem Zusammenhang wurden 11 unterschiedliche Werte ermittelt, die sich zwischen 1,5 und 4,7 N/mm² Haftzugfestigkeit bewegten.

4.1.8.19 Betonüberdeckung nach Plan

In der Datenbank war die geplante Betonüberdeckung für insgesamt 124 Chloridprofile dokumentiert. Die angegebenen Werte lagen zwischen 15 mm und 40 mm. Dabei entfielen 8 Einträge auf eine Überdeckung von 15 mm, 5 von 40 mm und 111 von 30 mm. Letzterer Wert stellt mit Abstand die häufigste Angabe dar

4.1.8.20 Gemessene Betonüberdeckung

Der Parameter «Betonüberdeckung gemessen (Mittelwert)» weist insgesamt über 700 Einträge auf. In einigen Fällen wurde zusätzlich dokumentiert, ob die Messung lokal bei der Entnahme des Bohrmehls oder des Bohrkerns durchgeführt wurde. In allen übrigen Fällen ist davon auszugehen, dass es sich um Werte handelt, die während der Bauwerkszustandserfassung erhoben wurden.

Das Histogramm in Abbildung 73 zeigt die Verteilung der gemessenen Mittelwerte der Betonüberdeckung in Millimetern. Die Verteilung weist ein ausgeprägtes Maximum im Histogramm bei rund 30 mm auf. Weitere, kleinere Häufungen sind im Bereich

zwischen 40 mm und 60 mm zu erkennen. Die Werte reichen von 0 mm bis leicht über 110 mm, was auf eine hohe Streuung hinweist.

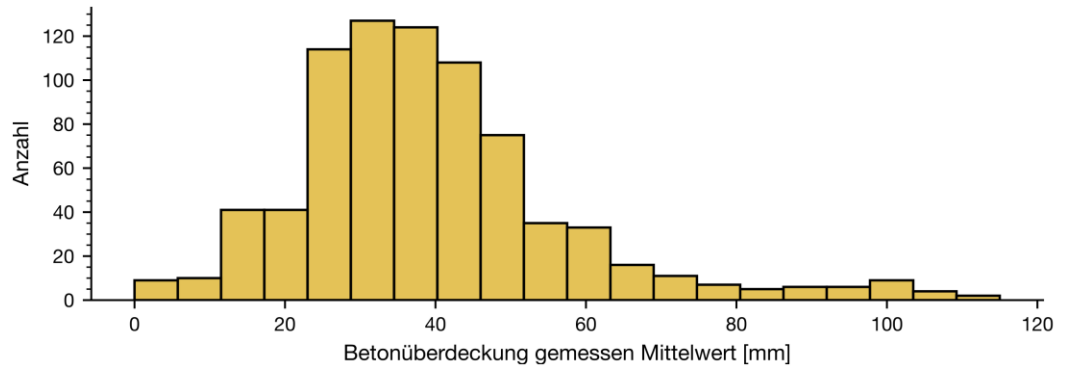


Abbildung 73: Histogramm der gemessenen Betonüberdeckung (Mittelwert).

Ergänzend zur Auswertung der gemessenen Betonüberdeckung wurde die Beziehung zwischen Bauwerksalter und Betonüberdeckung grafisch dargestellt. Abbildung 74 zeigt einen Scatterplot, in dem der Mittelwert der Betonüberdeckung gegen das Baujahr der jeweiligen Bauwerke aufgetragen ist. Die Grafik zeigt, dass Bauwerke aus den 1960er- und 1970er-Jahren tendenziell eine geringere Betonüberdeckung aufweisen, während bei jüngeren Bauwerken der Mittelwert der Überdeckung leicht ansteigt. Dies lässt sich mit den über die Zeit gestiegenen Anforderungen (aufgrund der schlechten Praxiserfahrungen) begründen.

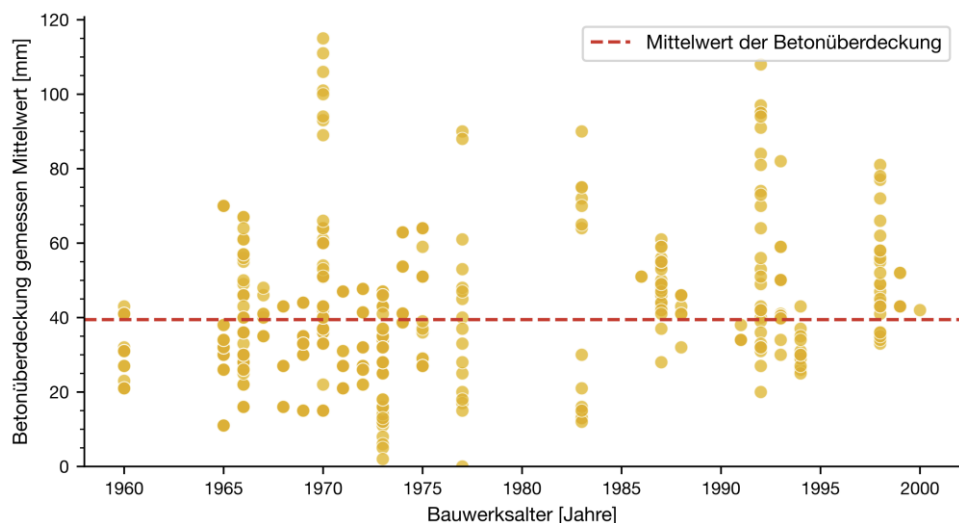


Abbildung 74: Zusammenhang zwischen dem Bauwerksalter und dem Mittelwert der gemessenen Betonüberdeckung.

4.1.8.21 Karbonatisierungstiefe Maximalwert

Abbildung 75 zeigt die maximale Karbonatisierungstiefe nach Bauwerksart. Die Werte variieren deutlich zwischen den Bauwerkskategorien. Besonders bei Unterführungen, Brücken und Überführungen treten höhere Maximalwerte mit Karbonatisierungstiefen von mehr als 60 mm auf.

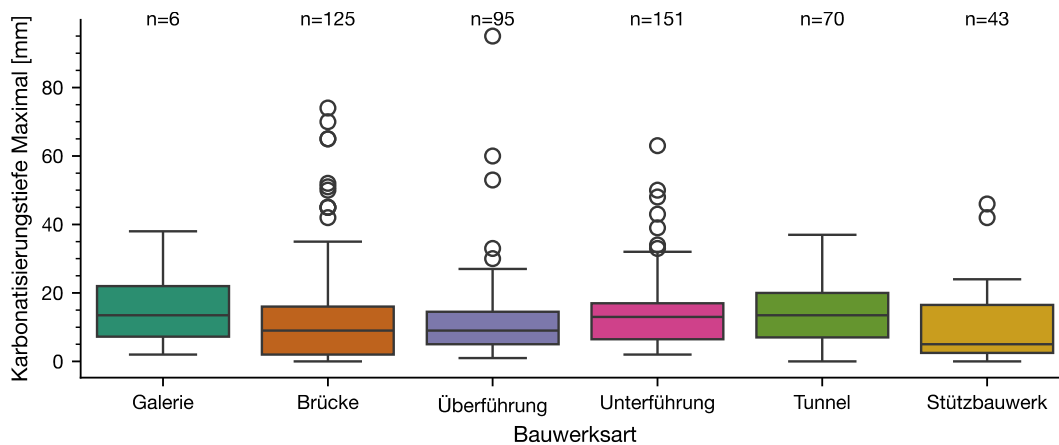


Abbildung 75: Boxplot der maximalen Karbonatisierungstiefe nach Bauwerksart.

Die Korrelation der Karbonatisierungstiefen wurde für alle Einträge der Datenbank berechnet, bei denen Minimal-, Mittelwert- und Maximalwert gleichzeitig vorlagen. Die Resultate zeigen eine starke lineare Beziehung zwischen Minimal- und Mittelwert (Korrelationskoeffizient 0.86) sowie zwischen Minimal- und Maximalwert (0.85). Auch zwischen Mittelwert und Maximalwert besteht eine hohe Korrelation von 0.80.

4.2 Datenauswertung und Datenanalyse

In diesem Kapitel werden die aufbereiteten Rohdaten in zielgerichtete Kenngrößen überführt und systematisch untersucht. Zunächst werden die acht Zielvariablen gemäss Tabelle 7 gebildet und statistisch beschrieben. Anschliessend folgt eine mehrstufige Analyse: lineare / nicht-lineare Zusammenhänge, kategoriale Einflüsse (ANOVA) sowie erste Prognoseversuche mit einfachen und komplexeren ML-Modellen.

4.2.1 Erstellung der Zielvariablen

Als erstes wurden die acht Zielvariablen gemäss Tabelle 7 generiert und statistisch untersucht. Abbildung 76 zeigt die Histogramme der acht Zielvariablen aus Tabelle 7. Sämtliche Verteilung sind rechtsschief und somit nicht normalverteilt. Der Wertebereich ist erwartungsgemäss für den Maximalwert des Chloridprofils (Zielvariable 2) am grössten und für die Chloridkonzentration in einer Tiefe von 30 mm bei einem Referenzzeitpunkt von 75 Jahren (Zielvariable 3.6) am kleinsten.

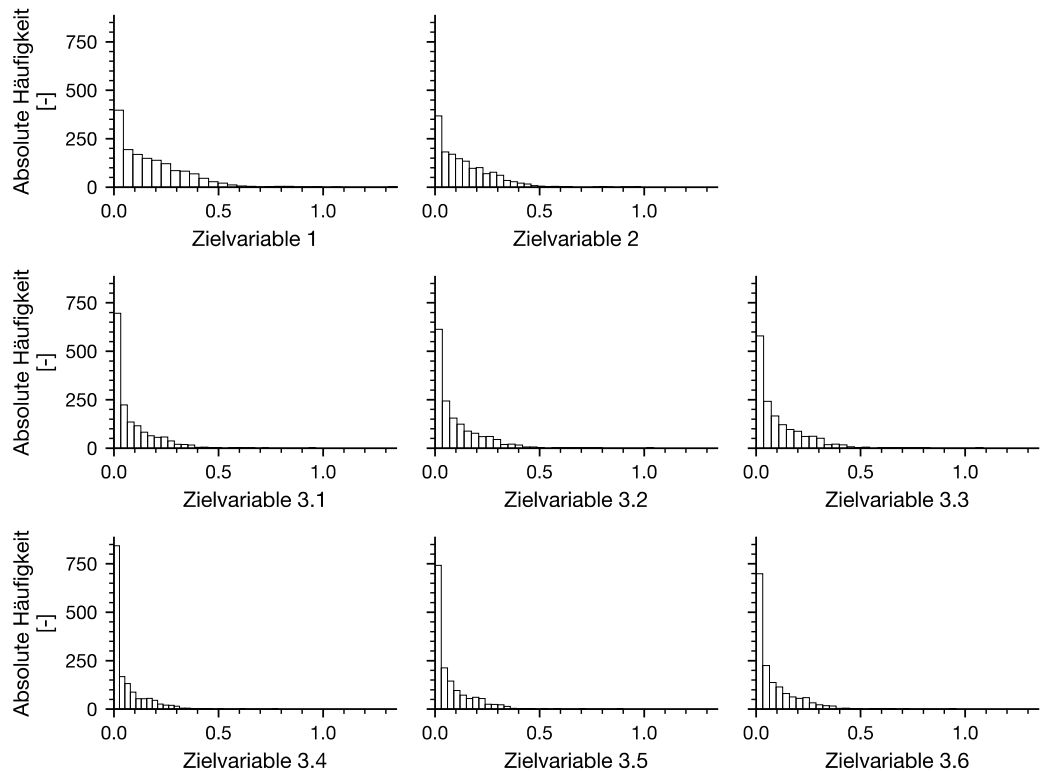


Abbildung 76: Histogramme der unterschiedlichen Zielvariablen aus Tabelle 7 (Einheit der x-Achse: Chloridgehalt bezogen auf das Betongewicht).

Abbildung 77 zeigt die Mittelwerte der verschiedenen Zielvariablen. In dieser Grafik wird deutlich, dass der Chloridgehalt mit einer rechnerischen Verlängerung der Expositionszeit ansteigt. Dies ist insbesondere bei den Variablen 3.1 bis 3.3 (20 mm Überdeckung) sowie den Zielvariablen 3.4 bis 3.6 (30 mm Überdeckung) zu beobachten. Sämtliche Zielvariablen sind rechtsschief mit einem Variationskoeffizient zwischen 0.4 und 0.8.

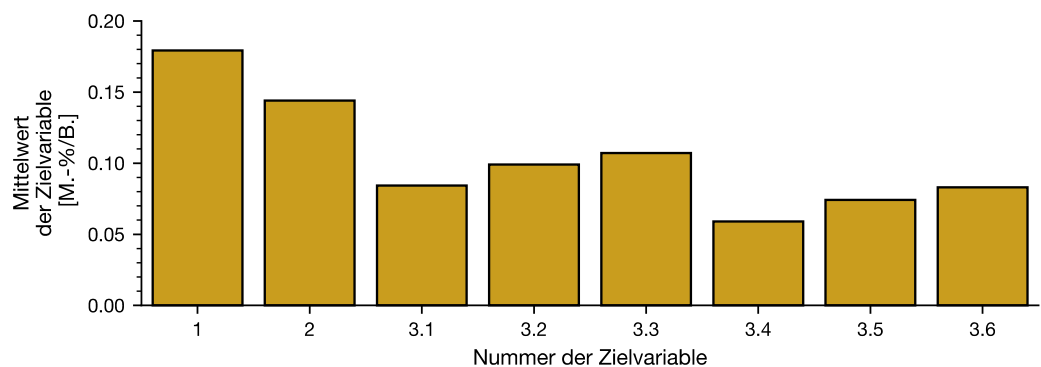


Abbildung 77: Mittelwerte der acht unterschiedlichen Zielvariablen aus Tabelle 7.

4.2.2 Statistische Analyse

Bevor maschinelle Lernverfahren eingesetzt werden, wird der Datensatz mit klassischen statistischen Methoden untersucht. Ziel ist es, lineare und nicht-lineare

Beziehungen zu numerischen Parametern abzuschätzen und den Einfluss kategorialer Grössen mithilfe von ANOVA zu bewerten. Diese Voranalyse liefert die Basis für das anschliessende Feature Engineering und die Auswahl möglicher geeigneter ML-Modelle.

4.2.2.1 Korrelation der Zielvariablen mit den numerischen Parametern

Abbildung 78 zeigt die Korrelationskoeffizienten der numerischen Parameter im Verhältnis zu den acht Zielvariablen. Zur Kontrolle des Einflusses durch Rechtsschiefe wurden die Zielvariablen zusätzlich logarithmiert. Abbildung 78 und Abbildung 79 zeigt die resultierenden Korrelationskoeffizienten. Dabei wird sichtbar, dass die überwiegende Mehrheit der Korrelationskoeffizienten einen geringen Wert aufweist ($|R^2| < 0.3$), was darauf hindeutet, dass keine signifikante lineare Abhängigkeit besteht. Dies gilt auch nach der Log-Transformation.

Die Ursachen für diese niedrigen Korrelationskoeffizienten können vielfältig sein, wie bereits in Kapitel 3.1 wiederholt diskutiert. Einerseits wurden die Korrelationskoeffizienten über die gesamte Datenbank berechnet, was auch die Einflüsse aller anderer Parameter miteinschliesst. Zusätzlich bilden die gefitteten Chloridprofile die Grundlage für die Zielvariablen, einschliesslich der Unsicherheiten, die aus den Profilfittings entstehen. Ein weiterer erwähnenswerter Punkt ist, dass manche Parameter nur für sehr wenige Bauwerke verfügbar sind, beispielsweise der Parameter «Distanz zum Portal» bei Tunnelbauwerken. Dies ist ein bauwerksspezifischer Parameter.

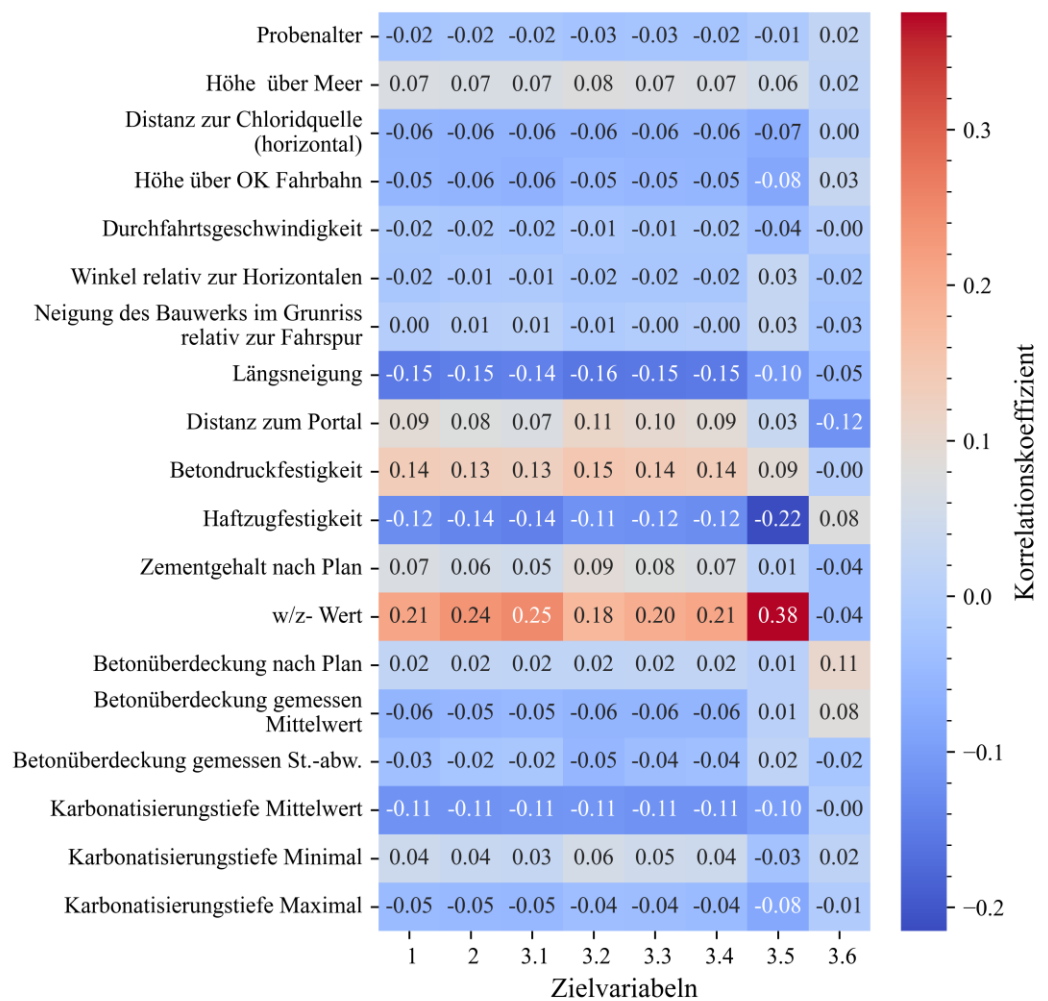


Abbildung 78: Korrelationskoeffizienten zwischen den Zielvariablen (vgl. Tabelle 7) und einigen numerischen Kategorien / Parameter in der Datenbank.

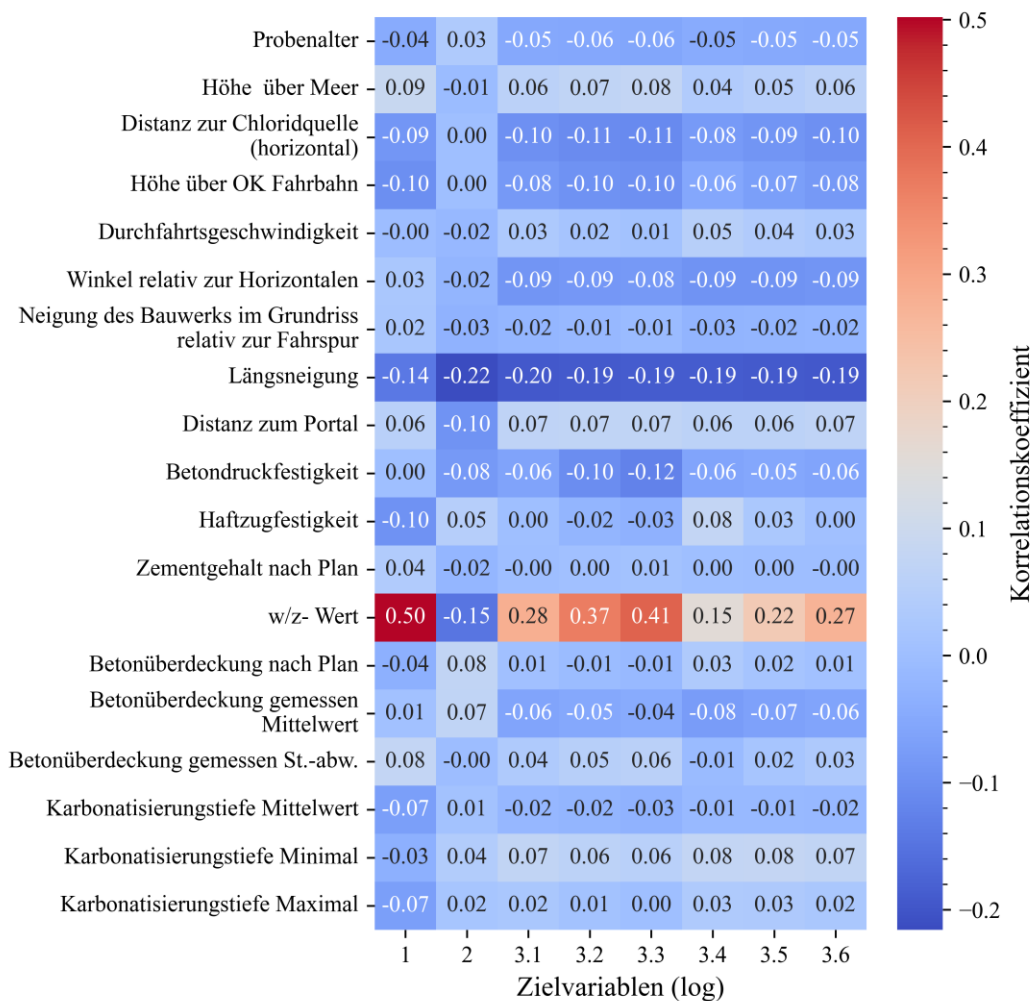


Abbildung 79: Korrelationskoeffizienten zwischen den log-transformierten Zielvariablen (vgl. Tabelle 7) und einigen numerischen Kategorien / Parameter in der Datenbank.

Abbildung 80 illustriert die Anzahl der Wertepaare, die zur Berechnung der Korrelationskoeffizienten in Abbildung 78 und Abbildung 79 herangezogen wurden. Die Anzahl der verwendeten Paare variiert von 24 für den W/Z-Wert bis zu über 1500 für das Probenalter. Die Anzahl der Wertepaare war jeweils für sämtliche Zielvariablen konstant.

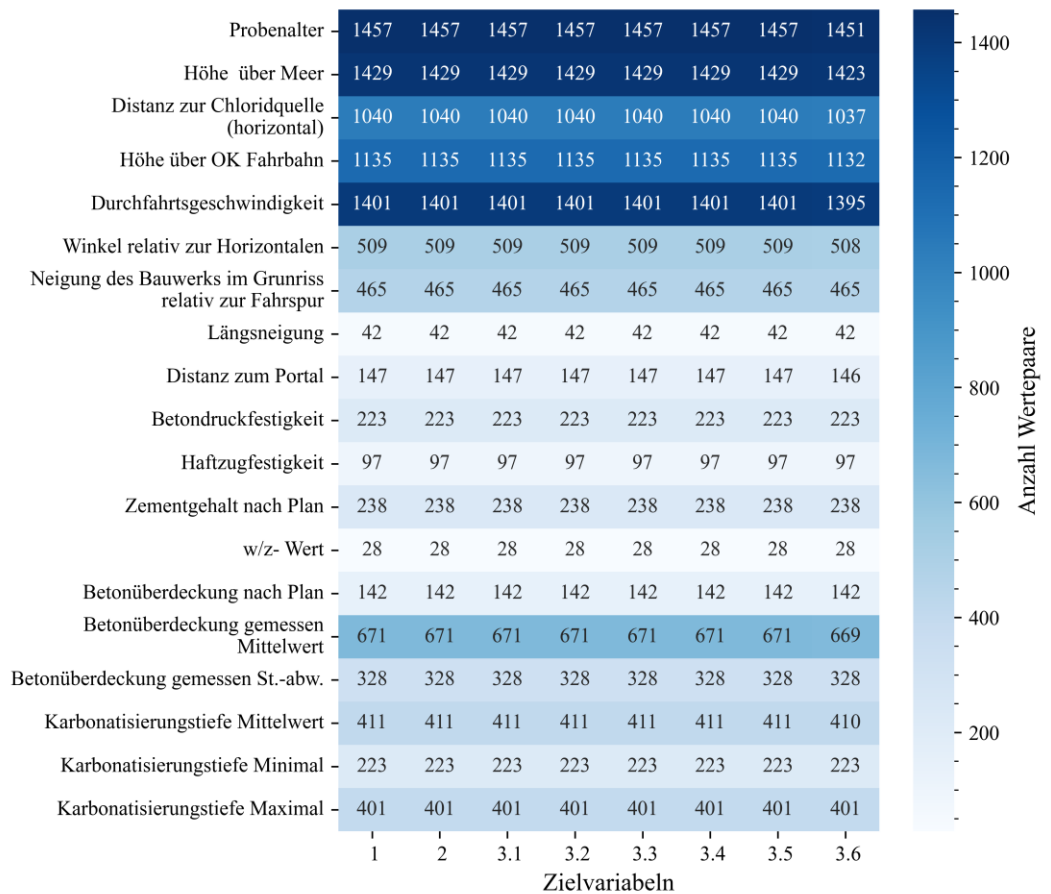


Abbildung 80: Anzahl der in der Datenbank verfügbaren Wertepaare für die Berechnung der Korrelation in **Abbildung 78** und **Abbildung 79**.

An dieser Stelle soll nochmals betont werden, dass der Korrelationskoeffizient lediglich einen linearen Zusammenhang untersucht. Es können durchaus nicht-lineare Beziehungen oder komplexere Interaktionen zwischen den erklärenden Variablen und der Zielvariablen vorhanden sein. Nicht-lineare oder komplexere Zusammenhänge könnten mit zusätzlichen Methoden oder grafischen Darstellungen detaillierter untersucht werden. Ein möglicher Ansatz besteht darin, nicht-lineare Zusammenhänge grafisch zu untersuchen oder die Daten in sinnvolle Untergruppen zu unterteilen, etwa nach Expositionsart, Bauwerkstyp oder Bauteile.

Dies soll nun exemplarisch anhand der Zielvariable 2 (Maximalwert) veranschaulicht werden. Zu diesem Zweck wird ein Streudiagramm erstellt, bei dem eine erklärende Variable auf der x-Achse und die Zielvariable auf der y-Achse abgetragen wird. Anhand dieser grafischen Darstellung lassen sich visuell auch nichtlineare Trends oder Auffälligkeiten erkennen, die mit rein linearen Korrelationsanalysen nicht erfasst werden.

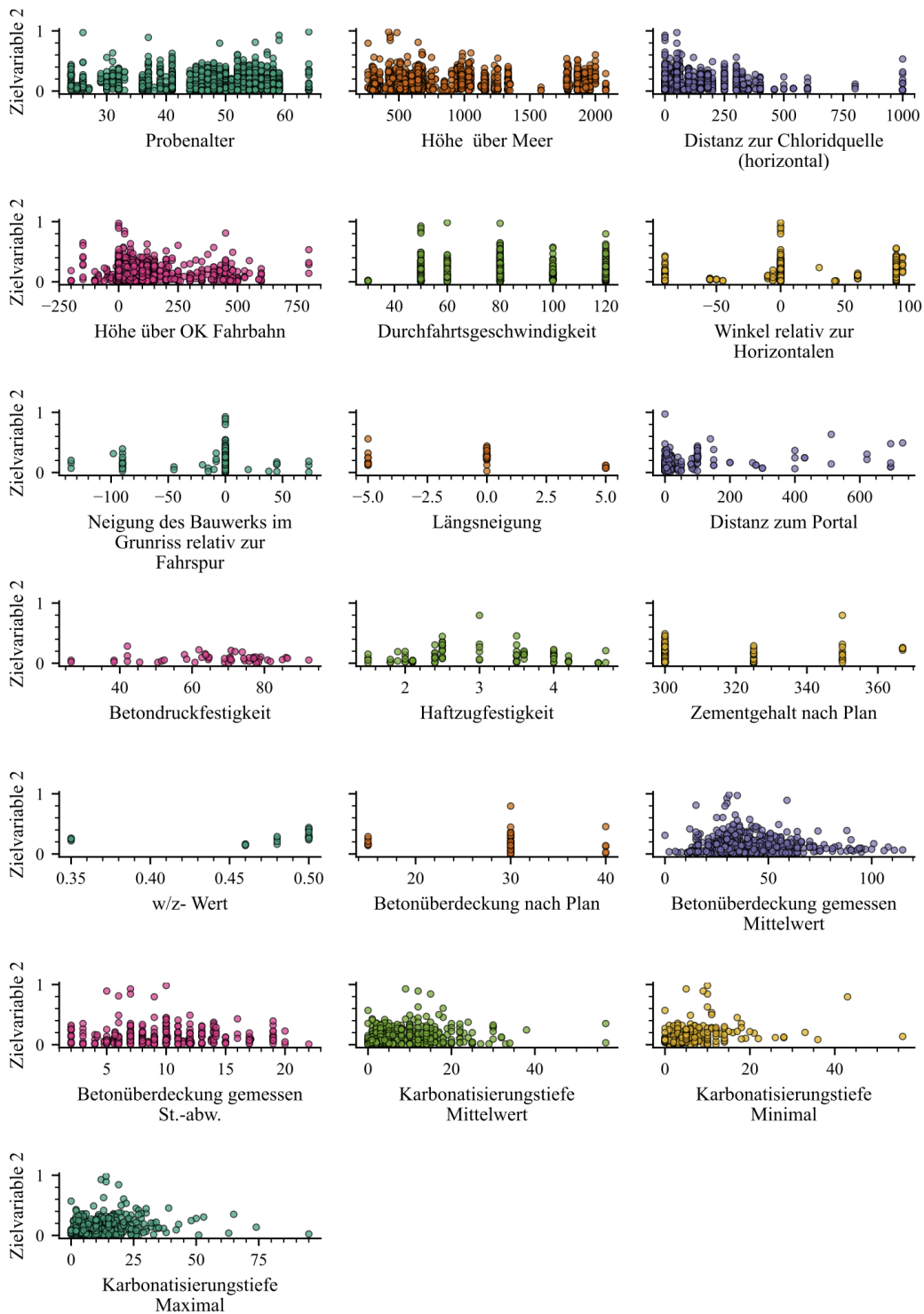


Abbildung 81: Streudiagramm zwischen der Zielvariable 2 (Maximalwert des Chloridprofils) und ausgewählten kontinuierlichen bzw. diskreten Parametern zur Identifikation nicht-linearer Zusammenhänge.

Aus Abbildung 81 lassen sich diverse Schlüsse ziehen. Aus der Grafik bezüglich der Höhe über Meer und der Korrelation zur Zielvariable 2 lässt sich schliessen, dass der maximale Chloridgehalt kaum von der Höhe über Meer beeinflusst wird. Die Distanz zur Chloridquelle scheint erwartungsgemäss mit zunehmender horizontaler Distanz abzunehmen. Jedoch ist bei rund 1000 cm Entfernung eine Häufung zu erkennen (vgl.

auch Abbildung 97). Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Höhe über Fahrbahn, wo einerseits negative Werte auftreten können und andererseits bei rund 760 cm wieder erhöhte Werte festgestellt wurden. Die Durchfahrtsgeschwindigkeit hat keinen wesentlichen Einfluss. Bei einer Durchfahrtsgeschwindigkeit von 30 km/h sind nur sehr wenige Werte vorhanden, welche keine abschliessende Beurteilung erlauben. Der Winkel zur Horizontalen wurde zwar bei einem Grossteil der Bauwerke erhoben, aber ein klarer Trend ist nicht erkennbar. Ähnliches gilt für die Neigung des Bauwerks relativ zur Fahrspur. Die Längsneigung zeigt einen untergeordneten Einfluss (bauwerksspezifischer Parameter). Die Distanz zum Portal lässt mehrere Schlüsse zu. Erstens steigen vor allem im Eingangsbereich der Portale die Chloriddaten an. Zweitens kann aber festgestellt werden, dass auch jenseits der 400 Meter Distanz zum Portal noch grössere Chloridkonzentrationen im Beton gemessen werden können. Die Betondruckfestigkeit und die Haftzugfestigkeit scheinen keinen direkten Einfluss auf den maximalen Chloridgehalt zu haben. Der Zementgehalt nach Plan lässt den Schluss zu, dass bei einem Zementgehalt von 300 Kilogramm leicht erhöhte Chloridkonzentrationen festgestellt wurden. Der Wasserzementwert deutet darauf hin, dass mit einer Erhöhung des Wasserzementwerts tendenziell höhere Chloridgehalte gefunden werden. Dies stimmt mit der Literaturrecherche überein. Die nächsten drei Parameter, Betonüberdeckung nach Plan oder gemessen, zeigen nur, wie dieser Parameter statistisch verteilt ist, lassen aber keine Rückschlüsse auf den Chloridgehalt zu. Die Karbonatisierungstiefe im Mittel scheint kaum eine nachvollziehbare Korrelation mit der Zielvariable 2 zu haben. Das Probenalter scheint unabhängig vom maximalen Chloridgehalt zu sein.

Eine weiterführende Möglichkeit ist den Datensatz in Subdatensätze zu unterteilen. Dies wurde exemplarisch mit dem Parameter Bauwerksart durchgeführt. Die beiden Abbildung 78 und Abbildung 80 wurden nochmals dargestellt, um die Anzahl der Möglichkeiten einzuschränken jedoch nur für Zielvariable 2.

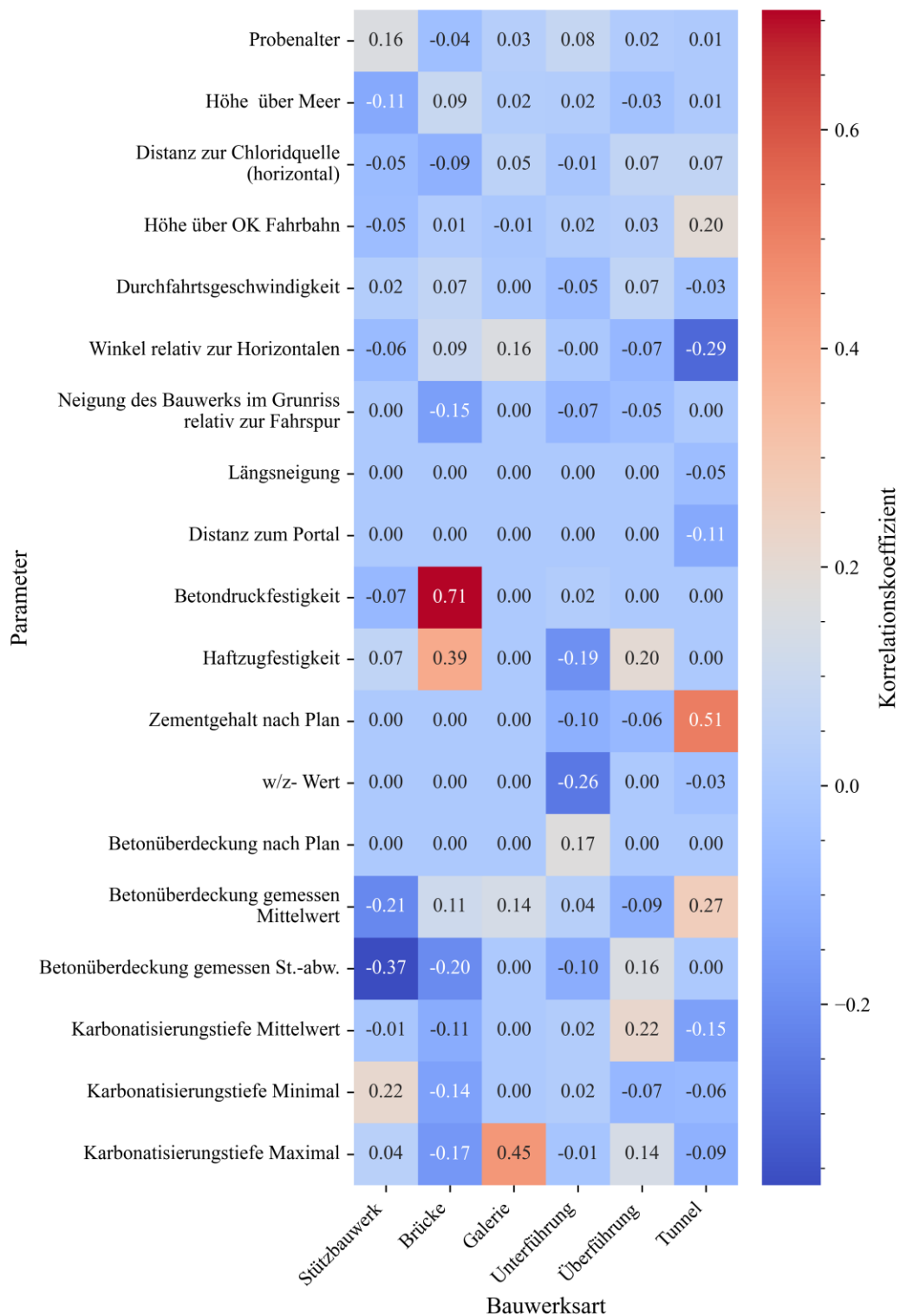


Abbildung 82: Korrelation zwischen der Zielvariablen 2 und einigen numerischen Kategorien / Parametern in der Datenbank, aufgeschlüsselt nach Bauwerksart.

Die Korrelation, aufgeschlüsselt nach den unterschiedlichen Bauwerksarten in Abbildung 82, verdeutlicht, dass die linearen Korrelationskoeffizienten sich gegenüber der Gesamtbetrachtung in Abbildung 78 deutlich verändern und auch für die

verschiedenen Bauwerksarten unterschiedliche Werte hervorrufen. Einige Werte des Korrelationskoeffizienten erreichen nun Werte von - 0.69 bis 0.80 und sind somit deutlich höher als bei der Gesamtbetrachtung. Die Anzahl der verfügbaren Datenpunkte reduziert sich jedoch signifikant, sobald ein Filter angewendet wird. In diesem Beispiel wurde der Datensatz in sechs Subkategorien unterteilt. Unter der Annahme einer homogenen Verteilung ergibt sich in jedem Unterdatensatz eine deutlich geringere Anzahl von unter 300 Datenbankeinträgen. Die nachfolgende Abbildung zeigt ausserdem, dass für jene Wertepaare, bei denen in Abbildung 82 relativ hohe Korrelationskoeffizienten gefunden wurden, jeweils nur wenige Wertepaare zugrunde lagen (wenige % der gesamten Datenbank). Damit können diese identifizierten Korrelationen nicht auf die gesamte Datengrundlage übertragen werden und es erscheint nicht als zielführend, die hiermit identifizierten Korrelationen als mögliche ursächliche Haupteinflussgrössen für die Chloridbelastung zu interpretieren.

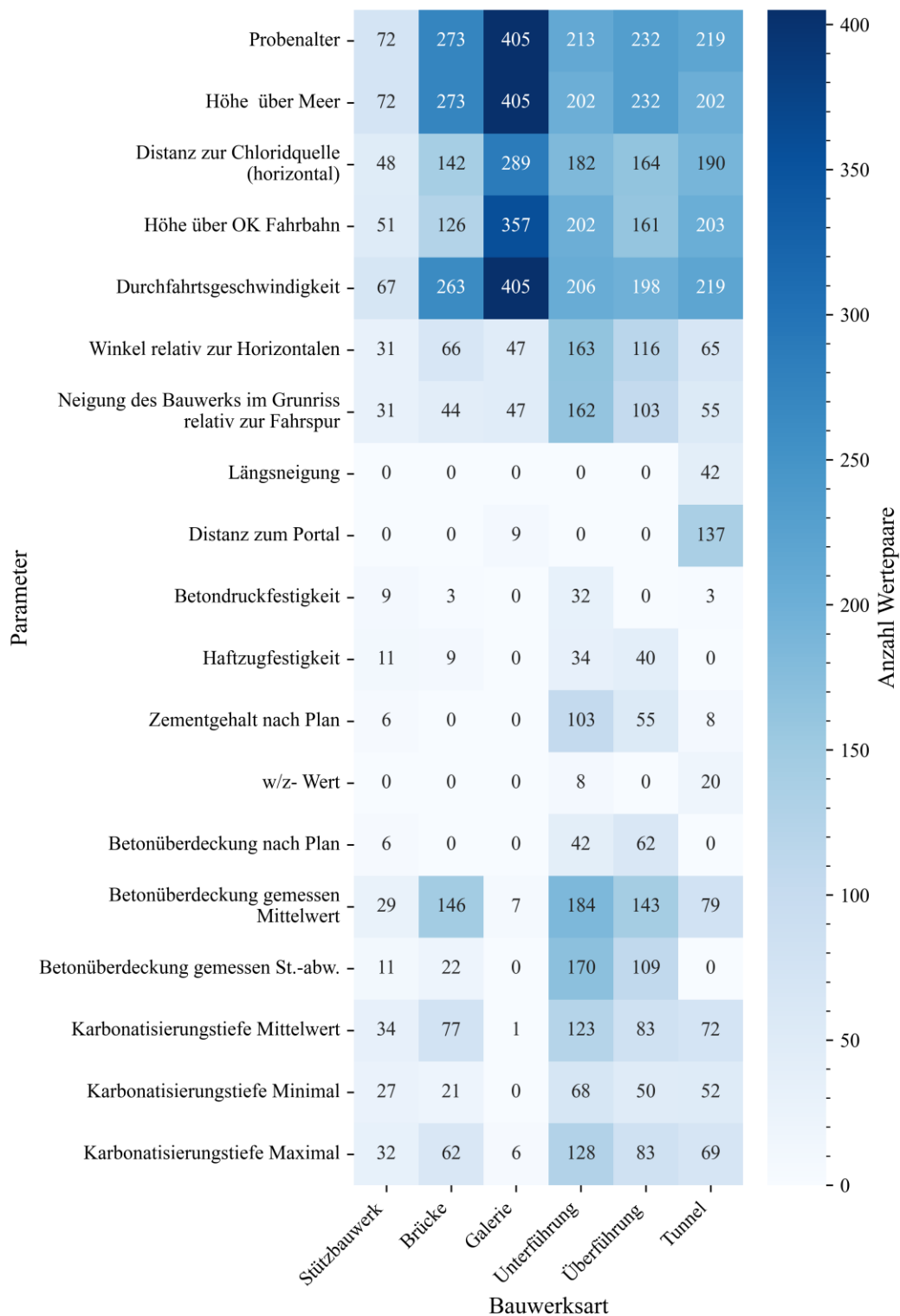


Abbildung 83: Anzahl der Wertepaare für die Berechnung der Korrelationskoeffizienten in **Abbildung 82**.

Abbildung 83 veranschaulicht die Anzahl der verfügbaren Wertepaare für die Berechnung des linearen Korrelationskoeffizienten nach der Unterteilung der numerischen Parameter (vgl. Abbildung 82). In der ersten Zeile ist klar erkennbar, wie die Datenproben auf die unterschiedlichen Bauwerksklassen verteilt sind. Zusätzlich wird

deutlich, dass beispielsweise der Parameter W/Z-Wert nur bei Unterführungen und Tunnels verfügbar war. Ein ähnliches Bild zeigt sich für die Haftzugfestigkeit und den Zementgehalt, die bei Brücken und Galerien nicht in der Datenbank erfasst worden sind.

Abbildung 84 zeigt die Ergebnisse einer Korrelationsanalyse (oben) sowie die zugehörigen Fallzahlen (unten) für den Datensatz mit verfügbaren Informationen zur Tausalzbeanspruchung. Untersucht wurden die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Einflussgrößen – darunter Neuschneehöhe, mittlere Tausalzmenge, Höhe über Meer und Verkehrskennwerte – und den gemessenen Chloridgehalten in unterschiedlichen Tiefenbereichen der Chloridprofile sowie der maximal gemessenen Chloridkonzentration.

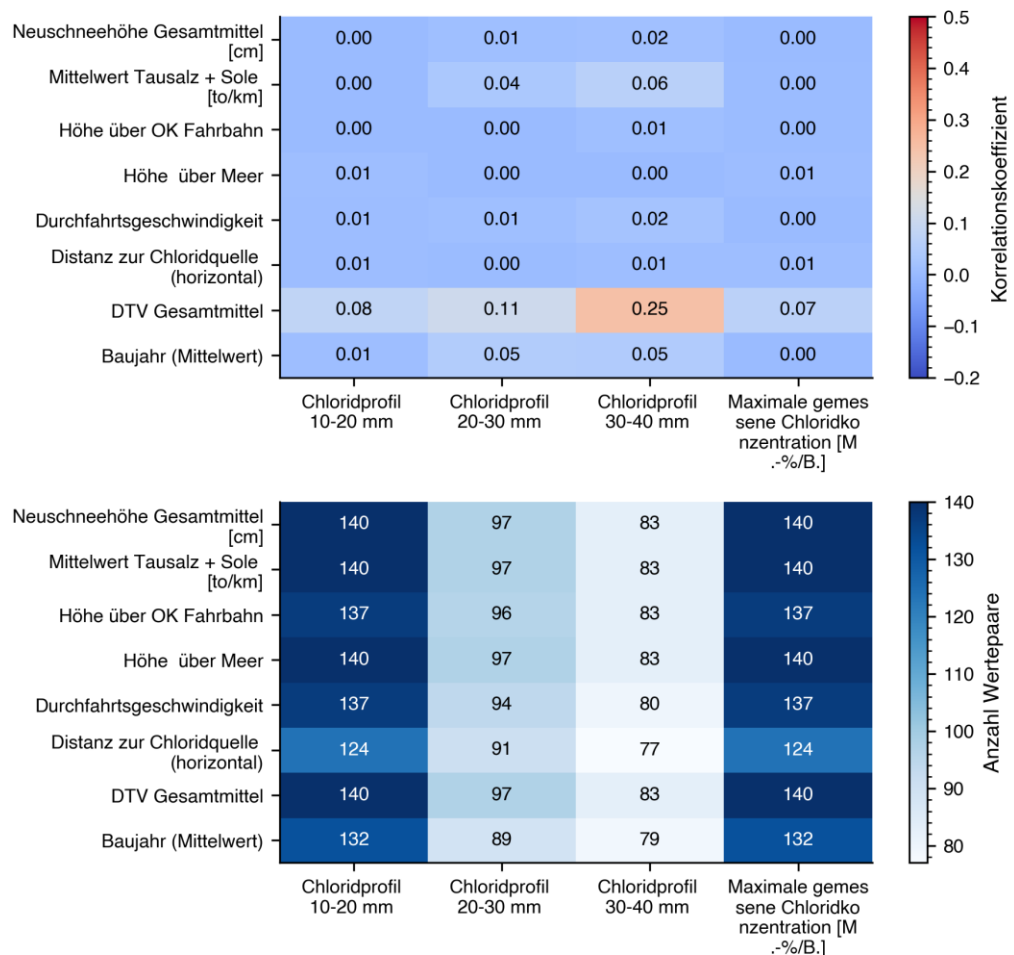


Abbildung 84: Korrelationsanalyse für den Datensatz mit Angaben über die Tausalzmenge (oben), sowie die Anzahl der Wertepaare für die Berechnung der Korrelation.

Die Analyse zeigt insgesamt geringe Korrelationswerte, was auf schwache lineare Zusammenhänge hindeutet. Der deutlichste positive Zusammenhang besteht zwischen dem durchschnittlichen täglichen Verkehr (DTV Gesamtmittel) und der maximal gemessenen Chloridkonzentration (Korrelationskoeffizient ~ 0.25), was auf eine mögliche Zunahme der Chlorideinwirkung mit steigendem Verkehrsaufkommen hinweisen

könnte. Weitere Einflussgrößen wie die horizontale Distanz zur Chloridquelle oder die Neuschneehöhe zeigen keine signifikanten Korrelationen. Die Korrelationen sind in ähnliche Größen wie auf dem gesamten Datensatz.

Es ist jedoch zu beachten, dass die Analyse nur auf einem geographisch begrenzten Teil des Gesamtdatensatzes basiert, da Tausalzdaten lediglich für einen kleinen Ausschnitt verfügbar sind. Die Aussagekraft der Ergebnisse ist daher räumlich eingeschränkt und kann nicht ohne weiteres auf andere Gebiete übertragen werden.

Zusammenfassend lässt sich folgendes festhalten: Die statistische Analyse der Zielvariablen zeigt, dass die meisten numerischen Parameter nur geringe lineare Korrelationen mit den Zielvariablen aufweisen. Dies deutet auf schwache lineare Zusammenhänge hin. Eine detailliertere Betrachtung erfolgte durch Streudiagramme, die auch nichtlineare Trends sichtbar machen. Zur vertieften Analyse wurde der Datensatz nach Bauwerksart unterteilt. Die korrelationsbasierten Auswertungen für die Zielvariable 2 zeigen, dass die Höhe der Korrelationskoeffizienten in den Subgruppen teils deutlich stärker ausfällt als in der Gesamtbetrachtung. Gleichzeitig nimmt jedoch die Anzahl der verfügbaren Wertepaare pro Bauwerksart deutlich ab, was die statistische Aussagekraft einzelner Zusammenhänge einschränkt. Die Datenverfügbarkeit für bestimmte Parameter ist zudem nicht in allen Bauwerksarten gegeben. Es lassen sich aus diesen Korrelationsbetrachtungen keine verallgemeinerbaren Zusammenhänge, geschweige denn Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge ableiten.

4.2.2.2 Statistische Analyse mit den kategorischen Parametern

Zur Untersuchung der Unterschiede zwischen unterschiedlichen kategorischen Parametern wurde ein ANOVA-Test durchgeführt. Dieser Algorithmus ermöglicht festzustellen, ob die Mittelwerte der kontinuierlichen Zielvariablen sich signifikant zwischen den Gruppen unterscheiden, welche durch die kategorischen Parameter gebildet werden. Für jede als kategorisch definierten Parameter (vgl. Tabelle 5) wurde eine einfaktorielle ANOVA-Analyse durchgeführt. Der p-Wert wurde als Mass für die statistische Signifikanz herangezogen.

Abbildung 85 zeigt das Resultat der ANOVA-Analyse ausgewählter, potenziell erklärender Variablen auf die 8 Zielvariablen. Die signifikantesten Kriterien aus dieser Analyse sind die Bauwerksart und das Oberflächenschutzsystem. Weniger ausgeprägte Effekte wurden bei der Zementart, der Art des Oberflächensystems oder der Bewitterung beobachtet. Je nach Zielvariable können sich die Werte aber deutlich unterscheiden, wo die Werte aus dem Fitting näher beieinander sind als der maximale gemessene Chloridgehalt.

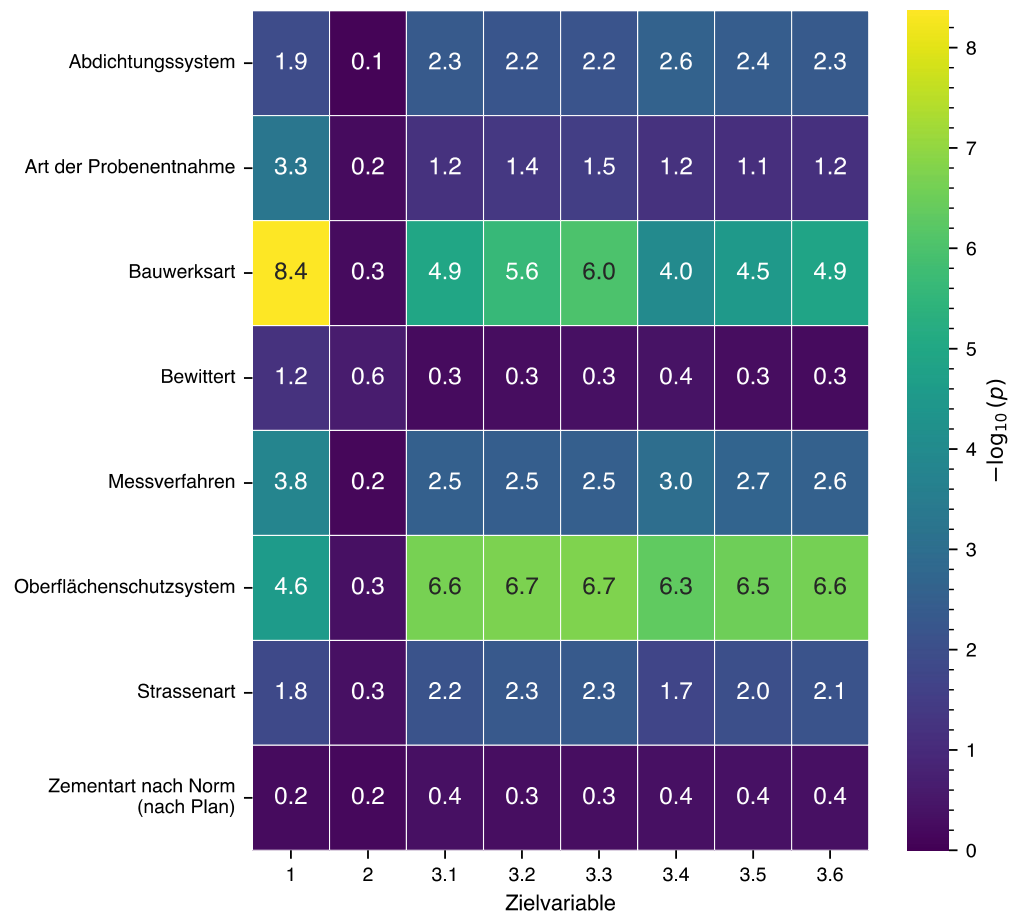


Abbildung 85: ANOVA-Analyse der kategorischen Parameter der Datenbank.

Im folgenden Abschnitt wird der Einfluss der Bauwerksart auf die Zielvariablen hinsichtlich des gemessenen Chloridgehalts analysiert. In Abbildung 86 ist für jede Zielvariable der mittlere Chloridgehalt den verschiedenen Bauwerksarten zugeordnet dargestellt, wodurch Unterschiede zwischen Bauwerkstypen sichtbar werden. Beispielsweise weisen Galerien und Tunnel bei mehreren Zielvariablen tendenziell höhere mittlere Chloridgehalte auf als andere Bauwerkstypen.

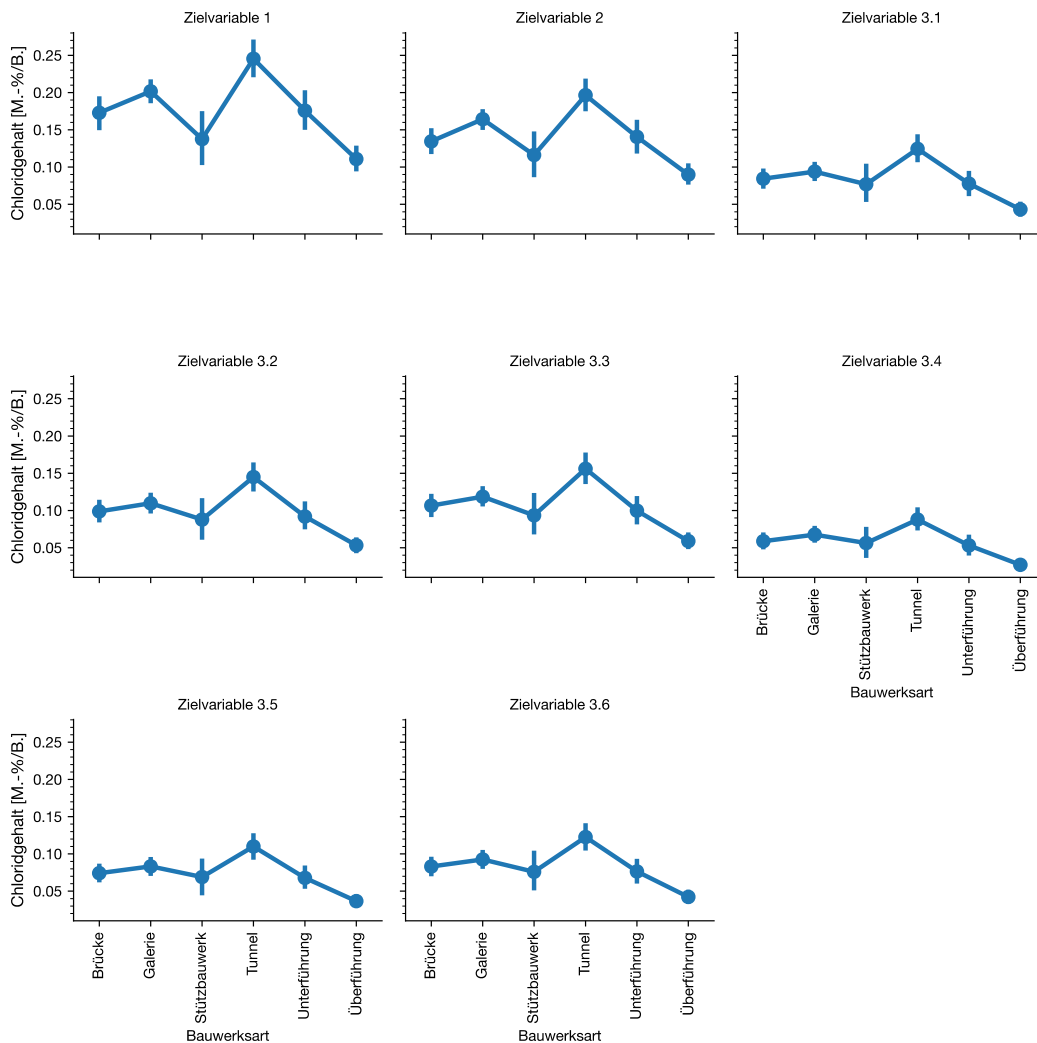


Abbildung 86: Übersicht des Einflusses der Bauwerksart auf die Zielvariablen.

Zusammenfassend verdeutlicht die durchgeführte ANOVA-Analyse kaum signifikante Unterschiede in den Mittelwerten der kontinuierlichen Zielvariablen in Abhängigkeit von verschiedenen kategorialen Parametern.

4.2.2.3 Fazit

Die Untersuchung linearer Zusammenhänge zwischen Zielvariablen und numerischen Parametern offenbarte überwiegend geringe Korrelationen, die durch Subgruppenanalysen nach Bauwerksart zwar erhöht werden konnten, aber nur geringfügig. Die Subgruppenbildung reduzierte gleichzeitig die Datenbasis und somit die Aussagekraft eines Modelles. Ähnliche Aussagen lassen sich für die kategorialen Parameter aus der Datenauswertung ableiten.

Schlussendlich lässt sich festhalten, dass einfache lineare Modelle den komplexen Einflussfaktoren auf die Chloridbelastung von taumittelexponierten Bauwerken nicht gerecht werden. Ob nichtlineare Modelle hier deutliche Verbesserungen bringen, lässt sich auf Basis der vorliegenden Streudiagramme (z. B. Abbildung 81) noch nicht sicher

bewerten – die Daten erscheinen auch hier eher als diffuse Punktwolke. Eine weitergehende Prüfung nichtlinearer Ansätze wird daher als zielführend erachtet.

4.2.3 Feature Engineering

In diesem Abschnitt sollen gezielt neue Parameter für die Vorhersage im Rahmen des Feature Engineerings (vgl. Kapitel 3.2.4.5) erstellt werden. Im Kapitel 3.2.4 wurden bereits einige Strategien für die Imputation von fehlenden Werten als auch Skalierungsoptionen der erklärenden Variablen vorgestellt. Zusätzlich wurde die Zielvariable ebenfalls bereits in Kapitel 4.2.2 skaliert.

Für das Feature Engineering wurden die folgenden Parameter verwendet:

- Probenalter, Horizontale Distanz zur Chloridquelle, Höhe über Meer, Durchfahrts-geschwindigkeit und Höhe über OK Fahrbahn als numerische Parameter
- Art der Probenentnahme, Bauwerksart, Bewittert, Exposition nach Norm (XC), Ex-position nach Norm (XD), Messverfahren und Strassenart als kategoriale Parameter.

Abbildung 87 zeigt *exemplarisch* das Resultat des automatischen Feature Engineerings mit dem Tool Featuretools [55] für die Zielvariable 1 – inklusive Imputation der numerischen Parameter – und stellt die 25 höchsten Absolutwerte der Korrelationskoeffizienten in absteigender Reihenfolge dar. Dagegen präsentiert Abbildung 88 die besten 25 Features, wobei fehlende Werte nicht berücksichtigt worden sind.

Die Abbildung zeigt die 25 stärksten Korrelationen zwischen abgeleiteten Parametern und der Zielvariablen 1, wobei insbesondere Kombinationen mit der Höhe über Meer und dem Probenalter die höchsten positiven Zusammenhänge aufweisen. Merkmale wie „Höhe über Meer / Probenalter“, „Jahr Bauwerk Excel / Höhe über Meer“ oder „DTV 2022 / Höhe über Meer“ deuten darauf hin, dass sowohl topografische als auch verkehrsbezogene Faktoren in Kombination mit dem Bauwerksalter relevante Informationen zur Chloridbelastung liefern könnten. Negativ korrelierte Merkmale wie „PERCENTILE(DTV 2022)“ oder „Höhe über Meer * Probenalter“ legen hingegen nahe, dass in bestimmten Konstellationen – etwa bei älteren Bauwerken in höherer Lage – tendenziell geringere Chloridgehalte auftreten. Die Ergebnisse verdeutlichen das Potenzial gezielten Feature Engineerings, wobei die statistischen Zusammenhänge nicht kausal zu interpretieren sind.

Die Korrelationskoeffizienten befinden sich jedoch in derselben Größenordnung wie in Abbildung 78 ohne das automatisch durchgeführte Feature Engineering. Insgesamt bleiben die Korrelationen auch nach dem Feature Engineering auf sehr tiefem Niveau.

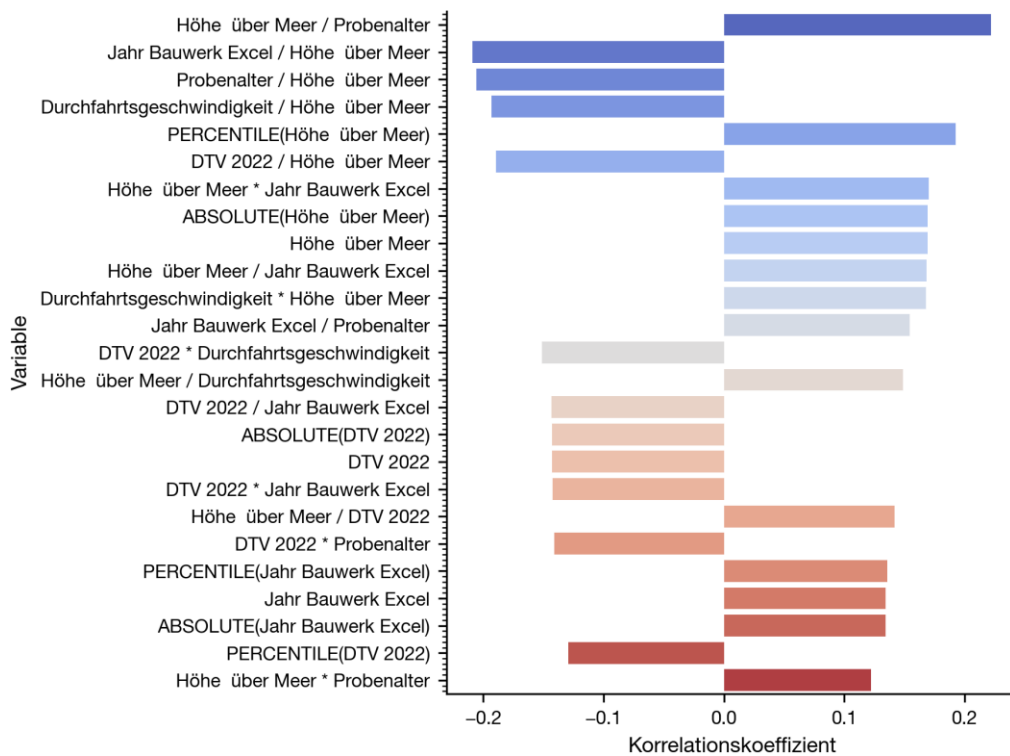


Abbildung 87: Automatisches Feature Engineering der numerischen Parameter für die Zielvariable 1 mit Imputation.

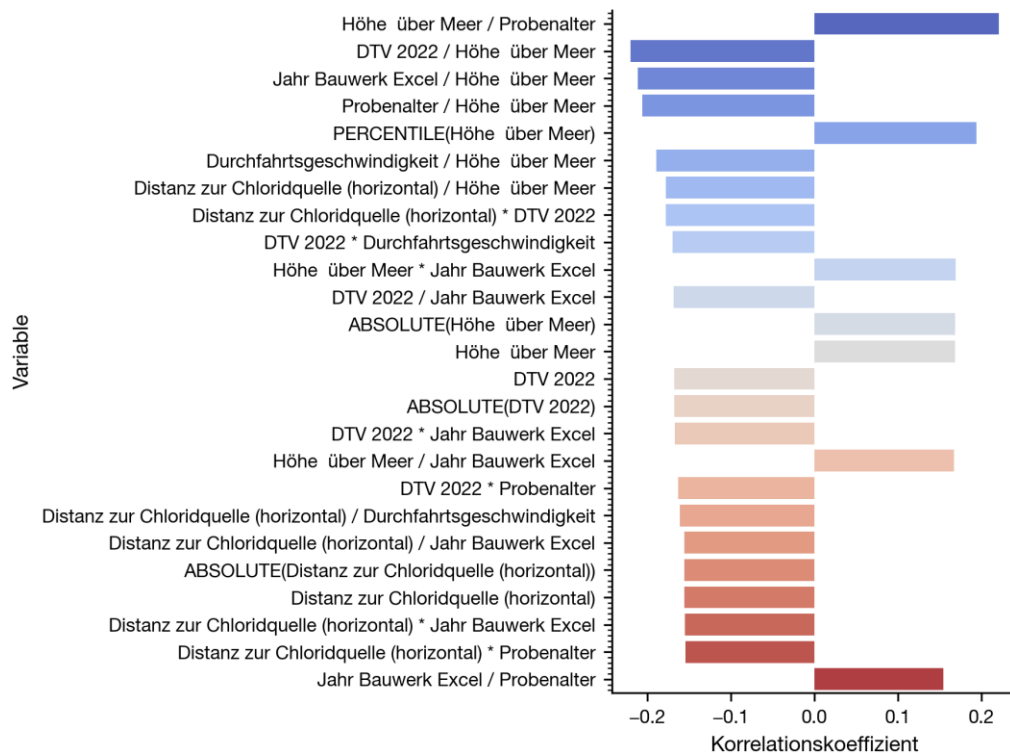


Abbildung 88: Automatisches Feature Engineering der numerischen Parameter für die Zielvariable 1 ohne Imputation.

Im Zuge des Feature Engineerings wurde eine zusätzliche erklärende Variable entwickelt, die angibt, ob ein bauliches Schutzsystem – etwa ein Oberflächenschutz oder eine Abdichtung – vorhanden ist. Diese beiden Parameter wiesen eine grosse Streuung und Unvollständigkeit auf, weshalb sie zu einem einzigen Parameter zusammengefasst wurden. Dieser neue Parameter gibt nun an, ob ein System vorhanden ist, nicht vorhanden ist oder ob dessen Existenz unklar ist. So wurden die beiden Parameter konsolidiert und die Anzahl der Einträge für diesen neuen Parameter erhöht. Dies wurde in zwei Schritten durchgeführt.

In einem ersten Schritt wurde für den Parameter Oberflächenschutzsystem (vgl. auch Kapitel 4.1.8.15) eine einheitliche Kategorisierung vorgenommen, um die Anzahl an textbasierten Einträgen zu reduzieren. Hierzu wurden verschiedene Einträge, welche auf das Vorhandensein eines Schutzsystems hinweisen – wie beispielsweise „Anstrichbeschichtung“, „Farbanstrich“, „OS9 (?)“, „Beschichtung (eher dicht)“ oder allgemein „vorh., aber unbekannt“ – unter der gemeinsamen Kategorie „vorhanden“ zusammengefasst. Einträge, die explizit die Abwesenheit eines «Oberflächenschutzsystems» benennen, wie „nicht vorh.“, wurden entsprechend der Kategorie „nicht vorhanden“ zugewiesen. Bei unklaren oder fehlenden Angaben – z. B. „nan“ oder „unbekannt“ – erfolgte die Klassifikation als „nicht angegeben“. Nach demselben Prinzip wurde der Parameter «Abdichtungssystem» (vgl. auch Kapitel 4.1.8.15) reduziert. Auch hier zeigte sich eine Vielzahl unterschiedlicher Einträge, welche jedoch ähnliche Zustände beschrieben. So wurden alle Ausprägungen, die auf das Vorhandensein einer Abdichtung oder einer den Chlorideintrag verlangsamenden Schicht hindeuten – etwa „geklebt“, „Betonbelag“, „Beschichtung“, „Schwimmend“, „Spachtel“ oder „Asphalt“ – unter der Kategorie vorhanden zusammengefasst. Der Eintrag „keine“ wurde als nicht vorhanden interpretiert, während unklare oder fehlende Angaben – etwa „nan“ – der Kategorie nicht angegeben zugeordnet wurden. Im Anschluss wurden die beiden Variablen zu einer Einzigsten zusammengeführt, welche das Vorhandensein eines beliebigen Schutzsystems angeben soll. Schlussendlich wurden bei über 250 Chloridprofilen ein beliebiges Schutzsystem in der Datenbank vermerkt.

Abbildung 89 zeigt die Auswertung der neuen erklärenden Variablen («OS und Abdichtung»), welche die Werte «vorhanden», «keine Angabe» oder «nicht vorhanden» annehmen kann, gegenüber dem mittleren Chloridgehalt. Es ist kein klar ersichtlicher Einfluss auf den mittleren Chloridgehalt zu erkennen. Der mittlere Chloridgehalt scheint bei dieser Betrachtung unabhängig vom einem möglichem Schutzsystem zu sein. Daher kann sowohl der zusammengefasste Parameter als auch die ursprünglichen Parameter zu Oberflächenschutz und Abdichtung gleichzeitig im Modell verwendet werden. Der besseren Einordnung halber sei an dieser Stelle nochmals erwähnt, dass die Datengrundlagen zu den Abdichtungssystemen und den OS in der Datenbank im Vergleich zu anderen Parametern eher schlecht abgesichert sind, was mit der Verfügbarkeit der entsprechenden Informationen aus den Akten der Zustandserfassungen zusammenhängt.

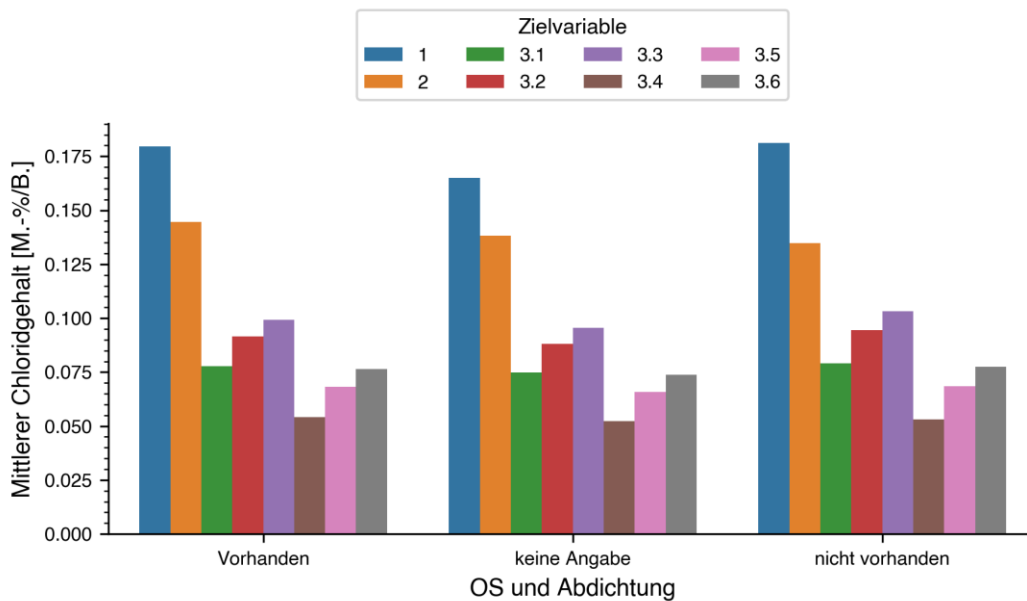


Abbildung 89: Mittlerer Chloridgehalt in Abhängigkeit von der kombinierten Variable «OS und Abdichtung».

Die Möglichkeit, einen zusätzlichen Parameter zu generieren, besteht darin, den Monat der Chloridextraktion am Bauwerk zu bewerten. Dies wird exemplarisch durchgeführt, indem die Monate November, Dezember, Januar und Februar zu den Wintermonaten gezählt werden, während die restlichen Monate als Sommermonate betrachtet werden. Ziel war es, eine potenzielle Aufkonzentration von Chloriden nach dem Winter mit Streusalzeinsätzen zu identifizieren. Jedoch wurden keine relevanten Unterschiede in einem Boxplot erkannt. Deshalb ergab die anschließende Analyse auf Monatsebene (siehe Abbildung 90) ebenfalls keine nennenswerten Abhängigkeiten.

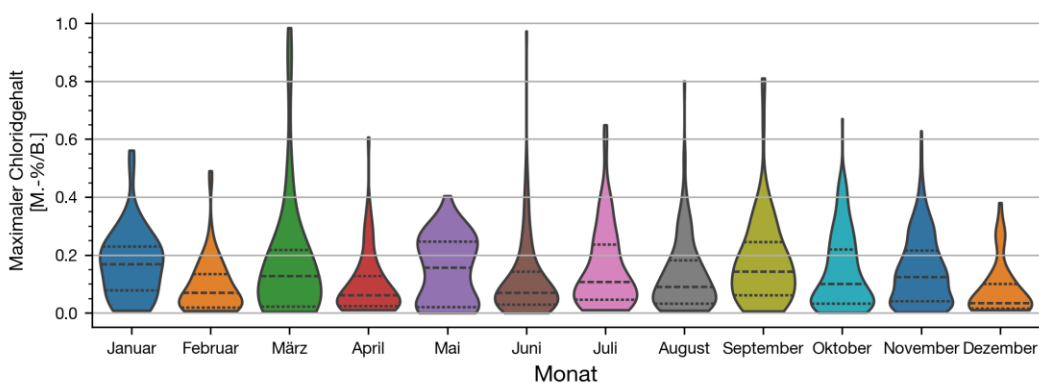


Abbildung 90: Maximaler Chloridgehalt in Abhängigkeit des Entnahmemonats des Profils.

Eine weitere Möglichkeit stellt das Einführen der Distanz der Betonfläche (Ort der Chloridmessung) und der Chloridquelle nach Pythagoras dar, welche die horizontalen und vertikalen Abstände miteinander verrechnet. Annahme für dieses Vorgehen ist, dass der Chloridtransport von der Quelle zum Beton horizontal und vertikal über denselben Mechanismus erfolgt und die beiden Richtungen damit gleichwertig sind.

Dieser horizontal/vertikal verrechnete Abstand wurde ebenfalls im Modell nach Lay in Kapitel 2.4.7 berücksichtigt. Dies stellt ein zusätzlicher Parameter dar, welcher aber leicht korreliert mit den beiden zugrundeliegenden Variablen.

Im Rahmen des Feature Engineerings wurden gezielt neue Parameter aus bestehenden numerischen und kategorialen Variablen gebildet, um zu evaluieren, inwiefern sich die Prognosegüte dadurch verbessern lässt. Dabei zeigten automatisch generierte Kombinationen, wie etwa das Verhältnis von Probenalter zur Durchfahrtsgeschwindigkeit, zwar die höchsten absoluten Korrelationskoeffizienten, bewegten sich aber insgesamt im ähnlichen Bereich wie die ursprünglichen Variablen. Zwei Variablen über applizierte Schutzsysteme (OS und Abdichtung) wurden zu einem gemeinsamen Parameter mit den möglichen Einträgen: „vorhanden“, „nicht vorhanden“, „keine Angabe“ zusammengeführt, wobei sich kein klarer Einfluss auf den mittleren Chloridgehalt erkennen liess. Schlussendlich wurde noch nach dem Satz des Pythagoras eine weitere, mögliche erklärende Variable gebildet. Auch wenn die Resultate der entsprechenden linearen Korrelationsanalysen zwischen zwei Parametern teilweise noch keine signifikante Steigerung gegenüber der Korrelationsuntersuchungen gestützt auf den ursprünglichen Parametern zeigen, können diese Feature Engineering Schritte eine Grundlage für weiterführende Analysen bilden.

4.2.4 Maschinelles Lernen

4.2.4.1 Selektion von Grundmodellen

Für eine Abschätzung der möglichen Grundmodelle zur Prognose der Zielvariablen wurde in einem ersten Experiment der gesamte Datensatz, inklusive der durch Feature Engineering erklärenden Variablen, mit einer Optimierung der Hyperparameter der Modelle untersucht. Auf die Kreuzvalidierung wurde verzichtet. Zur einfachen Übersicht wird für die Zielvariablen nur das Bestimmtheitsmass als Metrik betrachtet. Andere Metriken werden im Bericht weggelassen.

Als Grundmodelle zur Vorhersage der Zielvariablen wurden die lineare Regression, Ridge Regression, Lasso Regression, k-Nächste Nachbarn, Entscheidungsbäume, Zufallswald, Gradient Boosting und XGBoost verwendet.

Abbildung 91 veranschaulicht in einer Matrix die Modellgüte mit dem Bestimmtheitsmass für die unterschiedlichen Kombinationen aus Zielvariablen und Grundmodell. Auf der vertikalen Achse sind die unterschiedlichen Modelle aufgelistet beginnend (oben) bei einfachen linearen Modellen bis hin zu komplexeren Ensemblemodellen (unten).

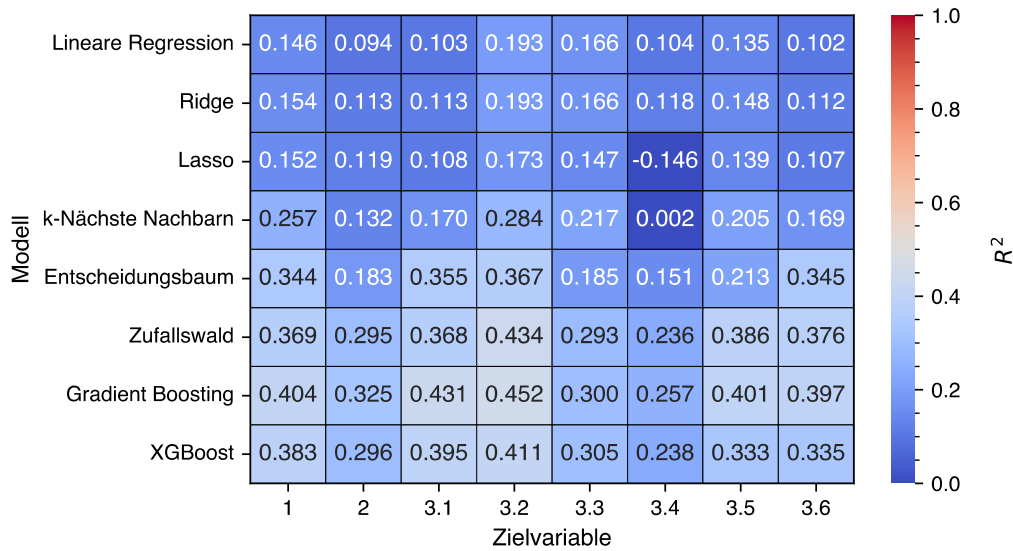


Abbildung 91: Bestimmtheitsmass für verschieden Modelle auf den 8 Zielvariablen für den Datensatz inklusive Feature Engineering mit Optimierung der Hyperparameter der Modelle.

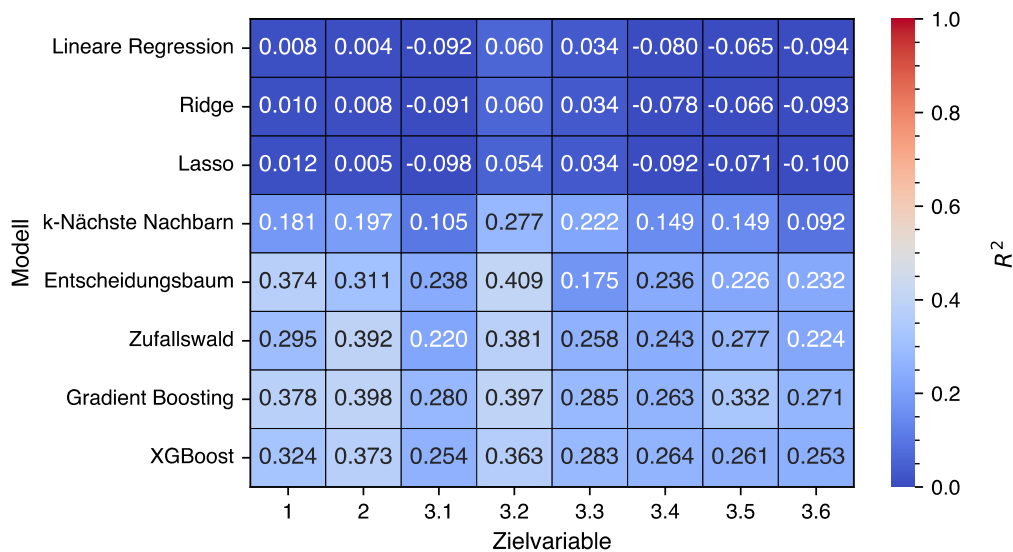


Abbildung 92: Bestimmtheitsmass für verschieden Modelle auf den 8 Zielvariablen für den Datensatz inklusive Feature Engineering mit Optimierung der Hyperparameter der Modelle mit einer Log-Transformation der Zielvariable.

Wie bereits aus den direkten Korrelationen zwischen den erklärenden Variablen und jeweils einer Zielvariablen ersichtlich wurde (vgl. z. B. Abbildung 81), zeigen nun auch die einfachen ML-Modelle nur sehr geringe R^2 -Werte. Im Gegensatz dazu erreichen komplexere Modelle wie Entscheidungsbaum, Zufallswald, Gradient Boosting oder XGBoost durchwegs höhere R^2 -Werte. Allerdings verbleiben die R^2 -Werte nach wie vor auf einem tiefen Niveau, unter 0.4.

Aufgrund der ausgeprägten Rechtsschiefe der Chloridgehalte (vgl. Kapitel 3.2.4.2), die sich auch in den Zielvariablen widerspiegelt, wird vor dem abschliessenden Verwerfen der linearen Modelle eine Log-Transformation der Zielvariablen vor und nach dem

Modelltraining berücksichtigt (siehe auch Abbildung 79). Eine erneute Berechnung mit den Log-transformierten Zielvariablen führte allerdings nicht zur gewünschten signifikanten Verbesserung der Modellgüte insbesondere bei den linearen Modellen (vgl. Abbildung 92).

4.2.4.2 Entscheidungsbaum als Regression

Als erstes Grundmodell, welches vertiefter untersucht wird, wurde der Entscheidungsbaum gewählt. Zur Bestimmung der Modellgüte wurden sämtliche 8 Zielvariablen berücksichtigt (vgl. Kapitel 4.2.1). Es wurden die folgenden Parameter aus der Datenbank verwendet:

- Probenalter, Horizontale Distanz zur Chloridquelle, Höhe über Meer und Höhe über OK Fahrbahn als numerische Parameter
- Art der Probenentnahme, Bauwerksart, Bewittert, Durchfahrtsgeschwindigkeit, Exposition nach Norm (XC), Exposition nach Norm (XD), Messverfahren (für die Chloride im Beton), und Strassenart als kategorische Parameter.

Diese Parameter wurden selektiert, da diese Parameter bei rund 60% der Daten verfügbar waren, ausgenommen wurde der Parameter «Bauwerksteil». Das One-Hot-Encoding hätte zu vielen zusätzlichen Variablen geführt. Für die numerischen Attribute kamen der Mittelwert oder der Median zur Anwendung zum Auffüllen fehlender Werte. Die Skalierung war wählbar zwischen Standard, MinMax, Robust oder Keine Skalierung, und wurde für jeden numerischen Parameter individuell mit dem Framework Optuna [56] optimiert. Fehlende kategorische Variablen wurden durch Werte ersetzt, die konstant oder am häufigsten sind.

Die Zielvariable selbst wurde mittels unterschiedlicher Transformationen, wie dem Logarithmus, der Quadratsfunktion und der Wurzelfunktion, optimiert. Zudem wurden die Hyperparameter des Entscheidungsbaums mithilfe des Hyperoptimierungsframeworks optimiert. Dies umfasste die Tiefenbegrenzung des Baumes sowie die Anzahl der Blätter. Die Optimierung zielte auf die Maximierung des Bestimmtheitsmasses, wobei eine fünffache Kreuzvalidierung Anwendung fand und zur Sicherstellung der Robustheit der Vorhersagen. Die Vorhersagen wurden zusätzlich an einem Testdatensatz überprüft. Die Metriken MAE, MSE, RSME, MAP, SMAPE und R^2 wurden zusammen mit den einzelnen Optimierungswerten zurückgegeben.

Tabelle 15 zeigt die beste Optimierung bezüglich des Bestimmtheitsmasses unter Berücksichtigung zusätzlicher ausgewerteter Metriken wie MAE, MSE, RSME, MAPE, und SMAPE.

Für keine Zielvariable wurden akzeptable Modellgüten erreicht. Insbesondere der SMAPE-Wert für die Zielvariablen 3.1 bis 3.6 auf eine unzureichende bis sehr schwache Prognosegenauigkeit hin.

Entscheidungsbaumregression

Zielvariablen	MAE	MSE	RMSE	MAPE	SMAPE	R ²
1	0.096	0.020	0.142	1.500	0.581	0.344
2	0.073	0.011	0.105	1.355	0.579	0.183
3.1	0.055	0.008	0.087	2.876	0.734	0.355
3.2	0.059	0.008	0.087	3.736	0.711	0.367
3.3	0.065	0.012	0.11	2.112	0.631	0.185
3.4	0.046	0.004	0.064	22.129	0.984	0.151
3.5	0.051	0.006	0.079	4.901	0.784	0.213
3.6	0.055	0.008	0.087	2.800	0.754	0.345

Tabelle 15: Modellgüte der Entscheidungsbaumregression für verschiedene Zielgrößen und Metriken.

Abbildung 93 zeigt den Entscheidungsbaum für die Zielvariable 2 bis zu einer Tiefe von 3. Dabei wird im ersten Blatt über das Messverfahren entschieden, im zweiten dann über das Alter, und danach werden unterschiedliche binäre Entscheidungen getroffen. Die maximale Tiefe war 13.

Die grössten Einflussfaktoren für den Entscheidungsbaum waren in abnehmender Reihenfolge der Höhe über Meer, die Art des Bauwerks wie Brücken, das Alter der Proben, sowie die Messverfahren, darunter Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF) und Verfahren mit sensitiven Elektroden.

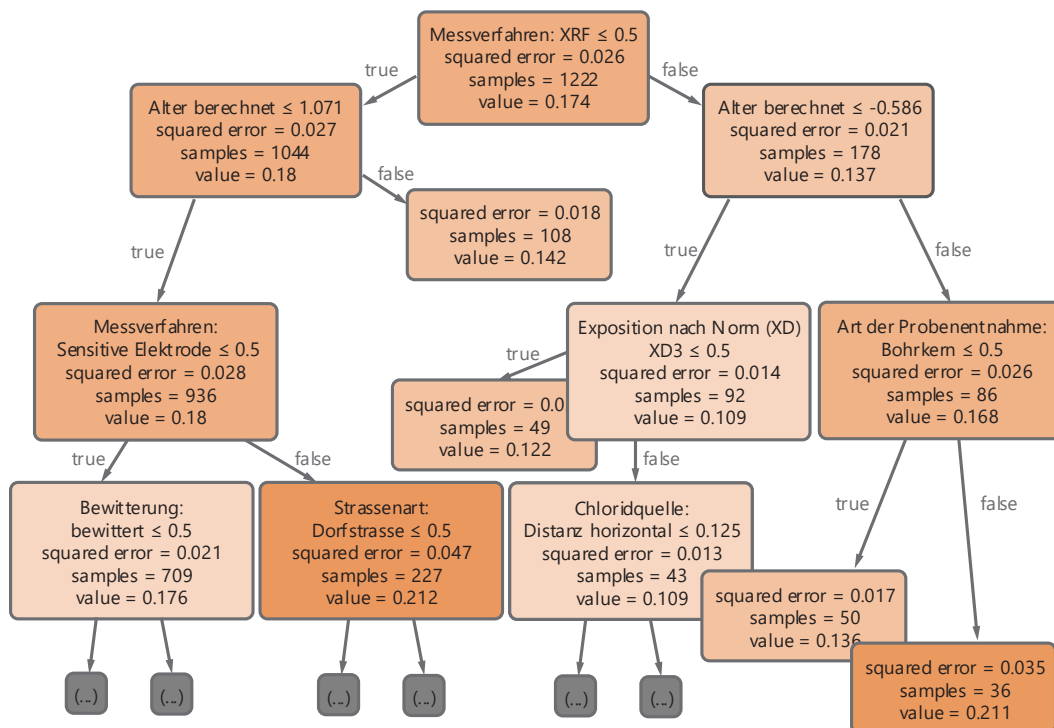


Abbildung 93: Entscheidungsbaum für die Vorhersage der Zielvariable 2 bis auf eine Tiefe von 3 von insgesamt 13 Stufen.

Falls die zusätzlichen Features (vgl. Kapitel 4.2.3) ebenfalls für die Vorhersage eines Entscheidungsbaumes verwendet werden, steigert sich die Prognosegenauigkeit nicht zwingend. Die Ergebnisse unterscheiden sich je nach Zielvariable und je nach zufällig

5initialisierter Optimierung. Teilweise sind Verbesserung in den Metriken feststellbar, in einigen Fällen hat sich die Modellgüte aber verschlechtert. Zusätzlich hat sich die Anzahl der Inputparameter nochmals erhöht, was in einem Ingenieurmodell nochmals zu zusätzlichem Aufwand führen wird.

Abbildung 94 zeigt für einen optimierten Entscheidungsbaum exemplarisch die Wichtigkeit der einzelnen erklärenden Variablen. Die meiste Information befand sich im Eintrag «Höhe über OK Fahrbahn», gefolgt von der Höhe über Meer und anschließend folgt die Variable Höhe über Meer dividiert durch das Probenalter («Alter berechnet»). Durch die Verwendung des One-Hot-Encoding hat sich die Anzahl der erklärenden Variablen vervielfacht.

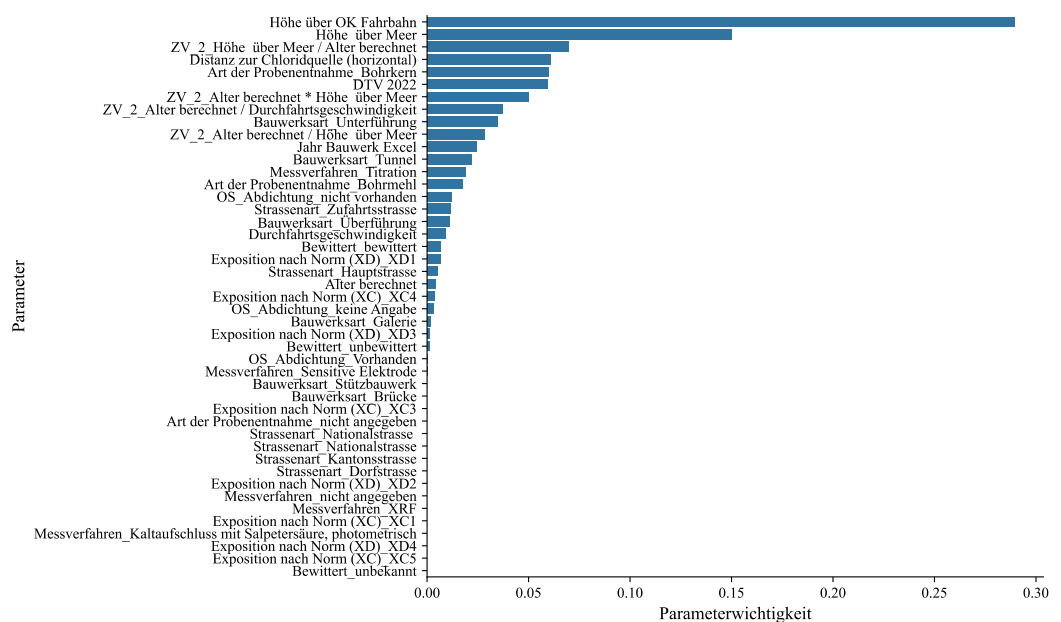


Abbildung 94: Parameterwichtigkeit (Feature Importance) für den Entscheidungsbaum mit Feature Engineering der Vorhersagen für Zielvariable 2.

Es ist wichtig, an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass die ermittelte Feature Importance stets modell- und zielvariablenabhängig ist. Das bedeutet, dass die identifizierte «Wichtigkeit» einzelner Parameter (Features) für die Vorhersage nicht allgemeingültig ist, sondern davon abhängt, welches Modell verwendet wird. Ein bestimmtes Merkmal kann beispielsweise für die Vorhersage des oberflächennahen Chloridgehalts (z. B. Zielvariable 1) sehr relevant sein, während es für tiefere Tiefenbereiche (z. B. Zielvariable 3.6) oder für andere Modelle nur eine untergeordnete Rolle spielt. Daher sind die dargestellten Feature-Wichtigkeiten als modellinterne Einschätzungen zu verstehen, die im Kontext der gewählten Zielvariable und des Modelltyps interpretiert werden müssen. Ein Vergleich zwischen verschiedenen Zielgrößen oder Modelltypen ist nur bedingt möglich und sollte stets unter Berücksichtigung des jeweiligen Modells resp. sogar der Modellarchitektur erfolgen.

Die Analysen mit einem Entscheidungsbaum zur Vorhersage der acht Zielvariablen weisen darauf hin, dass ein einzelner Entscheidungsbaum möglicherweise nicht ausreicht, um die Zielvariablen von 3.1 bis 3.6 adäquat abzubilden. Dies sollte mit der

Lernkurve für Zielvariable 2 veranschaulicht werden (siehe Abbildung 95). In dieser Grafik wird nach der Parameteroptimierung geprüft, in einer 5-fachen Kreuzvalidation, wie sich der Unterschied im Prognosefehler zwischen Trainings- und Validierungsdatensatz für unterschiedliche Anzahl von Chloridprofilen entwickelt. Mit zusätzlichen Daten erhöht sich auf dem Trainingsdatensatz die MSE leicht, dies könnte auf Overfitting für kleine Trainingsdatensätze hindeuten. Die Ungenauigkeit der Vorhersage steigt tendenziell mit einer Erhöhung der Datenmenge an. Die Differenz zwischen Training und Validierungsdatensatz bleibt bestehen und deutet wiederum auf ein über-angepasstes Modell an. Zusätzlich ist die Standardabweichung auf den Validierungsdaten deutlich höher als auf dem Trainingsdatensatz, was ebenfalls auf eine Overfitting hindeutet.

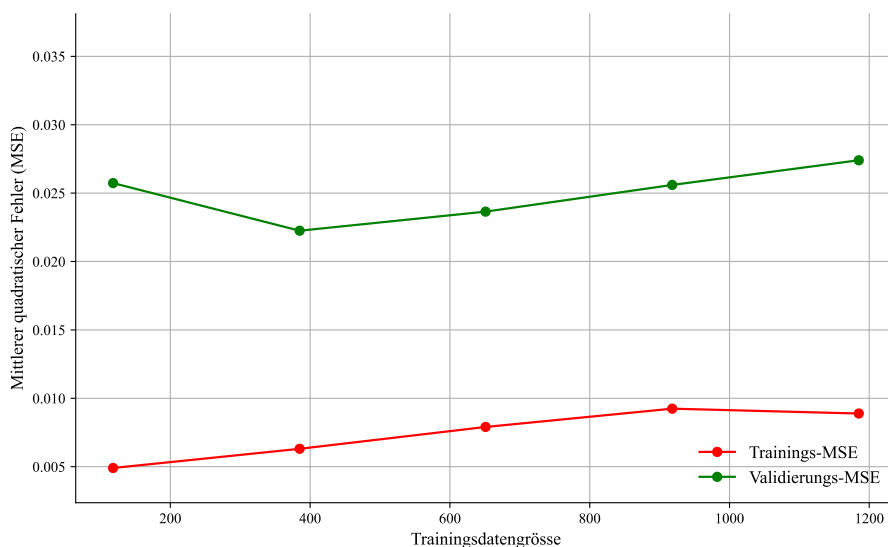


Abbildung 95: Lernkurve für Zielvariable 2 und einen Entscheidungsbaum.

Möglichkeiten zur Reduzierung der Wahrscheinlichkeit von Overfitten bei Entscheidungsbäumen sind das nachträgliche Beschneiden des Baumes oder die Beschränkung der Tiefe des Baumes in der Hyperparameteroptimierung. Eine weitere Option wären der Einsatz von anderen Modellen wie beispielsweise Randomforests oder HistGradientBoostingRegressor.

4.2.4.3 HistGradientBoostingRegressor als Regression

Ein komplexeres Modell stellt beispielsweise der sogenannte HistGradientBoostingRegressor dar, welcher viele Entscheidungsbäume sequenziell aufbaut. Im Folgenden wurde derselbe Datensatz aus Kapitel 4.2.4.2 mit der Optimierung bis auf die Hyperparameteroptimierung übernommen und nochmals berechnet. Ansonsten wurde nochmals dasselbe Modell verwendet.

Tabelle 16 liefert eine Übersicht über die Güte der Modelle für die acht Zielvariablen unter Verwendung der Metriken MAE, MSE, RMSE, MAPE, SMPE und des Bestimmtheitsmass. Die Metriken sind generell höher im Vergleich zu den Werten des Entscheidungsbaumes aus Tabelle 15.

HistGradientBoostingRegressor

Zielvariablen	MAE	MSE	RMSE	MAPE	SMAPE	R ²
1	0.092	0.018	0.135	1.505	0.579	0.404
2	0.068	0.009	0.095	1.387	0.569	0.325
3.1	0.053	0.007	0.082	3.777	0.742	0.431
3.2	0.057	0.007	0.081	4.750	0.715	0.452
3.3	0.060	0.010	0.102	3.056	0.609	0.300
3.4	0.043	0.004	0.060	19.674	0.993	0.257
3.5	0.048	0.005	0.069	6.504	0.792	0.401
3.6	0.053	0.007	0.083	4.161	0.755	0.397

Tabelle 16: Modellgüte der HistGradientBoostingRegressor für verschiedene Zielgrößen und Metriken.

Die Analyse demonstriert, dass durch eine Erhöhung der Modellkomplexität die Prognoseleistung gesteigert werden kann. Die Prognoseleistung soll ebenfalls über zusätzliche Parameter oder aggregierte Parameter gesteigert werden.

4.2.4.4 Einfaches neuronales Netzwerk als Regression

Es wurde ein einfaches künstliches neuronales Netzwerk (KNN) zur Regressionsmodell eingesetzt, um die acht Zielgrößen zu prognostizieren. Die Architektur wurde systematisch mit Optuna [56] optimiert. Hierbei wurden Hyperparameter wie die Anzahl der versteckten Schichten, deren Neuronenzahl, Aktivierungsfunktionen (z. B. ReLU, Tanh), Dropoutraten und Lernrate angepasst. Für die Optimierung wurde eine 3-fache Kreuzvalidierung verwendet.

Zur Vorverarbeitung wurden fehlende numerische Werte durch den Median, kategoriale durch die häufigste Kategorie ersetzt. Kategorische Variablen wurden mittels One-Hot-Encoding kodiert und alle Eingaben standardisiert. Nach Abschluss der Optimierung wurde das beste Modell auf einem Testdatensatz evaluiert.

Tabelle 17 zeigt die unterschiedlichen Fehlermetriken der neuronalen Netzwerke für jede Zielvariable. Die R²-Werte variieren stark und sind für Zielvariable 2 mit R² = 0.33 am besten. Die Fehlerkennwerte (MAE, RMSE, MAPE, SMAPE) sind in der Größenordnung vergleichbar mit denjenigen der baumbasierten Modelle. Hervorzuheben ist jedoch, dass die neuronalen Netzwerke im Mittel keine signifikante Verbesserung erzielen.

Neuronale Netzwerke

Zielvariablen	MAE	MSE	RMSE	MAPE	SMAPE	R ²
1	0.099	0.021	0.144	1.692	0.617	0.321
2	0.071	0.010	0.102	1.430	0.584	0.215
3.1	0.058	0.008	0.088	3.604	0.820	0.347
3.2	0.061	0.007	0.084	4.973	0.766	0.401
3.3	0.067	0.012	0.108	2.552	0.714	0.206
3.4	0.048	0.004	0.066	26.762	1.042	0.099
3.5	0.056	0.006	0.079	8.702	0.926	0.218
3.6	0.060	0.008	0.091	5.624	0.858	0.289

Tabelle 17: Modellgüte der neuronalen Netzwerke für verschiedene Zielgrößen und Metriken mit Feature Engineering.

Die Resultate deuten darauf hin, dass einfache neuronale Netzwerke zwar in der Lage sind, gewisse nicht-lineare bzw. komplexe Zusammenhänge besser zu erfassen als die linearen Modelle. Insgesamt jedoch bleibt die Modellgüte nicht zufriedenstellend.

4.2.5 Fazit

Die Analyse des Datensatzes von tausalzexponierten Bauwerken hat aufgezeigt, dass die Vorhersage der Chloridkonzentration eine komplexe Herausforderung darstellt. Die Auswertung zahlreicher Modelle unter Anwendung von linearen Korrelationsanalysen, Streudiagrammen zur Identifikation von nichtlinearen Zusammenhängen und verschiedenen maschinellen Lernverfahren lieferte wertvolle Erkenntnisse über die Limitationen bei der Prognose der Chloridbeaufschlagung.

Die meisten numerischen Variablen zeigten nur schwache lineare Korrelationen ($|R^2| < 0.3$). Durch Streudiagramme wurden teilweise nicht-lineare Trends besser sichtbar, wie sie bereits auch in Kapitel 4.1 punktuell herausgearbeitet wurden. Beispiele von somit identifizierten Einflussgrößen waren die horizontale Distanz zur Chloridquelle, sowie die Höhe über Fahrbahn. Zur genaueren Analyse wurde der Datensatz nach Bauwerksarten aufgeteilt. Dabei zeigten sich in den Subgruppen teils höhere Korrelationen, jedoch verringerte sich die Anzahl der Wertepaare deutlich, was die statistische Aussagekraft einschränkt.

Weiter wurden ANOVA-Analysen durchgeführt, um auch mögliche Einflüsse von kategorischen Parametern zu prüfen. Kategorische Parameter (z. B. Strassenart, Probenart, etc.) unterscheiden sich von numerischen Parameter (z. B. Distanz von Chloridquelle, Bauwerksalter, etc.) und können damit nicht gleichermassen analysiert werden. Somit wurden ANOVA-Tests durchgeführt, um zu untersuchen, ob die Mittelwerte der kontinuierlichen Zielvariablen sich signifikant zwischen den Gruppen unterscheiden, welche durch die kategorischen Parameter gebildet werden. Die ANOVA-Analyse förderte signifikante Einflüsse, insbesondere betreffend das Messverfahren (Messverfahren für den Chloridgehalt in der Betonprobe), die Probenentnahmeart (Bohrkern vs. Bohrmehl), die Bauwerksart und die Strassenart zutage.

Mit Blick auf Maschinelles Lernen (ML), wurden mittels Feature Engineering neue Variablen gebildet, um die Prognosequalität zu verbessern. Zur Vorhersage der Zielvariablen wurden schliesslich verschiedene ML-Modelle getestet. Während einfache Modelle wie lineare Regression geringe R^2 -Werte zeigten, erreichten komplexere Verfahren wie Entscheidungsbaum, Zufallswald, Gradient Boosting und XGBoost höhere, aber weiterhin niedrige R^2 -Werte (unter 0.4). Dies deutet möglicherweise darauf hin, dass die Streuungen erheblich sind oder das lokale Mikroklima mit den Parametern aus der Datenbank nicht adäquat abgebildet werden kann. Insbesondere bei horizontalen Flächen ist beispielsweise zu beachten, dass diese durch bauliche Randbedingung wie Gefälle örtlich variierend unterschiedlich stark oder lange mit Chloriden beaufschlagt sein können.

Die Analyse der Parameterwichtigkeit hat zudem gezeigt, dass deren Bewertung stark vom verwendeten Modell abhängt. Das bedeutet, dass ein Parameter, der in einem bestimmten Modell (z. B. Entscheidungsbaum) als einflussreich erscheint, in einem anderen Modell (z. B. linearer Regression oder Gradient Boosting) eine deutlich geringere Bedeutung aufweisen kann. Die Feature Importance ist somit keine objektive Grösse, sondern immer im Kontext der jeweiligen Modellarchitektur und der gewählten Zielvariable zu interpretieren. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, Modellwahl und Ergebnisinterpretation stets gemeinsam zu betrachten und nicht isoliert einzelne Merkmale als «Haupteinflussgrössen» zu definieren.

4.2.6 Expertenwissen

Im Rahmen eines Workshops unter Beteiligung des Projektteams, sowie unter Berücksichtigung von Mitgliedern der Begleitkommission dieses Forschungsprojekts, auch anlässlich diverser Begleitkommissionssitzungen, wurden verschiedene Überlegungen zur «Zielvariablen» angestellt. Ein weiteres zentrales Thema war die Selektion wichtiger Parameter aus der Datenbank mit dem Ziel, die Vorhersagen zu verbessern und die Anzahl, möglicherweise redundanter, Parameter einzugrenzen. Nicht zuletzt wurde auch über die Form eines möglichen Ingenieuransatzes zur Abschätzung der Chloridbelastung in der Praxis diskutiert, insbesondere unter laufender Berücksichtigung der Projektergebnisse.

4.2.6.1 Definition einer Zielvariablen

Eine wichtige, wiederholt diskutierte Grundsatzfrage war, ob die Oberflächenchloridkonzentration C_s , wie sie aus gefitteten Chloridprofilen auf die Tiefenstufe $x=0$ mm extrapoliert werden kann, wirklich die optimale Zielvariable aus Sicht Praxis darstellt. Dieser Parameter wird in der Praxis nämlich kaum bestimmt, da es im Zuge von Zustandsbeurteilungen nicht üblich ist, gemessene Chloridprofile mit mathematischen Modellen zu fitten und C_s zu extrahieren. Solche Analysen werden allenfalls in Spezialfällen gemacht, sind aber keineswegs Routine.

Aus diesem Grund existieren nur selten Werte für die Oberflächenchloridkonzentration C_s und entsprechend haben Fachkräfte auch kein «Gefühl» und keine Intuition für diesen Wert ausgebildet. Jedoch haben Fachkräfte durchaus erfahrungsbasiert ein Gespür für den Maximalwert des gemessenen Chloridprofils, welcher erfahrungsgemäss häufig zwischen 10 und 20 mm liegt. Aus Sicht der Ingenieurpraxis wäre es daher zielführend, die «Chloridbelastung von Bauwerken» in Form von Maximalwerten bzw.

Werten des Chloridgehalts im Beton in der Tiefenstufe 10-20 mm, alternativ 20-30 mm, anzugeben. Bei diesen Tiefenstufen weisen auch die meisten Chloridprofile in der hier gesammelten Datenbank Werte auf.

Mit Blick auf die Verwendung von quantitativen Informationen zur «Chloridbelastung von Bauwerken», sei es zwecks Modellierung der Lebensdauer (Neubauten) oder Abschätzung der Restlebensdauer (bestehende Bauwerke), erscheint hier insbesondere die Oberflächenchloridkonzentration C_s auf der Tiefenstufe $x = 0$ mm als gut geeignete Kenngrösse. Allerdings können solche numerischen Modelle auch sehr gut mit C_s -Werten auf Tiefenstufen wie $x=10$ mm oder $x=20$ mm umgehen.

4.2.6.2 Mögliche Konzepte für ein Ingenieurmodell zur Vorhersage der Chloridbeaufschlagung

Im Workshop wurden verschiedene Ansätze zur Bestimmung des Oberflächenchloridgehaltes resp. eines anderen repräsentativen Wertes diskutiert, wie diese bereits in Kapitel 3.3 vorgestellt wurden. Es zeichnete sich jedoch ab, dass es angesichts der Ergebnisse der Datenanalyse schwierig sein dürfte, die meisten dieser initialen Ideen (Nomogramme, Chloridbelastungslandkarten, Formeln, etc.) umzusetzen.

4.2.6.3 Wichtigkeit der Parameter in der Datenbank

Im Rahmen des Workshops wurden die Experten befragt, welche Parameter der Datenbank (Kapitel 3.1.2) basierend auf ihren Erfahrungen grosse Auswirkungen auf den zu erwartenden Chloridgehalt im Beton haben.

Die Teilnehmer wurden in vier Zweiergruppen eingeteilt und nach einer qualitativen Einschätzung massgebender Parameter befragt, anhand einer qualitativen Skala von 1 bis 5. Tabelle 18 zeigt eine Übersicht über die Einreihung der Wichtigkeit der Parameter inklusive einer kurzen Beschreibung, welche Bezug auf ein mögliches Ingenieurmodell nimmt.

Qualitative Einreihung		
Wichtigkeit	Nummer zur Codierung	Beschreibung
Zwingend notwendig	5	Dominanter Einflussfaktor
Sehr	4	Notwendig für ein mögliches Ingenieurmodell
Mittel	3	Kann bei Bedarf ermittelt werden
Wenig	2	Liefert wenig zusätzliche Information
Nicht relevant	1	Müsste gar nicht in der Datenbank vorhanden sein

Tabelle 18: Qualitative Einreihung der Parameter in der Datenbank gemäss Beurteilung von Fachexperten.

Abbildung 96 ist eine Zusammenfassung der einzelnen Bewertungen der Zweiergruppen. Die Bewertungen der Gruppen wurden gemittelt und absteigend sortiert, wobei die Parameter mit der höchsten gemittelten Bewertung bis zum zehnten Platz dargestellt sind. Drei Parameter erreichten im Durchschnitt eine Bewertung des maximal möglichen Wertes (vgl. Tabelle 18). Die nächsten drei Parameter erreichten im Durchschnitt eine 4.5 und der letzte Parameter (Winkel relativ zur Horizontalen) hat immer noch eine Bewertung von über 3 im Mittel. Eine Bewertung von 3 impliziert, dass

dieser Parameter in einem möglichen Modell berücksichtigt werden kann, aber es nicht zwingend ist.

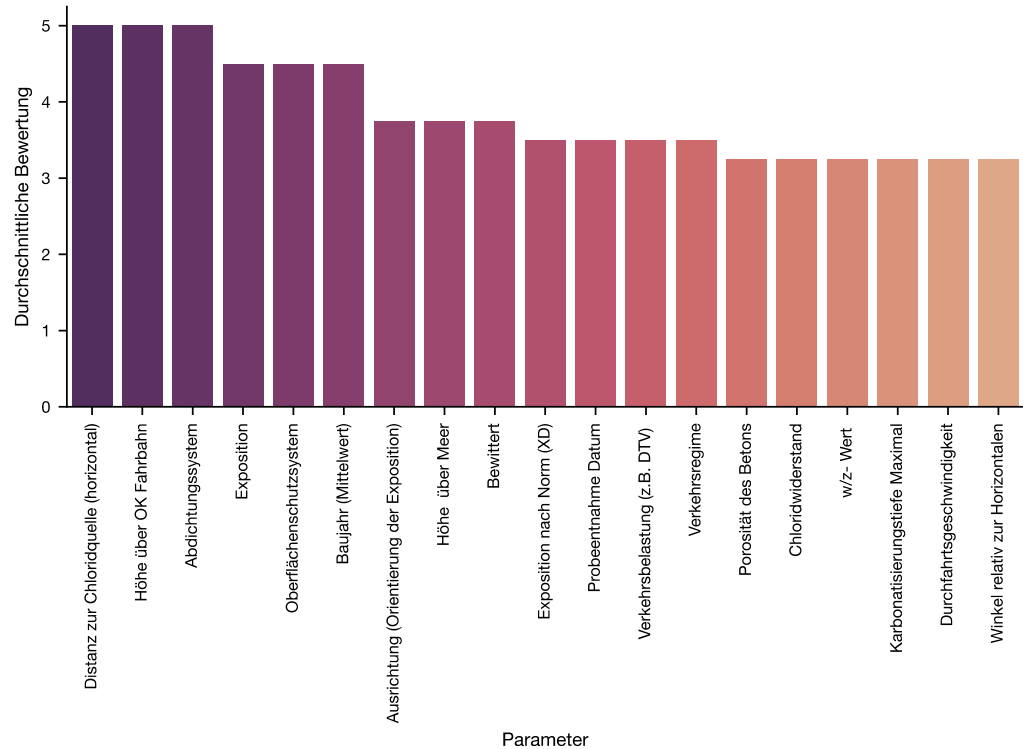


Abbildung 96: Übersicht über die 19 wichtigsten Parameter in absteigender Reihenfolge (5 = sehr wichtiger Parameter, 1 = unwichtiger Parameter), basierend auf die gemittelten, subjektiven Einschätzungen von Fachexperten.

Interessant ist hierbei, dass Fachexperten aufgrund ihrer Praxiserfahrung die Parameter «horizontale Distanz zur Chloridquelle» und «Höhe über OK Fahrbahn» als die zwei wichtigsten Einflussgrößen beurteilen, gemeinsam bzw. dicht gefolgt mit Parametern, die eine gewisse oberflächliche Barriere gegenüber Chloriden darstellen können (Abdichtungs- und Oberflächenschutzsysteme), sowie der Exposition. Ebenfalls als einflussreich beurteilen Fachexperten das Bauwerksalter bzw. Baujahr, sowie die Ausrichtung (Orientierung) der Betonoberfläche zur Chloridquelle. Im Folgenden werden diese Einschätzungen, die nicht nur intuitiv, sondern auch praxis- und erfahrungsbasiert sind, mit den Ergebnissen der in diesem Bericht präsentierten Datenanalyse verglichen.

Es lässt sich festhalten, dass Sachverstand und Erfahrung der Fachexperten in einigen Belangen gut mit der Datengrundlage übereinstimmen. So zeigte auch die Datenanalyse, dass beispielsweise die «horizontale Distanz zur Chloridquelle» und «Höhe über OK Fahrbahn» tatsächlich einen Einfluss auf die Chloridmenge im oberflächennahen Beton haben (vgl. Kapitel 3.1.3.13 und 3.1.3.14). Der von den Experten als bedeutend eingestufte Einfluss von Abdichtungen oder Oberflächenschutzsystemen ist nachvollziehbar, lässt sich jedoch mit den Daten nicht unterstützen, was primär daran liegt, dass bei den meisten Einträgen in der Datenbank keine oder unklare Informationen zu Abdichtungen oder Oberflächenschutzsystemen erfasst werden konnten und es somit

schwierig war, den Einfluss von Abdichtungen und Oberflächenschutzsystemen abschliessend zu quantifizieren. Effekte, die mit der Exposition im Zusammenhang stehen, ebenfalls von den Experten als bedeutsam eingestuft, hingegen, spiegeln sich durchaus in den Daten der Datenbank. Eindrücklich zeigt sich dies beispielsweise an der «Ausrichtung» der Betonfläche, namentlich der Strasse zu- oder abgewandt, vgl. Kapitel 4.1.5. Auch die Expositionsklasse (XD3 vs. XD1) zeigte einen signifikanten Effekt in den Daten (Kapitel 4.1.8), und ist damit im Einklang mit der Einschätzung der Fachexperten.

Auch die Datenanalyse mittels maschinellen Lernens förderte als die einflussreichsten Parameter ein ähnliches (wenn auch nicht deckungsgleiches) Bild zutage (vgl. beispielsweise Abbildung 94), wie es die Experten aufgrund ihrer Erfahrung einschätzten.

4.2.6.4 Weitere Auswertungen

Aufgrund der im Workshop identifizierten zwei wichtigen Einflussgrössen in Bezug auf die Distanz der Betonoberfläche zur Chloridquelle (horizontal, vertikal), wurde weiter die Relevanz einer Visualisierung der Distanz von Chloridprofilen zu den Chloridquellen (Strassen) mit dem Chloridgehalt diskutiert. Auf Basis der Daten wurde dieser Zusammenhang in Kapitel 6 illustriert.

Ein negativer Trend des maximal gemessenen Chloridgehaltes mit zunehmender Distanz kann festgestellt werden. Bis auf die markierten Ausreisser folgen die Daten qualitativ diesem Trend. Die Ausreisser sind aufgrund des Vorkommens von Fliessspuren zu begründen. Solche Fliessspuren können entstehen, wenn Wasser geneigten Bauwerksteilen entlangfliesst, und somit grössere Distanzen zurücklegt, als durch reine Sprühnebel- und Spritzwassertransportmechanismen. Dies kann in Einzelfällen dazu führen, dass erhöhte Chloridgehalte im Beton selbst bei relativ grossen Distanzen (hier in der Grössenordnung von 10 m) auftreten. Aufgrund des unterschiedlichen Mechanismus des Chlорideintrags, wurden solche Datensätze im Zusammenhang mit Fliessspuren für andere Analysen ausgeschlossen (z. B. Kapitel 4.1.8.1).

In Abbildung 98 wurden die maximalen Chloridgehalte für die Expositionsklassen XD1 und XD3 pro Intervall aus der Datenbank dargestellt. Für beide Expositionsklassen wurde eine Exponentialfunktion gefittet. Profile mit Fliessspuren wurden in dieser Auswertung explizit ausgeschlossen, um eine Verzerrung der Trendlinien zu vermeiden.

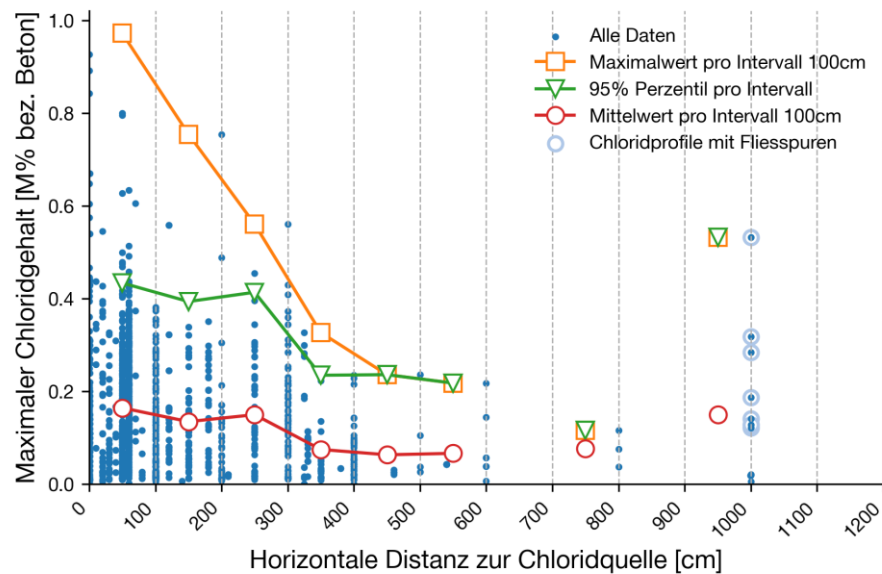


Abbildung 97: Maximaler Chloridgehalt der Chloridprofile pro Intervall in Relation zur horizontalen Distanz zur Chloridquelle.

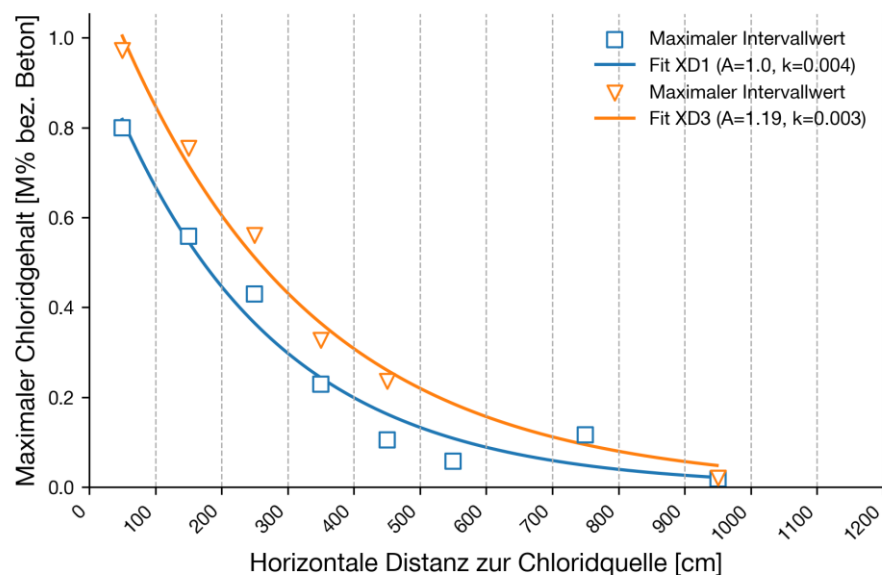


Abbildung 98: Maximaler Chloridgehalt der Chloridprofile pro Intervall entsprechend ihren Expositions-kategorie in Relation zur horizontalen Distanz zur Chloridquelle. Chloridprofile an Fließspuren wurden nicht berücksichtigt.

4.2.6.5 Fazit

Die im Workshop geführten Diskussionen und Auswertungen verdeutlichen, dass die Wahl einer geeigneten Zielgrösse sowie die Auswahl relevanter Eingangsparameter entscheidend für die Entwicklung eines praxistauglichen Ingenieurmodells zur Prognose der Chloridbelastung von Bauwerken der Strasseninfrastruktur ist. Je nach Anwendungszweck eignen sich manche Zielvariablen besser als andere. Während Fachkräfte aus der Praxis erfahrungsbasiert ein Gefühl für den Maximalwert des gemessenen Chloridprofils haben (typischerweise in Tiefen von 10-20 oder 20-30 mm), fehlt ihnen ein entsprechendes Gefühl für Chloridkonzentration an der Oberfläche (auf Tiefenstufe 0 mm). Diese Grösse, C_s , ist eher eine abstrakte, theoretische Grösse, die in

der Praxis nicht messbar ist, sondern sich aus der Analyse (mathematisches Profil-Fitting) ergibt – ein Verfahren, das in der Praxis nicht zur Routine gehört. Aus Sicht der Ingenieurpraxis wäre es daher zielführend, die «Chloridbelastung von Bauwerken» in Form von Maximalwerten bzw. Werten des Chloridgehalts im Beton auf Tiefenstufe 10-20 mm, alternativ 20-30 mm, anzugeben. Mit Blick auf die Verwendung von quantitativen Informationen zur «Chloridbelastung von Bauwerken» zwecks Modellierung der Lebensdauer (Neubauten) bzw. der Restlebensdauer (bestehende Bauwerke) hingegen, würde sich die Oberflächenchloridkonzentration C_s auf die Tiefenstufe $x=0$ mm besser eignen.

Es hat sich weiter gezeigt, dass der Sachverstand und die Erfahrung der Fachexperten in einigen Belangen gut mit der Datengrundlage übereinstimmen. Sowohl direkte Korrelationsbetrachtungen, als auch komplexere Analysen mittels maschinellen Lernens förderten als die einflussreichsten Parameter ein ähnliches Bild zutage, wie es die Experten aufgrund ihrer Erfahrung einschätzten.

Für ein allfälliges Ingenieurmodell wurden unterschiedliche Ansätze diskutiert – etwa eine Formel basierend auf zentralen Einflussgrößen, eine Chloridkarte ähnlich der Schneelastkarte oder Tabellen mit typischen Belastungswerten für unterschiedliche Bauteile oder Bauwerke. Auch eine Differenzierung der bestehenden Expositionsklassen, insbesondere eine Aufsplittung von XD3, wurde in Betracht gezogen. Zur Beschreibung der Streuung könnten zusätzlich statistische Kenngrößen wie die Standardabweichung verwendet werden. Die beobachtete Streuung ist dabei meist auf Unterschiede im Mikroklima sowie auf variierende Expositionsbedingungen zurückzuführen, denen die Bauwerke ausgesetzt sind bzw. die sich im direkten Umfeld der Bauwerke ausbilden.

5 Ingenieurmodelle

5.1 Überprüfung existierender Modelle

Ziel ist es, ein bekanntes Modell zur Abschätzung der Chloridbelastung zu prüfen. Die Untersuchung des Modells kann auf zwei Arten erfolgen: erstens durch die Anwendung eines existierenden Modells unter Berücksichtigung der Daten aus diesem Projekt oder zweitens durch eine Anpassung des Modells anhand der Projektdaten.

5.1.1 Prognose der Oberflächenchloridkonzentration nach Lay

Die Oberflächenchloridkonzentration kann gemäss Vorschlag von Lay [27] mittels Gl. (2) und den beiden Parametern horizontale und vertikale Distanz zur Oberfläche aus der Datenbank abgeschätzt werden. Für die weiteren Parameter wurden die gleichen Annahmen wie in [27] belassen, da diese ebenfalls von Strassenbauwerken exponiert durch Taumittel stammen. Für diese Analyse standen knapp 1'000 Datensätze (Messdaten) zur Verfügung, welche sämtliche Vorraussetzungen erfüllten. Es wurden ausschliesslich vollständige Datensätze berücksichtigt und keine fehlenden Werte imputiert.

Abbildung 99 links veranschaulicht die Häufigkeitsverteilung der horizontalen und vertikalen Abstände in der Datenbank. Abbildung 99 rechts präsentiert die entsprechenden Oberflächenchloridkonzentrationen, berechnet gemäss der in der Literatur vorgeschlagenen Gl. (2).

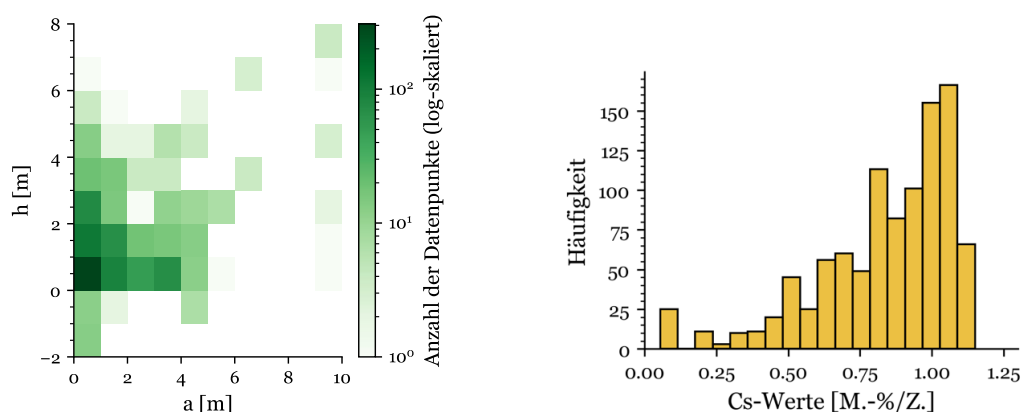


Abbildung 99: Häufigkeitsverteilung zwischen horizontalem und vertikalem Abstand in der Datenbank (links) und ein Histogramm der berechneten Werte für die Oberflächenchloridkonzentration (rechts).

Abbildung 100 zeigt eine Gegenüberstellung des Vorhersagemodells von Lay mit den in der vorliegenden Arbeit gesammelten Daten, namentlich in Form von Zielvariable 1. Diese Zielvariable entspricht dem fiktiven Oberflächenchloridgehalt aus den Fittingroutinen, d.h. extrapoliert auf Tiefe $x=0$. Um den Vergleich der vorliegenden Daten

mit jenen von Lay zu erlauben, wurde der Chloridgehalt (bezogen auf Betongewicht) mit einem Faktor von 7 multipliziert, im Sinne einer Umrechnung auf das Zementgewicht. Aus der Analyse wird ersichtlich, dass der effektive Chloridgehalt, wie er in den Bauwerken der vorliegenden Datenbank gemessen wurde, in den meisten Fällen durch das Modell von Lay stark unterschätzt wird. Die Prognose zeigt eine MAE von 0.89, einen RMSE von 1.25 sowie einen negativen R^2 von -0.21 , was auf eine unzureichende Modellgüte hinweist. Insbesondere deuten MAPE (1.49) und SMAPE (0.80) auf erhebliche relative Fehler in der Vorhersage hin.

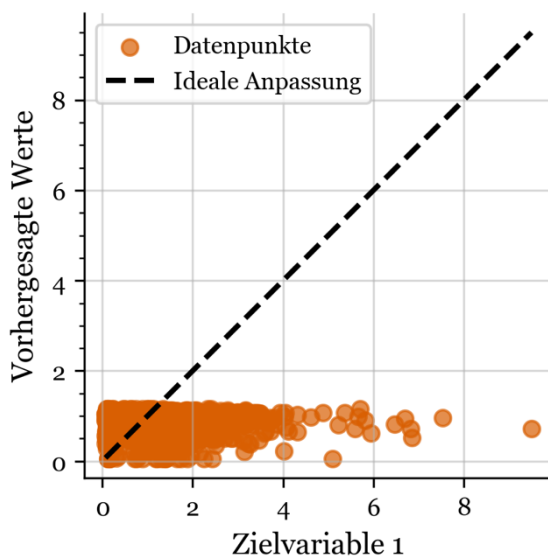


Abbildung 100: Auswertung der Modellgüte nach Lay im Vergleich zur Zielvariablen 1, welche mit einem Faktor von 7 auf den Chloridgehalt bezüglich Zements umgerechnet wurde. Achseneinheit: % Chlorid / Zementgewicht

Als nächstes soll das Modell auf die Zielvariable 2 (Maximalwerte der gemessenen Chloridprofile) angewendet werden; dabei werden die gleichen Annahmen wie für die Zielvariable 1 getroffen. Abbildung 101 zeigt erneut eine Gegenüberstellung des maximalen, gemessenen Chloridwertes gegenüber der Prognose des Modells nach Lay.

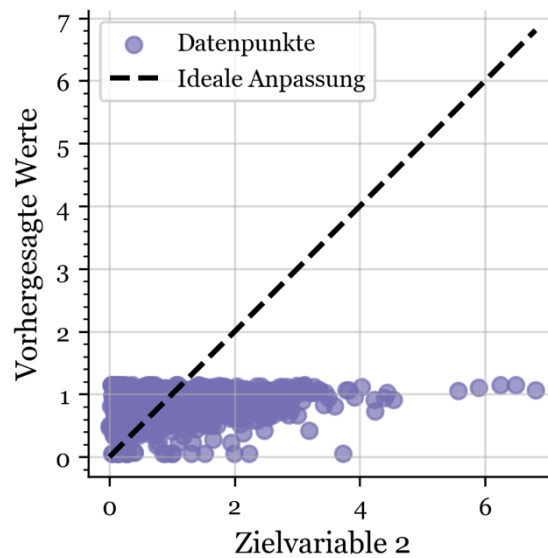


Abbildung 101: Auswertung der Modellgüte nach Lay im Vergleich zur Zielvariable 2, welche mit einem Faktor 7 auf den Chloridgehalt bezüglich Zements umgerechnet wurde. Achseneinheit: % Chlorid / Zementgewicht

Die Modellvorhersagen weisen erhebliche Fehler auf ($MAE = 0.66$, $MSE = 0.87$, $RMSE = 0.93$). Der sehr hohe mittlere absolute prozentuale Fehler ($MAPE = 1.60$) und der symmetrische mittlere absolute prozentuale Fehler ($SMAPE = 0.69$) deuten auf grosse Ungenauigkeiten hin. Die Zielvariable wird in den meisten Fällen deutlich unterschätzt. Die Untersuchung von Subdatensätzen, kategorisiert nach Bauwerksart, ergab keine signifikante Verbesserung der Prognosemodelle resp. der Modellgüte.

Eine Bestimmung von $\mu_{C_{smax}}$ und μ_{rmax} aus den rund 1'000 Einträgen aus diesem Projekt über eine Anpassung mit dem Ziel der Minimierung der mittleren quadratischen Abweichung wurde im nächsten Schritt durchgeführt. Die Modellgüte war sehr schlecht ($R^2 = -0.062$), dabei wurde $\mu_{C_{smax}} = 1.43$ und $\mu_{rmax} = 19.7$ m bestimmt und somit höher als in [27]. Insbesondere die Distanz hat sich massiv erhöht.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Modell nach Lay den Oberflächenchloridgehalt, wie er in den Bauwerken der vorliegenden Datenbank gemessen wurde, in den meisten Fällen deutlich unterschätzt. Die absoluten, sowie relativen Fehlerkennwerte fallen entsprechend hoch aus. Auch die Analyse nach Bauwerksart und angewendetem Verfahren führte zu keiner signifikanten Verbesserung der Prognoseleistung. Die Optimierung der Modellparameter anhand der verfügbaren Datensätze ergab zwar leicht veränderte Werte für $\mu_{C_{smax}}$ und μ_{rmax} , führte jedoch ebenfalls nicht zu einer substantiellen Steigerung der Modellqualität. Insgesamt zeigt sich, dass dieses vorgeschlagene Modell in seiner aktuellen Form die Verteilung der gemessenen Oberflächenchloridkonzentrationen mit Chloridprofilen aus der Schweiz nicht angemessen abbilden kann.

5.2 Vorschläge für Ingenieuransätze aus diesem Projekt

Je nach Anwendungsfall sind die Bedürfnisse und Anforderungen an einen «Ingenieuransatz» unterschiedlich. Für die probabilistische Lebensdauermodellierung, wie sie beispielsweise für die Dauerhaftigkeitsbemessung bei neuen Bauwerken, also in der Planungsphase, zur Anwendung kommen kann, wird die Oberflächenchloridkonzentration, C_s , als statistische Verteilung benötigt. Für die Zustandsbeurteilung von bestehenden Bauwerken hingegen, stehen andere Anforderungen im Vordergrund. Hier kann es beispielsweise von Interesse sein, die am Bauwerk gemessenen Chloridprofile zu interpretieren, und die Chloridbelastung am untersuchten Bauwerk zu bewerten, namentlich im Vergleich zu anderen Bauwerken der Strasseninfrastruktur in der Schweiz. Für solch eine Bewertung könnten Boxplots oder andere Darstellungen geeignet sein, welche es erlauben, die im fraglichen Fall gemessenen Chloridwerte in den Kontext der hier zusammengetragenen Datenbank zu stellen.

In den folgenden Kapiteln sind zwei konkrete Vorschläge für solche Ingenieuransätze für diese beiden Anwendungsfälle – probabilistische Lebensdauermodellierung einerseits, und Zustandsbeurteilung bestehender Bauwerke andererseits – präsentiert. Die Ansätze sind abgestützt auf sämtliche Erkenntnisse aus diesem Bericht, namentlich die zusammengetragene Datenbank, und die diversen Analysen der Daten.

Es scheint wichtig, eingangs die Anwendungsgrenzen der Modelle zu betonen. Die Modelle sind explizit nur für folgende Situationen konzipiert:

- Bauwerke der Strasseninfrastruktur, namentlich Tunnel, Brücken, Galerien, Stützen, etc. Parkhäuser, hingegen, wurden hier nicht betrachtet; die vorgeschlagenen Modelle sind daher nicht direkt auf Parkhäuser übertragbar.
- Die Modelle gelten nur für den Chloridtransportmechanismus, bei welchem der Chloridtransport von der Quelle (Strasse) zum Bauwerk durch Spritzwasser und Sprühnebel dominiert ist; andere Transportmechanismen wie beispielsweise Fliessspuren entlang von Betonbauteilen oder anderweitig direkter Chloridwasserkontakt, beispielsweise aufgrund undichter Entwässerungssysteme, Salzlager oder in chemischen Produktionsanlagen, können mit den vorgeschlagenen Modellen explizit nicht abgebildet werden. So wurden entsprechende Datensätze (z. B. Fliessspuren) für die in den nachstehenden Kapiteln präsentierten Auswertungen aus der Datenbank herausgefiltert.
- Schliesslich sei erwähnt, dass die Modelle von in der Schweiz gesammelten Daten abgeleitet wurden; damit ist eine Übertragbarkeit auf andere Länder und Regionen nicht zwingend gegeben.

5.2.1 Vorschlag für Zustandsbeurteilung bestehender Bauwerke

Die nachfolgenden Boxplots zeigen die Chloridkonzentrationen im Überdeckungs beton, namentlich die Maxima der gemessenen Chloridprofile (Abbildung 102 (a)) bzw. aus den gefitteten Profilen extrapolierte Werte auf 20 mm Tiefe (Abbildung 102 (b)) und auf 30 mm Tiefe (Abbildung 102 (c)). Die Daten sind in drei Klassen unterteilt, je nach horizontalem Abstand der chloridexponierten Betonfläche von der Chloridquelle, d.h. von der Fahrspur der Strasse, bei welcher Tausalze aufgebracht werden. Im Nahbereich (<1 m) dürfte dies mehrheitlich einer Exposition XD3 (Spritzwassereexposition)

entsprechen; mit zunehmendem Abstand dürfte die Exposition in XD1 (Sprühnebelexposition) übergehen.

Diese graphischen Darstellungen können bei der Zustandsbeurteilung bestehender Bauwerke hilfreich sein, namentlich um die im Rahmen der Zustandserfassung am Bauwerk gemessenen Chloridprofile zu interpretieren. Durch den Vergleich mit anderen Bauwerken der Strasseninfrastruktur in der Schweiz ermöglichen die Boxplots, die gemessenen Chloridwerte in den Kontext der in dieser Datenbank zusammengetragenen Referenzwerte zu stellen. So kann man beispielsweise die Maxima in den gemessenen Chloridprofilen, die üblicherweise in den Tiefenstufen 10-30 mm auftreten, mit Abbildung 102 (a) vergleichen. Analog lassen sich Chloridkonzentrationen, gemessen auf 20 oder 30 mm Tiefe, mit den Daten in Fig. Abbildung 102 (b), (c) vergleichen und in den Kontext der Chloridbelastung in der Schweizer Strasseninfrastruktur einordnen.

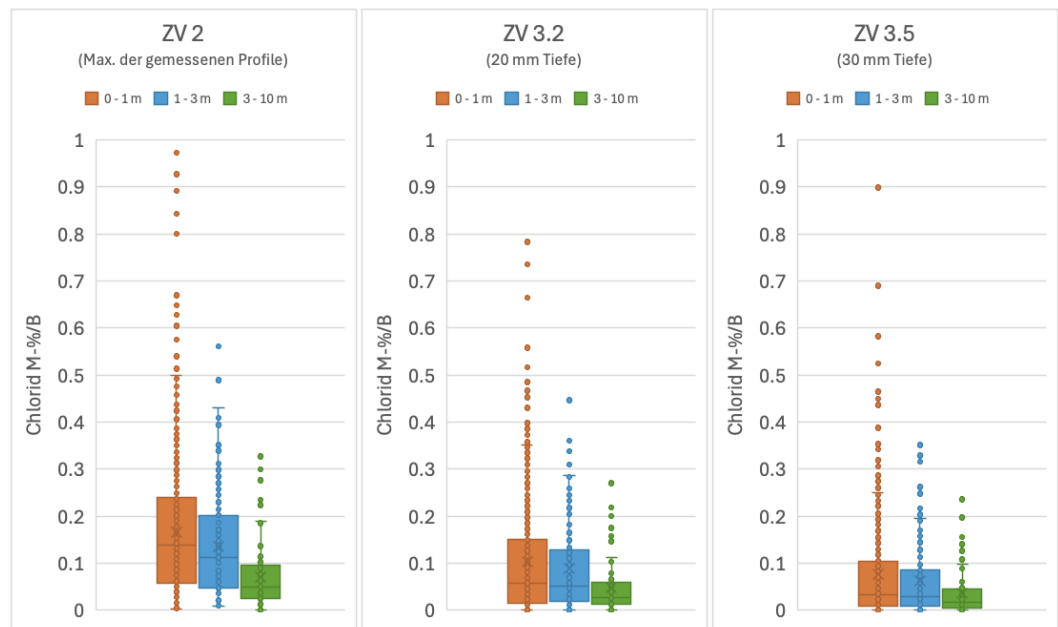


Abbildung 102: Boxplots zur Einordnung gemessener Chloridgehalte (M-% bezogen auf Betongewicht) in den Schweizer Kontext für Spritzwasser bzw. Sprühnebelexposition von Bauwerken der Strasseninfrastruktur (die Abbildung basiert auf > 1500 Chloridprofilen). a) Maxima der gemessenen Chloridprofile in der Datenbank (Zielvariable 2); b, c) Chloridkonzentration auf 20 mm Tiefe (Zielvariable 3.2, Fig. b) und auf 30 mm Tiefe (Zielvariable 3.5, Fig. c), ermittelt anhand der gefitteten Chloridprofile, extrapoliert auf die angegebenen Tiefen, und zu einem Zeitpunkt von 50 Jahren.

Da in der Zustandsbeurteilung, namentlich der Bewertung des Risikos für Bewehrungskorrosion, in der Praxis und Fachliteratur der Chloridgehalt bezogen auf das Zementgewicht gegenüber dem Chloridgehalte bezogen auf das Betongewicht bevorzugt wird, ist in Abbildung 103 eine entsprechende Darstellung gegeben. Die Umrechnung wurde im Sinne einer Abschätzung vorgenommen, da sie für viele der in der Datenbank erfassten Chloridkonzentrationen nicht möglich ist – in zahlreichen Fällen fehlen die dazu erforderlichen Angaben zum Zementgehalt und zur Dichte des Betons. Entsprechend wurde für eine näherungsweise Umrechnung ein Faktor von 7 angesetzt.

Die im vorliegenden Projekt für die Schweizer Strasseninfrastruktur zusammengetragenen Daten können hiermit mit jenen der Langzeitstudie aus Schweden [29] verglichen werden. In der Schwedischen Studie wurden Betonprüfkörper entlang einer

Autobahn direkt hinter der Leitplanke ausgelagert (XD3 Exposition) und die Oberflächenchloridkonzentration nach 20 Jahren aus Chloridprofilmessungen bestimmt (vgl. auch Kapitel 2.4.3). Die dabei gemessenen Werte lagen im Bereich 0.4 bis 2 M-% Chlorid bezogen auf das Zementgewicht, was gut mit den hier gefundenen Werten (Abbildung 103 (a)) übereinstimmt.

Die Daten in Abbildung 103 (b) zeigen ausserdem, dass in vielen der hier betrachteten Fälle, besonders bei geringen Distanzen zur Strasse (0–3 m), die Chloridkonzentration in Tiefen von rund 20–30 mm durchaus in der Grössenordnung des kritischen Chloridgehalts, welcher in der Fachliteratur oft in der Grössenordnung von 0.4 M-% Chlorid bezogen auf das Zementgewicht angenommen wird, liegt. Je nach Bauwerksalter ist mit Bewehrungsüberdeckungen von 30–55 mm zu rechnen (siehe auch Abbildung 73). Die Auswertung der vorliegenden Daten zeigt, dass in der Schweizer Strasseninfrastruktur häufig Chloridbelastungen auftreten, die ein relevantes Risiko für Bewehrungskorrosion darstellen. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Erfahrungen aus der Praxis, wonach Bewehrungskorrosion ein häufiger Schadensmechanismus bei Stahlbetonbauwerken im Bereich der Strasseninfrastruktur ist.

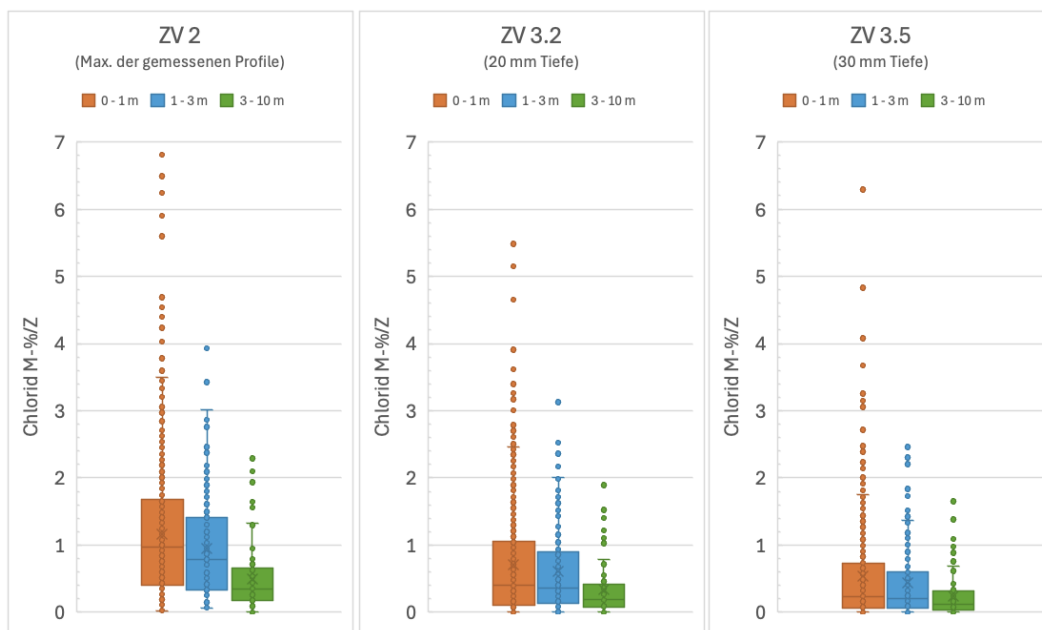


Abbildung 103: Boxplots zur Einordnung gemessener Chloridgehalte analog **Abbildung 102**, jedoch umgerechnet auf Chloridgehalt bezogen auf das Zementgewicht (unter Annahme Faktor 7, was ungefähr einem Zementgehalt von 320 kg/m³ Beton entspricht).

5.2.2 Vorschlag für probabilistische Lebensdauermodellierung

Lebensdauermodelle, welche den Chlorideintrag in den Beton mittels dem Fick'schen Diffusionsgesetz beschreiben, benötigen die Oberflächenchloridkonzentration C_s als Input-Parameter. Diese kann sowohl auf Tiefenstufe 0 mm angesetzt werden, eine eher fiktive Grösse, oder auch auf einer Tiefenstufe >0 mm, namentlich auf einer der Konvektionszone entsprechenden Tiefe. Für die mathematische Implementierung des Modells spielt dies eine untergeordnete Rolle. Wichtiger für solche Modellrechnungen, die oft probabilistisch durchgeführt werden, ist, dass als Modell-Input für C_s eine statistische Verteilung erforderlich ist. Eine geeignete Verteilungsfunktion ist die Lognormal-

Verteilung, welche aufgrund ihrer Einfachheit (im Vergleich zu anderen Funktionen) und der Tatsache, dass sie negative Werte nicht zulässt (was physikalisch-chemisch unmöglich ist), oft verwendet wird.

In der probabilistischen Dauerhaftigkeitsmodellierung kann somit die Chloridkonzentration im Beton über die Zeit modelliert werden (vgl. Glg. (4), Kapitel 2.5). Von besonderem Interesse ist hierbei die Chloridkonzentration auf der Bewehrungshöhe, welche sodann mit dem kritischen Chloridgehalt verglichen wird, um den Zeitpunkt der Korrosionsinitiierung zu quantifizieren. Da der kritische Chloridgehalt in der Fachliteratur oft als Chloridgehalt bezogen auf das Zementgewicht angegeben wird, wurde entschieden, die in der Datenbank dieses Projekts in Form von Chloridgehalt bezogen auf das Betongewicht vorliegenden Werte, in Chloridgehalte bezogen auf das Zementgewicht umzurechnen. Wie im vorangehenden Kapitel wurde diese Umrechnung näherungsweise mit einem Faktor 7 vorgenommen.

Tabelle 19 und Abbildung 104 zeigen Vorschläge für eine statistische Beschreibung der Oberflächenchloridkonzentration C_s auf Tiefenstufe 0 mm für Bauwerke der Schweizer Strasseninfrastruktur. Diese Vorschläge sind abgestützt auf Datensätze in der in diesem Projekt erarbeiteten Datenbank, wobei ausschliesslich Daten berücksichtigt wurden, bei denen explizit vermerkt war, dass auf den Betonflächen keine Abdichtung und keine Oberflächenschutzsysteme vorhanden waren. Dies ist an dieser Stelle – im Gegensatz zu den in Kapitel 5.2.1 präsentierten Daten – besonders relevant, da im Rahmen der Dauerhaftigkeitsmodellierung die Chloridbelastung als Umwelteinfluss verstanden wird. Die hier gewählte Quantifizierung der Chloridbelastung anhand von Chloridprofilen würde durch vorhandene Abdichtungen und Oberflächenschutzsysteme verzerrt werden. Zudem wurde bei der Erarbeitung der Vorschläge gemäss Tabelle 19 und Abbildung 104 der Orientierung der Betonfläche gegenüber der Strasse bzw. Chloridquelle besondere Beachtung geschenkt, namentlich der Fokus auf Flächen, welche direkt der Strasse zugewandt sind, gelegt. Dies entspricht beispielsweise Orientierung A, wie sie in Kapitel 3.1.3.12 definiert ist. Der Strasse abgewandte oder zur Strassenachse rechtwinklig stehende Flächen werden nicht berücksichtigt. Für letztere ist mit geringeren Chloridbelastungen (im Vergleich zur Orientierung A) zu rechnen; in der Ingenieurpraxis dürften solche Flächen in der Regel jedoch für die Dauerhaftigkeitsbemessung nicht massgebend sein. Aus diesen Gründen sind die C_s -Werte, wie sie in Tabelle 19 und Abbildung 104 wiedergegeben sind, tendenziell etwas höher als jene in Kapitel 5.2.1. Eine direkte Vergleichbarkeit ist jedoch ohnehin nicht möglich, u.a. deswegen, weil die C_s -Werte in Tabelle 19 und Abbildung 104 für die Tiefenstufe 0 mm gelten, während in Kapitel 5.2.1 Tiefenstufen >10 mm relevant waren.

Statistische Beschreibung

Werte in Chlorid M.-% bezogen auf das Zementgewicht	Parameter der Lognormalverteilung		Mittelwert	Standardabw.
Horizontale Distanz von Strasse	λ	ε	μ	σ
<1 m (XD3)	0.52	0.70	2.15	1.70
1 – 3 m (XD1/XD3)	0.24	0.75	1.68	1.46
>3 m (XD1)	-0.26	0.80	1.05	1.00

Tabelle 19: Vorschlag für eine statistische Beschreibung der Oberflächenchloridkonzentration Cs auf Tiefenstufe 0 mm für Spritzwasser- bzw. Sprühnebelexposition von Bauwerken der Schweizer Strasseninfrastruktur. Werte in Chlorid M.-% bezogen auf das Zementgewicht.

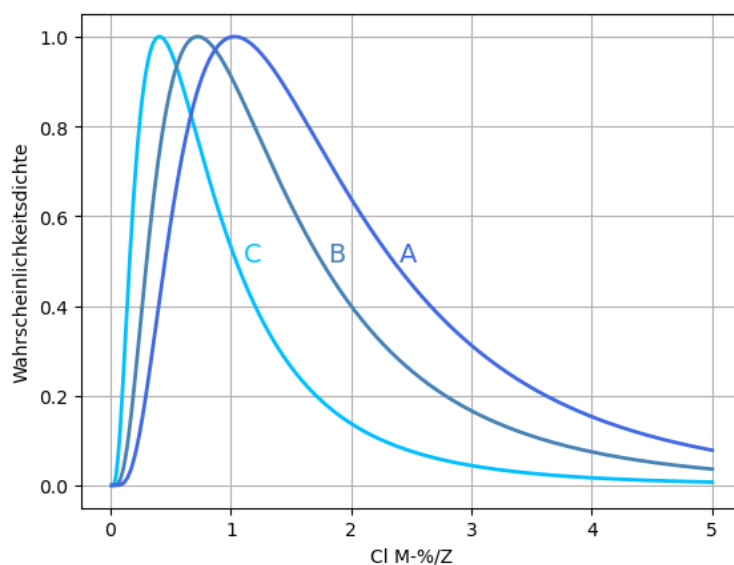


Abbildung 104: Vorschlag von Lognormalverteilungen (pdf) für die Oberflächenchloridkonzentration auf Tiefenstufe 0 mm für Spritzwasser bzw. Sprühnebelexposition. Kurve A: bei geringer horizontaler Distanz zur Strasse (<1 m, XD3 Exposition); Kurve B: Bei mittlerer horizontaler Distanz zur Strasse (1–3 m, XD3/XD1); Kurve C: Bei grosser horizontaler Distanz zur Strasse (>3 m, XD1).

6 Forschungsbedarf

6.1 Fitting der Chloridprofile

Die vorgeschlagene Anpassung (Fitting) des Diffusionsmodells an gemessene Chloridprofile mit robusten Methoden (z. B. RANSAC, IRLS, etc.) stellt ein zentraler Schritt für die quantitative Beschreibung dar. Die verwendeten Verfahren sind gegenüber der klassischen Methode der kleinsten Quadrate insbesondere bei wenigen Datenpunkten oder ungewöhnlichen Profilverläufen im Vorteil. Ungewöhnlich in diesem Zusammenhang meint, dass die Profile nach der Konvektionszone, unabhängig von deren Grösse, nicht zwangsläufig monoton fallend sind. Die Datenerhebung in diesem Projekt hat auch gezeigt, dass viele in der Ingenieurpraxis verfügbare Chloridprofile nicht dem Lehrbuch folgen und daher solche robuste Fittingansätze eine wichtige Rolle spielen. Dennoch weisen die im vorliegenden Bericht erhaltenen Resultate auf Limitationen hin, insbesondere bei Profilen mit wenigen Datenpunkten.

Eine zentrale Schwierigkeit ergab sich in der beschränkten Anzahl von Tiefenstufen (vgl. auch Abbildung 34). Rund 20 % der Profile bestehen lediglich aus zwei Messpunkten. Für künftige Datenerhebung kann daraus die Empfehlung abgeleitet werden, ein vermehrtes Augenmerk auf das Sammeln von Chloridprofilen zu legen, die mehr als nur 2 Messpunkte umfassen.

Mit Hilfe eines zusätzlichen Stützpunktes wurde die Anzahl der Tiefenstufen in diesem Projekt erhöht und die Anpassungsgenauigkeit tendenziell reduziert mit dem Ziel jedoch die Vorhersagegenauigkeit der Modelle über die Zeit zu erhöhen. Solch ein künstlich eingeführter Stützpunkt wurde in dieser Arbeit auf 10 cm Tiefe mit einer Chloridkonzentration von 0.0001 M.%/B. fixiert. Dies lässt sich damit begründen, dass in der Schweiz die Verwendung von Kalziumchlorid als Beschleuniger seit Jahrzehnten nicht mehr zugelassen ist und der Beton von Infrastrukturbauwerken somit zu Beginn der Lebensdauer eines Bauwerks grösstenteils und im Rahmen der normativ vorgegebenen Grenzwerte chloridfrei sein dürfte. Dennoch: Eine weitere systematische Untersuchung der Sensitivität gegenüber der Position und Konzentration dieses Stützpunktes wäre empfehlenswert, um dessen Einfluss auf die Anpassungsergebnisse besser quantifizieren und gegebenenfalls weiter optimieren zu können.

Zusätzlich zu den robusten Methoden und des inneren Stützpunktes wurde die Anpassungsergebnisse der unterschiedlichen Methoden untereinander verglichen. Neben dem Vergleich der Resultate und Abweichungen zwischen den einzelnen Fittings sind ebenfalls Plausibilitätskriterien für den Diffusionskoeffizient integriert worden. Die entwickelte Bewertung der Profile lässt zwar mögliche Abweichungen besser erklären, weist aber für eine vollständig automatisierte Beurteilung eines Chloridprofils noch Verbesserungspotenzial auf. Eine Durchführung von Sensitivitätsanalysen auf unterschiedlichen Datensätzen könnte die Bedeutung und die Auswirkung der unterschiedlichen Fittings untersuchen.

Die erwähnten Faktoren erhöhten die Unsicherheiten auf den Zielgrössen (Zielvariablen), insbesondere bei der Extrapolation der Chloridwerte auf Tiefen von 30 mm und bei 75 Jahren oder auch bei der Oberflächenchloridkonzentration. Die Streuung dieser Resultate führt zu Unsicherheiten bei der nachfolgenden Modellierung in Abhängigkeit des Oberflächenchloridgehaltes. Es wäre wünschenswert, detaillierter zu prüfen, inwieweit Unsicherheiten in den Zielvariablen explizit modelliert und in Prognosemodelle integriert werden können, beispielsweise durch Quantifizierung der Konfidenzintervalle der Anpassungsparameter.

Diese Massnahmen hätten das Potenzial die Bestimmung und die Bewertung der Zielvariablen zu erhöhen und würden im nächsten Schritt die Grundlage für die Weiterentwicklung von leistungsstärkeren Prognosemodellen für die Quantifizierung der Chlorideinwirkung auf Stahlbetontragwerke verbessern.

6.2 Datenbank und Modelle zur Vorhersage der Chloridkonzentration

Die Qualität und die Aussagekraft der Modelle hängen massgeblich vom Umfang und der Qualität der vorhandenen Datenbank ab.

6.2.1 Datenbank

Die Datenbank wurde anhand von bestehenden Informationen erstellt, das heisst, es wurden Daten aus den «Archiven» von Baustoffprüfinstituten gesammelt. Auch wenn diese Daten, namentlich die Chloridgehalte im Beton, mit normierten Messverfahren erhoben wurden, muss davon ausgegangen werden, dass Unschärfen in den Daten enthalten sind. Es ist bekannt, dass die Bestimmung des Chloridgehalts im Beton keine «exakte Wissenschaft» ist, und dass es hier immer Abweichungen gibt, beispielsweise aufgrund der Probenahme (Einfluss von Gesteinskörnern, Genauigkeit betr. Tiefenintervalle), des analytischen Verfahrens, etc.

Ausserdem sind die hier berücksichtigten (in der Vergangenheit gemessenen) Daten insofern beeinflusst, als dass die Probeentnahmen unter Gesichtspunkten der Zustandsanalyse von Bauwerken erfolgten. Dabei kamen andere Kriterien zum Zuge, als wenn man die Chloriddaten systematisch mit Blick auf eine spätere Auswertung im Kontext der vorliegenden Zielsetzungen erfasst hätte.

Somit könnte es künftig von Interesse zu sein, eine Datenbank durch systematisches Messen neuer Chloridprofile zu erstellen, wobei die Entnahmeorte den Kriterien einer späteren Analyse wie sie in dieser Arbeit gemacht wurde, unterworfen werden könnten. So könnte man beispielsweise darauf achten, Profile systematischer in Bezug auf die identifizierten, potenziellen Einflussparameter zu bestimmen, etwa in regelmässigen horizontalen oder vertikalen Abständen von der Chloridquelle und zwar bei konstanten anderen Bedingungen (am gleichen Bauwerk anstatt wie hier gezwungenermassen oft aus verschiedenen Bauwerken). Solch eine Datenbank könnte viele der hier eingeflossenen Unschärfen und Verzerrungen («bias») reduzieren; die Erarbeitung wäre jedoch mit einem Vielfachen des finanziellen Aufwands, verglichen mit dem vorliegenden Projekt, verbunden.

Die Datenbank umfasste eine Vielzahl von Parametern, wobei der Datenbestand lückenhaft war, da manche Informationen nur spärlich vorhanden waren bzw. nicht mit vertretbarem Aufwand zu beschaffen waren. Diese Situation reduzierte bis zu einem gewissen Grad die nutzbare Stichprobengrösse und schränkte die Aussagekraft bestimmter Subgruppenanalysen (z. B. gruppiert nach Bauwerk oder Bauteil) ein. Eine höhere Verfügbarkeit relevanter Daten könnte die Analyse verbessern und ermöglichen. Auch hier wäre ein Schliessen der Lücken in der Datenbank interessant, jedoch mit erheblichem Aufwand verbunden, der den Rahmen dieses Projektes sprengen würde. Sollte sich in Zukunft die Erarbeitung einer neuen Datenbank wie im vorherigen Abschnitt beschrieben finanzieren lassen, bestünden auch hier Chancen, eine weniger lückenhafte Datenbank zu erlangen.

Die Datenbank basiert vor allem aus Chloridprofilen aus Bauwerken hergestellt mit CEM I, inwiefern sich die Mischzemente bei längerer Expositionsdauer (>20 Jahre) unterscheiden, müsste separat geprüft werden. Zusätzlich wird empfohlen den W/Z-Wert resp. W/B-Wert und dem verwendeten Zement (Art und Menge) eine höhere Priorisierung bei der Datenerfassung zu geben. Einerseits nimmt die Verwendungshäufigkeit von Mischzement erheblich zu, mit entsprechenden Auswirkungen auf den Diffusionskoeffizienten (vgl. auch [58]) und somit auf das Eindringen der Chloride in den Überdeckungsbeton in Abhängigkeit von der Zeit.

Eine besondere Herausforderung in den Daten stellte die oft unklare Situation betreffend Oberflächenschutzsystem dar, namentlich deren detaillierter Zustand, Applikationszeitpunkt und Typ. In künftigen Datenbanken müsste versucht werden, diese Informationslücke zu schliessen. Da entsprechende Informationen in den meisten Fällen jedoch nur schwer zugänglich sein dürften, wären komplementär Messungen zur Charakterisierung von Oberflächenschutzsystemen in Erwägung zu ziehen.

Zukünftige Forschungsprojekte könnten sich der Weiterführung der hier erarbeiteten Datenbank widmen – sowohl im Hinblick auf die Anzahl der Datensätze als auch im Sinne der in den vorangegangenen Abschnitten skizzierten Verbesserungsansätze.

6.2.2 Datenanalyse und Modelle des maschinellen Lernens

Die in Kapitel 4.2.2 präsentieren statistischen Analysen könnten durch den Einsatz multivariater Analysemethoden ergänzt werden. Diese Analysemethoden können unter Umständen komplexere Wechselwirkungen zwischen einzelnen Parameter und der Zielvariablen offenbaren. Mögliche Verfahren wäre die Hauptkomponentenanalyse (PCA) oder Clusteranalysen.

Der Einsatz zusätzlicher Techniken, wie beispielsweise komplexerer neuronaler Netzwerke oder sogenannten Ensemble-Methoden, eröffnet die Möglichkeit, die Leistungsfähigkeit des Modells möglicherweise zu verbessern. Dies erhöht jedoch die Modellkomplexität erheblich und erschwert die Anwendung einfacher Ingenieurmodelle. Dennoch können diese Verfahren dazu beitragen, potenzielle Zusammenhänge in den Daten potenziell genauer abzubilden. Zudem können fortgeschrittene Modellierungsansätze genutzt werden, um Unsicherheitsschätzungen für Prognosen bereitzustellen, was insbesondere bei sicherheitsrelevanten Fragestellungen von grosser Bedeutung

ist. Für solche Ansätze scheint es allerdings sinnvoll, die Datenbank zu erweitern, da gerade für neuronale Netze der aktuell vorliegende Datenbestand knapp ist.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde bisher die Vorhersage einer einzelnen Zielgrösse (z. B. des maximalen Chloridgehalts) mittels maschinellen Lernens untersucht. Perspektivisch ist es jedoch auch denkbar, das gesamte Chloridprofil mittels maschinellen Lernens vorherzusagen. Hierfür bieten sich sogenannte hybride Modelle an, welche physikalische Gesetzmässigkeiten mit datengetriebenen Verfahren kombinieren. Ein solches Vorgehen könnte wie folgt aussehen:

- Schritt 1: Verwendung des physikalischen Modells (z. B. Fick'sches Gesetz), um eine erste Prognose für das Chloridprofil zu erzeugen.
- Schritt 2: Einsatz eines maschinellen Lernverfahrens, um systematische Abweichungen der physikalischen Prognose anhand realer Messdaten zu korrigieren.

Dieser hybride Ansatz verbindet die Vorteile physikalischer Nachvollziehbarkeit mit der Flexibilität datenbasierter Methoden und könnte die Grundlage für weitere Prognosemodelle bilden.

6.3 Ausweitung auf andere Bauwerke und Baustoffe

Die Vorhersagen und Modelle des vorliegenden Berichts unterliegen verschiedenen Limitationen. Die Auswertung basiert vor allem auf reinen Portlandzement und «neue» Zemente oder Mischzemente haben tendenziell einen höheren Widerstand gegen das Eindringen von Chloriden [59]. Es ist unklar, inwieweit sich die Prognosen für andere Typen von Zementen verwenden lassen. Andere Bauwerksarten, wie beispielsweise Parkhäuser, werden nicht berücksichtigt. Der Fokus liegt ausschliesslich auf Kunstbauten entlang von National- und Kantonsstrassen. Schliesslich werden potenzielle Langzeiteinflüsse infolge des Klimawandels, wie etwa ein veränderter Tausalzbedarf oder die ganzjährige Offenhaltung von Passstrassen, im Modell nicht zwangsläufig abgebildet. Chloridprofile aus Rissbereichen wurden explizit ausgeschlossen, da der Chlorideintrag in solchen Bereichen vom Transport im ungerissenen Beton abweicht. Daraus ergibt sich weiterer Forschungsbedarf insbesondere hinsichtlich der Übertragbarkeit der Modelle auf neuartige Zemente und Mischzemente sowie auf andere Bauwerkstypen und Bauwerksbedingungen. Zudem sind vertiefte Untersuchungen zur Berücksichtigung klimatischer Veränderungen und ihrer Auswirkungen auf die Chlorideinwirkung erforderlich.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Boller and A. Bryner, “Häufig gestellte Fragen zur Strassensalzung,” 2016. Accessed: Mar. 31, 2025. [Online]. Available: www.eawag.ch
- [2] fib (International Federation for Structural Concrete), “fib Bulletin 76: Benchmarking of deemed-to-satisfy provisions in standards—durability of reinforced concrete structures exposed to chlorides,” *Bulletin No. 76*, pp. 1–204, 2015.
- [3] L. Tang, L.-O. Nilsson, and P. A. M. Basheer, “Resistance of concrete to chloride ingress: testing and modelling,” *Resistance of Concrete to Chloride Ingress*, Oct. 2011, doi: 10.1201/B12603.
- [4] P. Schiessl *et al.*, “fib bulletin 34: Model code for service life design,” 2006.
- [5] L.-O. Nilsson, E. Poulsen, P. Sandberg, H. E. Sørensen, and O. Klinghoffer, “HETEK: chloride penetration into concrete : state of the art : transport processes, corrosion initiation, test methods and prediction models,” Vejdirektoratet, 1996.
- [6] Duracrete, “DuraCrete: Probabilistic performance based durability design of concrete structures - final technical report: General guidelines for durability design and redesign,” 2000.
- [7] H. Ungricht, “Wasserhaushalt und Chlorideintrag in Beton - Einfluss der Exposition und der Betonzusammensetzung,” 2004, doi: 10.3929/ETHZ-A-004875590.
- [8] W. Li, W. Liu, and S. Wang, “The effect of crack width on chloride-induced corrosion of steel in concrete,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2017, no. 1, p. 3968578, Jan. 2017, doi: 10.1155/2017/3968578.
- [9] U. M. Angst, “DURABLE CONCRETE STRUCTURES: CRACKS & CORROSION AND CORROSION & CRACKS”, doi: 10.21012/FC10.233307.
- [10] C. ping Gu, G. Ye, and W. Sun, “A review of the chloride transport properties of cracked concrete: experiments and simulations,” *Journal of Zhejiang University: Science A*, vol. 16, no. 2, pp. 81–92, 2015, doi: 10.1631/JZUS.A1400247.
- [11] F. Kanavaris, M. Coelho, N. Ferreira, M. Azenha, and C. Andrade, “A review on the effects of cracking and crack width on corrosion of reinforcement in concrete,” *Structural Concrete*, vol. 24, no. 6, pp. 7272–7294, Dec. 2023, doi: 10.1002/SUCO.202300227.
- [12] “Winterdienst auf den Nationalstrassen.” Accessed: Nov. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/nationalstrassen/winterdienst.html>
- [13] “Winterdienst | Kanton Zürich.” Accessed: Nov. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.zh.ch/de/mobilitaet/strassennetz/strassenunterhalt/winterdienst.html#-1553340254>

- [14] “Einsätze und Salzverbrauch Winterdienst.” Accessed: Nov. 26, 2024. [Online]. Available: https://www.zh.ch/content/dam/zhweb/bilder-dokumente/themen/mobilitaet/strassennetz/strassenunterhalt/winterdienst/einsaetze_salzverbrauch_winterdienst.pdf
- [15] “Auftaumittel.” Accessed: Nov. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/chemikalien/fachinformationen/chemikalien--bestimmungen-und-verfahren/auftaumittel.html>
- [16] “Anspruchsvoller Winterdienst im Unterland,” Apr. 08, 2013, *Kanton Zürich, Baudirektion Tiefbauamt, Strasseninspektorat, Zürich*.
- [17] U. Angst, B. Elsener, C. K. Larsen, and Ø. Vennesland, “Critical chloride content in reinforced concrete — a review,” *Cem Concr Res*, vol. 39, no. 12, pp. 1122–1138, Dec. 2009, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2009.08.006.
- [18] Y. Cao, C. Gehlen, U. Angst, L. Wang, Z. Wang, and Y. Yao, “Critical chloride content in reinforced concrete — an updated review considering experience,” Mar. 01, 2019, *Pergamon*. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.11.020.
- [19] C. Boschmann Käthler, U. M. Angst, A. M. Aguilar, and B. Elsener, “A novel approach to systematically collect critical chloride contents in concrete in an open access data base,” *Data Brief*, vol. 27, p. 104675, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.DIB.2019.104675.
- [20] L. Bertolini, B. Elsener, E. Redaelli, and R. Polder, *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair: Second Edition*. Wiley-VCH, 2013. doi: 10.1002/9783527651696.
- [21] D. Yilmaz and U. Angst, “Korrosionsbedingte Kosten an Ingenieurbauwerken im Schweizer Straßennetz,” *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. 115, no. 6, pp. 448–458, Jun. 2020, doi: 10.1002/best.202000004.
- [22] *Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*, 2022nd ed. Zurich: Schweizerischer Ingenieur-und Architektenverein, 2022.
- [23] G. Kapteina, “MODELL ZUR BESCHREIBUNG DES EINDRINGENS VON CHLORID IN BETON VON VERKEHRSBAUWERKEN,” Doctoral Thesis, Technischen Universität München, München, 2011.
- [24] G. Kapteina, “Modell zur Beschreibung des Eindringens von Chlorid in Beton von Verkehrsbauwerken,” Technische Universität München, 2011.
- [25] G. Blomqvist, “IMPACT OF DE-ICING SALT ON ROADSIDE VEGETATION. A LITERATURE REVIEW,” 1998.
- [26] L. Tang and P. Utgenannt, “CHARACTERIZATION OF CHLORIDE ENVIRONMENT ALONG A HIGHWAY Chloride environment along a highway,” in *Durability of Building Materials and Components*, M. A. Lacasse and D. J. Vanier, Eds., Ottawa, 1999, pp. 399–408.
- [27] S. Lay, “Abschätzung der Wahrscheinlichkeit tausalzinduzierter Bewehrungskorrosion: Baustein eines Systems zum Lebenszyklusmanagement von Stahlbetonbauwerken,” 2006.
- [28] C. Gehlen, “Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion,” RWTH Aachen, 2000. doi: 22902.
- [29] L. Tang, D. Boubitsas, and L. Huang, “Long-term performance of reinforced concrete under a de-icing road environment,” *Cem Concr Res*, vol. 164, p. 107039, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2022.107039.

- [30] T. Luping and P. Utgenannt, “Chloride ingress and reinforcement corrosion in concrete under de-icing highway environment—a study after 10 years’ field exposure,” 2007.
- [31] O. M. Jensen and P. F. Hansen, “Water-entrained cement-based materials: I. Principles and theoretical background,” *Cem Concr Res*, vol. 31, no. 4, pp. 647–654, Apr. 2001, doi: 10.1016/S0008-8846(01)00463-X.
- [32] D. Boubitsas, T. Luping, and P. Utgenannt, “Chloride ingress in concrete exposed to marine environment—field data up to 20 years’ exposure,” 2014.
- [33] U. M. Angst, M. Büchler, J. Schlumpf, and B. Marazzani, “An organic corrosion-inhibiting admixture for reinforced concrete: 18 years of field experience,” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 49, no. 7, pp. 2807–2818, Jul. 2016, doi: 10.1617/S11527-015-0687-2/FIGURES/10.
- [34] E. Koenders, K. Imamoto, and A. Soive, Eds., “Benchmarking chloride ingress models on real-life case studies—Marine Submerged and Road Sprayed Concrete Structures,” vol. 37, 2022, doi: 10.1007/978-3-030-96422-1.
- [35] Y. Schiegg, F. Hunkeler, D. Keller, and H. Ungricht, “Massnahmen zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit—Fortsetzung des Feldversuchs Naxberg tunnel,” AGB 2005/016_OBF, 2017.
- [36] J. Bisschop, Y. Schiegg, and F. Hunkeler, “Modelling the corrosion initiation of reinforced concrete exposed to deicing salts,” Forschungsprojekt, Forschungsprojekt AGB 2011/002, 2016.
- [37] A. Rahimi, “Semiprobabilistisches Nachweiskonzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung,” 2016.
- [38] A. Schießl-Pecka, A. Rausch, M. Zintel, and C. Linden, “Lebenszykluskostenbetrachtungen für chloridexponierte Bauteile von Brücken- und Tunnelbauwerken,” *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. 114, no. 10, pp. 767–775, Oct. 2019, doi: 10.1002/BEST.201900038.
- [39] “Handbuch «Online corrosion initiation modeling app» OCIMA V 1.1 (October 2022),” 2022, *SwissSteelGroup*. Accessed: Jul. 16, 2025 [Online]. Available: <https://www.youtube.com/channel/UCaWhMDqayWocw44fqCSKJPg>
- [40] B. für Wasserbau, “BAW Merkblatt Dauerhaftigkeitsbemessung und-bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC),” 2019, Accessed: Jul. 16, 2024. [Online]. Available: www.baw.de
- [41] K. Y. Ann and H. W. Song, “Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete,” *Corros Sci*, vol. 49, no. 11, pp. 4113–4133, Nov. 2007, doi: 10.1016/J.CORSCI.2007.05.007.
- [42] “Erhaltung von Tragwerken – Betonbau (SIA 269/2),” Zurich, 2011.
- [43] L. Tang, P. Utgenannt, A. Lindvall, and D. Boubitsas, “CBI UPPDRAGS-RAPPORT Validation of models and test methods for assessment of durability of concrete structures in the road environment,” 2010. Accessed: Mar. 14, 2025 [Online]. Available: www.cbi.se
- [44] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, and R. B. Polder, *Corrosion of Steel in Concrete*. Wiley, 2003. doi: 10.1002/3527603379.

- [45] P. B. Bamforth, “The derivation of input data for modelling chloride ingress from eight-year UK coastal exposure trials,” <https://doi.org/10.1680/mac.1999.51.2.87>, vol. 51, no. 2, pp. 87–96, May 2015, doi: 10.1680/MACR.1999.51.2.87.
- [46] R. E. Weyers, “SERVICE LIFE MODEL FOR CONCRETE STRUCTURES IN CHLORIDE LADEN ENVIRONMENTS,” *ACI Mater J*, vol. 95, no. 4, Jul. 1998.
- [47] C. Gehlen, “Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken-Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion,” 2000, Accessed: Mar. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/307149530>
- [48] “Das Schweizer Koordinatensystem: LV95.” Accessed: Mar. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.swisstopo.admin.ch/de/schweizer-koordinatensystem>
- [49] T. Völker, C. Gottlieb, G. Kapteina, G. Wilsch, S. Millar, and K. Reichling, “Neues DGZfP-Merkblatt B14: Quantifizierung von Chlorid in Beton mittels LIBS,” *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. 119, no. 7, pp. 529–535, Jul. 2024, doi: 10.1002/BEST.202400014.
- [50] “Datenportal für Lehre und Forschung (IDAweb) - MeteoSchweiz.” Accessed: Apr. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.meteoschweiz.admin.ch/service-und-publikationen/service/wetter-und-klimaprodukte/datenportal-fuer-lehre-und-forschung.html>
- [51] M. K. M. Raupach, “Diagnosis of concrete structures: the influence of sampling parameters on the accuracy of chloride profiles,” *Mater Struct*, vol. 51, doi: 10.1617/s11527-018-1199-7.
- [52] P. J. Huber, “Robust estimation of a location parameter,” *Annals of Mathematical Statistics*, vol. 35, pp. 1–29, 1964.
- [53] M. A. Fischler and R. C. Bolles, “Random sample consensus,” *Commun ACM*, vol. 24, no. 6, pp. 381–395, Jun. 1981, doi: 10.1145/358669.358692.
- [54] P. W. Holland and R. E. Welsch, “Robust regression using iteratively reweighted least-squares,” *Commun Stat Theory Methods*, vol. 6, no. 9, pp. 813–827, Jan. 1977, doi: 10.1080/03610927708827533.
- [55] “What is featuretools? — Featuretools 1.31.0 documentation.” Accessed: Apr. 11, 2025. [Online]. Available: <https://featuretools.alteryx.com/en/stable/index.html>
- [56] T. Akiba, S. Sano, T. Yanase, T. Ohta, and M. Koyama, “Optuna: A Next-generation Hyperparameter Optimization Framework,” *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pp. 2623–2631, Jul. 2019, doi: 10.1145/3292500.3330701.
- [57] F. Pedregosa FABIANPEDREGOSA *et al.*, “Scikit-learn: Machine learning in Python” Gaël Varoquaux Bertrand Thirion Vincent Dubourg Alexandre Passos PEDREGOSA, VAROQUAUX, GRAMFORT ET AL. Matthieu Perrot, 2011. Accessed: Sep. 29, 2020. [Online]. Available: <http://scikit-learn.sourceforge.net>.
- [58] M. Hosseinzadeh, S. S. Mousavi, A. Hosseinzadeh, and M. Dehestani, “An efficient machine learning approach for predicting concrete chloride resistance using a comprehensive dataset,” *Scientific Reports 2023 13:1*, vol. 13, no. 1, pp. 1–33, Sep. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-42270-3.

- [59] A. Silva, R. Neves, and J. De Brito, “Statistical modelling of the influential factors on chloride penetration in concrete,” *Magazine of Concrete Research*, vol. 69, no. 5, pp. 255–270, Mar. 2017, doi: 10.1680/JMACR.16.00379/ASSET/IMAGES/SMALL/JMACR.16.00379-F4.GIF.

Datenverwendung

Die Methodik der Datenerhebung ist ausführlich in Kapitel 3 beschrieben. Die in dieser Forschungsarbeit erstellte Datenbank ist unter folgendem Link frei verfügbar: <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000748612>

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 30.07.2025

Grunddaten

Projekt-Nr.: BGT_20_03B_01

Projekttitel: Quantifizierung der Chloridbelastung von tausalzexponierten Stahlbetonbauwerken

Enddatum: 31.10.2025

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Ziel des Projekts war es, die Chloridbelastung von Stahlbetonbauwerken im Schweizer Strassennetz systematisch zu erfassen und Unsicherheiten bei der Dauerhaftigkeitsbemessung zu reduzieren. Dazu wurde eine strukturierte Datenbank mit rund 1700 Chloridprofilen aus über 160 Bauwerken aufgebaut. Die Daten decken verschiedene Klimazonen (Jurabogen, Mittelland, Alpen, Südalpen), Bauwerkstypen (Brücken, Tunnel, etc.) und Baujahre (1960–2000) ab. Die Datenbank enthält neben den Chloriddaten zahlreiche ergänzende Informationen (Metadaten); sie ist open access zugänglich (vgl. Publikationen unten).

Die Analyse der Daten zeigte, dass die Ausrichtung der Betonoberfläche zur Strasse einen signifikanten Einfluss auf die Chloridbelastung hat. Betonflächen, die der Strasse zugewandt sind, wiesen deutlich höhere Chloridgehalte auf, was auch den Erwartungen entspricht. Statistische Verfahren und maschinelles Lernen wurden eingesetzt, um die Chloridbelastung zu modellieren und mögliche Zusammenhänge mit Einflussgrößen zu identifizieren. Aufgrund hoher Streuungen in den Chloriddaten war die Prognosegenauigkeit jedoch begrenzt. ANOVA-Analysen bestätigten jedoch den Einfluss von Bauwerkstyp und Oberflächenschutzsystem.

Ein in der Literatur vorgeschlagenes Modell zur Abschätzung der Chloridkonzentration (basierend auf Höhe und Distanz zur Strasse und entwickelt auf Basis von Daten aus Deutschland) erwies sich anhand der hier gesammelten Daten für Schweizer Verhältnisse als ungeeignet, da es die Chloridbelastung deutlich unterschätzt.

Anhand der vorliegenden Daten wurden zwei praxisorientierte Ingenieursansätze vorgeschlagen, einer für die probabilistische Lebensdauermodellierung neuer Bauwerke und einer für die Zustandsbeurteilung bestehender Bauwerke.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Auch wenn sich die bei Projektstart erhofften Zusammenhänge zwischen Chloridbelastung und Einflussgrößen in den gesammelten Daten nicht in der Deutlichkeit gezeigt haben, stellt das Projekt einen klaren Fortschritt gegenüber dem bisherigen Sachstand dar. Zum ersten Mal liegen statistisch breit abgestützte Daten zur Chloridbelastung von Strasseninfrastrukturbauwerken in der Schweiz vor. Diese können sowohl zur modellbasierten Lebensdauerabschätzung (probabilistische Modellierung des Chlorideintrags) als auch zur fundierten Einordnung gemessener Chloridprofile bei der Zustandsbeurteilung herangezogen werden.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die Konzeption, Erstellung und Kuratierung der Datenbank im Rahmen dieses Projekts war mit einem erheblichen finanziellen und personellen Aufwand verbunden; dennoch ist die Datenqualität für Anwendungen des maschinellen Lernens nicht zufriedenstellend. Eine Verbesserung wäre nur mit deutlich grösserem Ressourceneinsatz denkbar. Hierfür müssten Chloridprofile gezielt und standardisiert erhoben werden, idealerweise mit einheitlicher Messmethodik und vollständigen Tiefenprofilen – im Gegensatz zu den aus der Praxis verfügbaren Messungen, die primär anderen Zwecken als der vorliegenden Forschung dienen und verständlicherweise unter starkem Kostendruck stehen.

Publikationen:

Schlussbericht, sowie zugehörige open access Datenbank
(<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000748612>)

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Angst

Vorname: Ueli

Amt, Firma, Institut: Institut für Baustoffe, ETH Zürich

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

Ueli Angst



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Das wesentliche Ergebnis bildet die wohl weltweit einmalige, sehr umfangreiche, grundsätzlich auch für künftige Projekte wertvolle Datenbank.

Die Erfassung und Berücksichtigung von Chloridprofilen mit nur 2 Werten oder von ungenügender Qualität (Oberflächenschutz vorhanden, wenn ja Typ) hat trotz Anwendung raffinierter Auswerte-Tools und -methoden nicht geholfen, das gewünschte Ergebnis, ein universell anwendbares Ingenieurmodell für die Chloridbelastung, bereitstellen zu können. Einzelne Aspekte wie die grossen Unterschiede in der Chloridkonzentration in Abhängigkeit der Lage des Bauteils zur Fahrbahn konnten hingegen sehr deutlich herausgeschält werden.

Umsetzung:

Mit der Publikation des Forschungsberichts wird der Zugang zur frei verfügbaren Datenbank allgemein bekannt gemacht und die Erkenntnisse stehen der allgemeinen Ingenieurpraxis wie auch der Forschungsgemeinde zur Verfügung.

Es darf erwartet werden, dass die statistischen Daten in der probabilistischen Lebensdauer-Modellierung Anwendung finden werden, zum Beispiel in der Dimensionierung neuer Bauwerke oder der Zustandsbeurteilung bestehender Bauwerke.

weitergehender Forschungsbedarf:

Es empfiehlt sich, die Datenbank künftig weiter zu betreiben und wenn immer möglich mit qualitativ hochstehenden Datensätzen auch von modernen Betonkonzepten zu ergänzen, damit deren Wert erhalten bleibt oder sogar gesteigert werden kann und Einflüsse solcher Konzepte ersichtlich werden.

Einfluss auf Normenwerk:

Aktuell keiner

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Waldis

Vorname: Walter

Amt, Firma, Institut: Bundesamt für Strassen, Abteilung Strassenetze, Bereich SSI-K

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

W. Waldis