

Entwicklung eines Standards zur Bewertung und Klassifizierung der baulichen Substanz von Abwasserkanälen und Schächten (SubKanS)

Abschlussbericht zum Verbundvorhaben



Impressum

Verbundkoordination



Prof. Dr.-Ing. Karsten Kerres
FH Aachen
Fachbereich Bauingenieurwesen
Lehrgebiet Netzmanagement
Bayernallee 9
52066 Aachen Germany

Autoren und Mitwirkende



FH Aachen
Fachbereich Bauingenieurwesen
Lehrgebiet Netzmanagement

*Thomas Breuer, M.Sc.
Dipl.-Ing. Angela Funke-Kleinken
Dipl.-Ing. Sylvia Gredigk-Hoffmann
Prof. Dr.-Ing. Karsten Kerres
Mustafa Sariyildiz, M.Eng.*



HS Magdeburg Stendal
Fachbereich Siedlungswasserwirtschaft /
Infrastrukturentwicklung

*Stefan Orlik, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Torsten Schmidt*



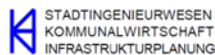
Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH

*Dr.-Ing. Nicolas Caradot
Dr.-Ing. Pascale Rouault
Malte Zamzow, M.Sc.*



Franz Fischer Ingenieurbüro GmbH

*Dipl.-Ing. Michael Hippe
Dipl.-Ing. Thomas Wedmann*



Ingenieurbüro Dr.-Ing. Klaus Hochstrate

Dr.-Ing. Klaus Hochstrate



**Dr.-Ing. Pecher und Partner
Ingenieuresellschaft mbH**

Dipl.-Ing. Klaus-Jochen Sympher



SiwaPlan Ingenieuresellschaft mbH

Dr.-Ing. Martin Wolf



Stein Infrastructure Management GmbH

*Dr.-Ing. Robert Stein
Dipl.-Ing. Adrian Uhlenbroch*



3S Consult GmbH

*Dipl.-Ing. Ingo Kropp
Dipl.-Physiker Alexander Kästner*



Gelsenwasser AG

*Dr.-Ing. Agnes Janda
Dipl.-Ing. Christoph Plogmeier*



hanseWasser Bremen GmbH

*Dipl.-Ing. Rüdiger Jathe
Dipl.-Ing. Ralph Zwafink*

Zitierhinweis

Kerres, K. et al. (2021): Entwicklung eines Standards zur Bewertung und Klassifizierung der baulichen Substanz von Abwasserkanälen und Schächten (*SubKans*). Abschlussbericht des BMWi-Verbundvorhabens *SubKans*. Förderkennzeichen 03TNH007A-J. FH Aachen

Erklärung

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter den Förderkennzeichen 03TNH007A-J gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

WIPANO

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Aachen, März 2021

Prof. Dr.-Ing. Karsten Kerres

Inhaltsverzeichnis

0	Zusammenfassung	1
1	Begriffe	5
1.1	Glossar	5
1.2	Abkürzungen	16
2	Einführung und Zielsetzung	19
2.1	Einführung	19
2.2	Beurteilung der (Bau-)Substanz von Entwässerungs- systemen gem. Recht und Regelwerk	21
2.3	Gesamtziel des Vorhabens	25
2.4	Vorgehen und Methodik	26
3	Stand von Wissenschaft und Praxis in Bezug auf die Substanzklassifizierung bzw. Substanzbewertung relevanter Assets	28
3.1	Einleitung	28
3.2	Entwässerungssysteme	30
3.2.1	Technisches Regelwerk zur Zustandserfassung, Zustandsbeschreibung und Zustandsbeurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden	30
3.2.1.1	Systembeschreibung gem. DWA-M 149-1	30
3.2.1.2	Zustandsbeschreibung gem. DWA-M 149-2	34
3.2.1.3	Zustandsklassifizierung gem. DWA-M 149-3	37
3.2.1.4	Fazit	44
3.2.2	Modelle zur Substanzklassifizierung	45
3.2.2.1	Leitfaden zur strategischen Sanierungsplanung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden	45
3.2.2.2	STATUS _{Kanal}	52
3.2.2.3	Bietigheimer Modell	59
3.2.2.4	stratIS-kanal	63
3.2.2.5	•••kokas•	70
3.2.2.6	RERAU-Methode (Frankreich)	73
3.2.2.7	NORVAR-Methode (Norwegen)	75
3.2.2.8	Manual of Sewer Condition Classification (Großbritannien)	77
3.2.2.9	Gegenüberstellung	78
3.3	Straßen	86
3.3.1	Einführung	86
3.3.2	Zustandserfassung	87

3.3.3	Zustands- und Substanzbeurteilung	87
3.3.4	Fazit	91
3.4	Verkehrswasserbauwerke	92
3.4.1	Einführung.....	92
3.4.2	Methoden der Zustandserfassung	92
3.4.3	Methoden der Substanzbeurteilung	93
3.4.4	Fazit	94
3.5	Wohn- und Geschäftsgebäude	94
3.5.1	Einführung.....	94
3.5.2	Methoden der Zustandserfassung	97
3.5.3	Methoden der Substanzbeurteilung	98
3.5.4	Verwertbarkeit für den zu entwickelnden Standard	101
3.6	Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen gem. DIN 1076	101
3.6.1	Einführung.....	101
3.6.2	Methoden der Zustandserfassung	102
3.6.3	Methoden der Substanzbeurteilung	104
3.6.4	Verwertbarkeit für den zu entwickelnden Standard	106
3.7	Fazit.....	107
4	Anforderungen an die Substanzklassifizierung von Abwasserkanälen und Schächten	109
4.1	Zielsetzung	109
4.2	Konsequenzen	110
5	Methodik zur Quantifizierung der Abnutzung von Abwasserkanälen	114
5.1	Einführung	114
5.2	Vorverarbeitung der Feststellungen - Klassifizierung der Einzelzustände	114
5.2.1	Definition und begriffliche Klärung der Einzelschadensklassifizierung.....	114
5.2.2	Bestandsaufnahme von Rohrleitungen.....	115
5.2.3	Bauliche / Betriebliche Einzelschadensklasse	115
5.3	Festlegung von Schadensart und Schadensausprägung, Schadensüberlagerung.....	116
5.3.1	Vorbemerkungen.....	116
5.3.2	Zuordnung von Schadensart und Schadensausprägung	117
5.4	Berechnung des Schadensgewichts	119
5.5	Ermittlung der Abnutzung	119
6	Datenbasis Abwasserkanäle	121
6.1	Einführung	121
6.2	Datenanonymisierung und Datenaufbereitung	122
6.3	Datenbankaufbau	123
6.4	Deskriptive Analyse des Projektdatensatzes	131

6.4.1	Repräsentativität des Projektdatensatzes.....	131
6.4.2	Heterogenität des Projektdatensatzes	135
7	Kalibrierung des <i>SubKanS</i>-Modells für Abwasserkanäle	140
7.1	Einführung	140
7.2	Herleitung des methodischen Ansatzes	141
7.3	Auswahl des Kalibrierungsdatensatzes.....	144
7.4	Deskriptive Analyse des Kalibrierungsdatensatzes.....	146
7.5	Kalibrierung	151
7.5.1	Einführung.....	151
7.5.2	Durchführung der maschinellen Optimierung und der Rasteranalyse	155
7.5.3	Ergebnis der Kalibrierung	159
7.5.4	Festlegung der Start- und Klassengewichte.....	161
7.6	Validierung	166
8	Sensitivitätsanalyse der Abnutzungsbestimmung und der Substanzklassifizierung von Abwasserkanälen	168
9	Sanierungsempfehlung und -kosten für Abwasserkanäle	179
9.1	Einführung	179
9.2	Datengrundlage und Vorgehensweise	179
9.3	Sanierungstendenz	180
9.4	Sanierungsszenarien	184
9.5	Ableitung von Sanierungskosten	186
9.6	Verfahrensableitung bei teilweiser Sanierung.....	189
9.7	Fazit.....	190
10	Substanzklassifizierung von Abwasserkanälen	192
11	Substanzklassifizierung von Schächten.....	198
11.1	Einführung	198
11.2	Relevanz des Einzelschadens auf die Substanzklassifizierung eines Schachtbauwerkes	199
11.2.1	Definition der Substanz eines Schachts	199
11.2.2	Definition des Einzelschadens.....	199
11.2.3	Bestandsaufnahme von Schächten.....	200
11.2.4	Bauliche / Betriebliche Einzelschadensklasse	200
11.3	Datengrundlage Schächte	201
11.4	Fazit.....	201
12	Ergebnisverwertung und Ausblick	203
12.1	Praktische Relevanz	203
12.2	Verwertung durch Kanalnetzbetreiber und volkswirtschaftliche Relevanz.....	204

12.3	Verwertung durch beteiligte Ingenieurbüros	205
12.4	Wissenschaftliche Verwertung	206
12.5	Ausblick.....	206
13	Literaturverzeichnis	208

Anhang

- Anlage 1: Vorhabenbeschreibung der DWA zur Erstellung eines Merkblattes DWA-M 149-10 „Substanzklassifizierung“
- Anlage 2: Einzelschadenskatalog Haltungen
- Anlage 3: Einzelschadenskatalog Schächte
- Anlage 4: Zuordnung von Schadensart und -ausprägung zu Feststellungen gemäß Schadenskatalog der DIN EN 13508-2
- Anlage 5: Herleitung zur Klassenanzahl bei der Kalibrierung der Modellparameter
- Anlage 6: Herleitung der Methode zu signifikanten Unterschieden zwischen Trefferquoten
- Anlage 7: Kostengrundlagen für die vereinheitlichte Ermittlung der Sanierungsempfehlungen im Rahmen der *SubKanS*-Kalibrierung
- Anlage 8: Beispielhafte Anwendung der Substanzklassifizierung gem. *SubKanS*-Ansatz
- Anlage 9: Dokumentation Expertenrunde 1
- Anlage 10: Dokumentation Expertenrunde 2
- Anlage 11: Programm Expertenrunde 3
- Anlage 12: Liste der Veröffentlichungen
- Anlage 13: Liste der Abstimmungsrunden im Durchführungszeitraum von *SubKanS*

Verzeichnis der Bilder

Bild 1:	Abbau des Abnutzungsvorrates über die Zeit und Begrifflichkeiten gem. <i>SubKanS</i> -Verständnis (Abnutzungsvorrat noch nicht aufgebraucht) (eigene Darstellung).....	6
Bild 2:	Abbau des Abnutzungsvorrats über die Nutzungsdauer gem. DIN 31051 (DIN, 2019)	21
Bild 3:	Untersuchungsgegenstand im Kontext von Stand der Technik und Zukunftsperspektive (eigene Darstellung).....	26
Bild 4:	Prozessdefinition und -ablauf der Zustandserfassung/-beurteilung gemäß DWA-M 149-1 (DWA, 2018)	31
Bild 5:	Verfahren zur Untersuchung des baulichen Zustandes von Entwässerungssystemen nach DIN EN 13508-1 (DIN EN, 2013 eigene Darstellung nach DWA-M 149-1 (DWA, 2018))	35
Bild 6:	Möglicher Aufbau Zustandsbeurteilung gem. DWA-M 149-3 (DWA, 2015, eigene Darstellung).....	39
Bild 7:	Ermittlung und Überlagerung der Einflusslängen beim DWA-Leitfaden (DWA, 2012))	49
Bild 8:	Normierungsfunktion (DWA-Themenband T 4/2012 (DWA, 2012)).....	50
Bild 9:	Beispiel Schadensprofile auf Basis der Zustandsklasse und der jeweiligen praktikablen Sanierungslänge (Gesamtzustand) (Stein und Stein, 2019)	54
Bild 10:	Ermittlung der gewogene Schadensschwere für die im Bild 9 dargestellten Beispiele (Stein und Stein, 2019).....	54
Bild 11:	Ermittlung des Schadenskonzentrationswertes für die im Bild 9 dargestellten Beispiele (Stein und Stein, 2019)	56
Bild 12:	Beispielergebnis für die Ermittlung der Substanz in Abhängigkeit von gewogener Schadensschwere (GSS) und Schadenskonzentrationswert (SKW). In Gelb ist Beispiel 1 (GGS = 3,96 / SKW = 19) und in Blau das Beispiel 2 (GGS = 3,97 / SKW = 35) dargestellt. Für Beispiel 1 ergibt sich eine Substanz von 10 % und für Beispiel 2 von 15 %. (Stein und Stein, 2019).....	58
Bild 13:	Auswahl einer Sanierungsoption nach DynaStrat	60
Bild 14:	Feststellung der Substanzklasse	62
Bild 15:	Haltungsprotokoll und automatischen Sanierungsplanung für eine Haltung gem. stratIS-kanal	66
Bild 16:	Berechnungsmodell •••kokas• - Eingangsgrößen und Ergebnisse	70
Bild 17:	Berechnungsmodell •••kokas• - Schematische Darstellung des Investitionsverlaufes.....	71
Bild 18:	Prozess der Substanzklassifizierung bei den verschiedenen Modellanbietern in Deutschland (rot: spezifisch festzulegende Parameter; grün: Kennwerte bzw. Berechnungsergebnisse; \mathbb{R} bzw. \mathbb{N} : reelle bzw. natürliche Zahl)	79
Bild 19:	Inspektionsprotokoll Haltung 82 (H0000082) (© Pecher & Partner, Berlin)	82
Bild 20:	Exemplarischer Verlauf einer Normierungsfunktion (FGSV, 2018)	89

Bild 21:	Schema für die Zustandsbewertung von Straßen mit Betondecken, nach (FGSV, 2018)	90
Bild 22:	Zusammenhang zwischen Schadensprozess und Schadensklasse nach MSV (BAW, 2018)	93
Bild 23:	Schematischer Ablauf des Sachwertverfahrens (Maibaum, 2009).....	96
Bild 24:	Ermittlung des Abnutzungsvorrats am Beispiel des Baustoffs Anstrich (Schönfelder, 2010; Schönfelder, 2011).....	97
Bild 25:	Wertezuordnung zur Einheitsskala des Abnutzungsmerkmals reversibler Ablagerungen (Schönfelder, 2010; Schönfelder, 2011).....	98
Bild 26:	Beispiel zum Sachwertverfahren nach ImmoWertV (Marschke, Schmidt, 2006)	98
Bild 27:	Beispiel für ein gewichtetes Bewertungssystem nach dem ERAB-Verfahren für den Baustoff „Anstrich“ (Schönfelder, 2010; Schönfelder, 2011)	100
Bild 28:	Beispielhafte Schadensbewertung für das Kriterium „Standicherheit“ (S) gem. RI-EBW-PRÜF (BASt, 2017)	105
Bild 29:	Zustandsnoten für Ingenieurbauwerke (Beispiel nicht ausreichender bzw. ungenügender Zustand) gem. RI-EBW-PRÜF (BASt, 2017)	106
Bild 30:	Gesamtprozess der Substanzklassifizierung (Trennung von Abnutzung und Sanierungsempfehlung)	111
Bild 31:	Datenbank-Tool: Ordnerstruktur	124
Bild 32:	Datenbank-Tool: Aufruf.....	124
Bild 33:	Datenbank-Tool: Login-Fenster	125
Bild 34:	Datenbank-Tool: Ansicht nach Start ohne eingelesene Daten.....	125
Bild 35:	Datenbank-Tool: Import-Funktionen	126
Bild 36:	Datenbank-Tool: Ansicht Stammdaten	127
Bild 37:	Datenbank-Tool: Filteroption „GridFilter“	128
Bild 38:	Datenbank-Tool: Filteroption „Zufällige Auswahl (SubKanS)“	128
Bild 39:	Datenbank-Tool: Export SubKanS.....	129
Bild 40:	Datenbank-Tool: Ansicht Stammdaten + Export-Funktionalität	129
Bild 41:	Datenbank-Tool: Ansicht Berechnungen	130
Bild 42:	Verteilung von Materialart (A) und Haltungsalter (B) im Projektdatensatz und in der DWA-Umfrage (Berger et al., 2020).....	132
Bild 43:	Histogramm der Haltungslänge im Projektdatensatz	132
Bild 44:	Verteilung der Feststellungen im Projektdatensatz und in der DWA-Umfrage von 2020 (Berger et al., 2020).....	134
Bild 45:	Histogramm des Haltungsdurchmessers im Projektdatensatz	135
Bild 46:	Verteilung der Hauptcodes nach DWA-M 149-2 (DWA, 2013b) im Projektdatensatz, getrennt für Punkt-, Umfang- und Streckenschäden.....	136
Bild 47:	Punktschäden-Streckenschäden-Matrix mit der Anzahl an Haltungen pro Kategorie (schadensfreie Haltungen ausgeschlossen)	137
Bild 48:	Anzahl sowie Schadenslänge von Schadensart und -ausprägung in Abhängigkeit der Einzelschadensklasse - absolute und relative Verteilung	138

Bild 49:	Informationsquellen für die Kalibrierung	141
Bild 50:	Dichteverteilung der Abnutzung im gesamtem Projektdatensatz durch zwei unterschiedliche etablierte Modelle	142
Bild 51:	Rangkorrelationskoeffizienten zwischen allen bestehenden Modellen	146
Bild 52:	Vergleich der Verteilung von Schadensart und Schadensausprägung zwischen dem Gesamtdatensatz und dem Kalibrierungsdatensatz („Gesamt“: alle schadhaften Haltungen des Projektdatensatzes; „Gleich bewertet“: Kalibrierungsdatensatz; „Unterschiedlich bewertet“: für die Kalibrierung ausgeschlossene Haltungen).....	147
Bild 53:	Verteilung der Hauptcodes nach DWA-M 149-2 (DWA, 2013b) auf die drei Schadensarten: Vergleich zwischen Gesamtdatensatz und Kalibrierungsdatensatz.....	149
Bild 54:	Vergleich der Dichtekurven zwischen Gesamtdatensatz und Kalibrierungsdatensatz für die Stammdaten „Haltungslänge“ (oben) und „Haltungsdurchmesser“ (unten) 150	
Bild 55:	Mittlere Anzahl der Schäden (Punkte) und Verhältnis von Haltungen im Kalibrierungsdatensatz zu schadhaften Haltungen im Projektdatensatz (Balken) pro Haltungslänge	151
Bild 56:	Zweidimensionales Beispiel der maschinellen Optimierung und Rasteranalyse	153
Bild 57:	Start- und Endpunkte der maschinellen Optimierung mit Ableitung der Randbedingungen für die Rasteranalyse	157
Bild 58:	Ergebnis der Kalibrierung als Konfusionsmatrix mit Klassifizierung der bestehenden Modelle und Klassifizierung des kalibrierten <i>SubKanS</i> -Modells (türkise Farben beschreiben Zellen für Trefferquote und erweiterte Trefferquote)	160
Bild 59:	Vergleich unterschiedlicher Gewichtungen des <i>SubKanS</i> -Modells mit einer ingenieursmäßigen Einschätzung der Abnutzung für 105 Haltungen	163
Bild 60:	Konfusionsmatrix zwischen der Experteneinschätzung für die Abnutzung von 105 Haltungen und der Vergleichsvariante mit linearen Klassengewichten (links) bzw. dem kalibrierten <i>SubKanS</i> -Modell (rechts)	164
Bild 61:	Klassengewichte des kalibrierten <i>SubKanS</i> -Modells.....	165
Bild 62:	Abweichung der Substanz durch Fehler im Inspektionsprotokoll (der Durchschnitt beschreibt das arithmetische Mittel)	174
Bild 63:	Vergleich der Auswirkung des Fehlers "Boden sichtbar" auf die Substanz mit und ohne Überlagerungsregeln.....	175
Bild 64:	Verteilung der Substanzklassen (SBK) und Zustandsklassen (ZK) aller modifizierter Haltungen für die Fehler: A) verschobene Verbindung im Winkel als Streckenschaden (BAJ C StrS) sowie B) und C) eine durch die Annahme ISYBAU um 2 Zustandsklassen unterschätzte Schadensschwere („ISYBAU – 2“)	175
Bild 65:	Veränderung der Substanz- bzw. Zustandsklasse bei Verwendung eines um 2 Zustandsklassen schwereren Schadens anstelle eines durchschnittlichen ISYBAU- Werts.....	177
Bild 66:	Verfahrensschema zur Ableitung von Sanierungstendenzen und -kosten	180
Bild 67:	Sanierungsempfehlungen der Modellanbieter (anonymisiert).....	181

Bild 68:	Aufsummierung aller Sanierungsempfehlungen für das Szenario „Vorzugsvariante“	182
Bild 69:	Sanierungsempfehlungen für das Szenario „Vorzugsvariante“ mit Regressionskurven	183
Bild 70:	Ergebnisse der beiden Sanierungsszenarien.....	185
Bild 71:	Kosten für Reparaturen	187
Bild 72:	Kosten für Renovierungen	187
Bild 73:	Kosten für Erneuerungen.....	188
Bild 74:	Wahrscheinlichkeitsvektor für [REP;REN;ERN] für eine Abnutzung von 50 %	189
Bild 75:	Ableitung von teilweiser Substanzverbesserung (exemplarische Darstellung)	190
Bild 76:	Verteilung der Substanzklassen nach <i>SubKanS</i> über die Anzahl der Haltungen im Projektdatensatz	195
Bild 77:	Reales Teilnetz mit 1.337 Haltungen: Zustands- und Substanzklassenverteilung	195
Bild 78:	Reales Teilnetz mit 1.337 Haltungen: Zustandsklassen (links) und Substanzklassen (rechts)	196
Bild 79:	Beschreibung der Lage innerhalb von Schächten nach DIN EN 13508-2 (DIN EN, 2011)	199
Bild 80:	Beispiel der Vermögensentwicklung für verschiedene Instandhaltungsstrategien (Kanalnetzlänge ca. 1.000 km)	205

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1:	Klassengewicht KG_i	9
Tabelle 2:	Startgewicht StG_i	12
Tabelle 3:	Festlegung der Zustandsklassen gem. DWA-M 149-3 (DWA, 2015a)	15
Tabelle 4:	Arten der Zustandserfassung und -beurteilung in unterschiedlichen Netzsparten und (Infrastruktur-)Bereichen	29
Tabelle 5:	Zweck der Zustandserfassung/-beurteilung (Beispiele, eigene Darstellung gem. DWA-M 149-1 (DWA, 2018))	33
Tabelle 6:	Aufbau des Inspektionsdatenfeldkodes für Abwasserleitungen und -kanäle gem. DIN EN 13508-2 (DIN EN, 2011) (eigene Darstellung nach DWA-M 149-2 (DWA, 2013b)).....	37
Tabelle 7:	Einordnung der Zustandsklassen von Einzelfeststellungen/Schäden gem. DWA-M 149-3 (DWA, 2015, eigene Darstellung)	40
Tabelle 8:	Klassifizierung von Einzelschäden gem. DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) am Beispiel des Schadensbildes „Rissbildung“ (eigene Darstellung)	41
Tabelle 9:	Relevanz wesentlicher Randbedingungen gem. DWA-M 149-3 (DWA, 2015, eigene Darstellung).....	42
Tabelle 10:	Handlungsbedarf abgeleitet aus Sanierungsbedarfszahl gem. DWA-M 149-3 (DWA, 2015, eigene Darstellung)	43
Tabelle 11:	Wichtung nach Zustandsklassen (DWA, 2012).....	50
Tabelle 12:	Stützpunkte der Normierungsfunktion (DWA-Themenband T 4/2012 (DWA, 2012))	51
Tabelle 13:	Wertebereichszuordnung gewogene Schadensschwere	55
Tabelle 14:	Wertebereichszuordnung Schadenskonzentration	57
Tabelle 15:	Zuordnung Substanzklassen gemäß $STATUS_{kanal}$	58
Tabelle 16:	Zuordnung relative Substanz zu einer Substanzklasse gemäß Modellverständnis stratIS-kanal	69
Tabelle 17:	Zusätzliche Punktzahl P_x der NORVAR-Methode in Abhängigkeit von Einzelfeststellung und Schadensnote (Auszug aus NORVAR, 2007)	76
Tabelle 18:	Für den Modellvergleich gegenübergestellte Ansätze zur Substanzklassifizierung ..	80
Tabelle 19:	Grundverständnis Abnutzung und Substanzklasse	81
Tabelle 20:	Abnutzungsermittlung der Modellansätze für Haltung 82	83
Tabelle 21:	Sensitivität der Modellansätze (Szenario A)	83
Tabelle 22:	Sensitivität der Modellansätze (Szenario B)	84
Tabelle 23:	Sensitivität der Modellansätze (Szenario C)	84
Tabelle 24:	Sensitivität der Modellansätze (Szenario D)	85
Tabelle 25:	Sensitivität der Modellansätze (Szenario E).....	85
Tabelle 26:	Bewertungsrelevante Zustandsgrößen für Straßen, nach (FGSV, 2018)	88

Tabelle 27:	Wertermittlungsverfahren gem. ImmoWertV (nach Maibaum, 2009)	95
Tabelle 28:	Anforderung an den <i>SubKans</i> -Ansatz (Modellreaktion)	113
Tabelle 29:	Beispiele für die Zuordnung von Schadenscodes aus DIN EN 13508-2 (DIN EN, 2011) in Schadensart und Schadensausprägung nach <i>SubKans</i>	117
Tabelle 30:	Vorgaben Klassengewicht KG	130
Tabelle 31:	Übersicht über die Haltungsanzahl und Haltungslänge pro Zustandsklasse mit Angabe des durchschnittlichen Baujahrs und Alters (arithmetisches Mittel)	131
Tabelle 32:	Haltungen mit Überlagerungen pro Schadensart und Schadensausprägung	139
Tabelle 33:	Beispiel zur Auswahl und Klassifizierung ähnlicher Haltungen (jede Zeile steht für eine Haltung. Rote Schrift: nicht ähnlich bewertete Haltung. M1 bis M5 steht für die Modell 1 bis 5)	145
Tabelle 34:	Startpunkt der Kalibrierung	152
Tabelle 35:	Eigenschaften der maschinellen Optimierung	156
Tabelle 36:	Randbedingungen der Rasteranalyse.....	158
Tabelle 37:	Ergebnis der Rasteranalyse.....	159
Tabelle 38:	Ausgewählte Gewichtungen nach Kalibrierung sowie Vergleichsvarianten für die Klassengewichte mit Angabe der Trefferquote (TRQ) und der erweiterten Trefferquote (TRQ _{erw}) in %	162
Tabelle 39:	Trefferquoten Kalibrierung und Validierung	167
Tabelle 40:	Bei der Sensitivitätsanalyse betrachtete Fehler, sortiert nach Fehlergruppen - Beschreibung der Modifikation von Inspektionsprotokollen und Angabe der Anzahl modifizierter Protokolle	169
Tabelle 41:	Auswirkung von Fehlern auf Substanzklassifizierung, Zustandsklassifizierung und ermittelte Substanz	178
Tabelle 42:	Substanzklassen für Abwasserkanäle	193

0 Zusammenfassung

Die Zustandserfassung von Kanalhaltungen und Schächten erfolgt in aller Regel über optische Inspektion. Über standardisierte Verfahren der Zustandsbeschreibung und Zustandsklassifizierung lassen sich kurz- bis mittelfristige Sanierungsprioritäten im Sinne einer gegenwärtigen Funktionserfüllung ableiten. Ein allgemeingültiger Standard zur Bewertung der baulichen Substanz im Sinne einer zukünftigen Funktionserfüllung, aus der sich Kennzahlen wie z. B. Abnutzung und Restnutzungsdauern oder mögliche Sanierungsoptionen ableiten lassen, und der als standardisierte Grundlage zur Entwicklung geeigneter mittel- bis langfristiger Sanierungsstrategien mit dem Ziel eines Substanzerhalts der Entwässerungsnetze geeignet ist, existiert bislang jedoch nicht. Diese Lücke schließt das Kooperationsvorhaben „Entwicklung eines Standards zur Bewertung und Klassifizierung der baulichen Substanz von Abwasserkanälen und Schächten - *SubKanS*“. Die in *SubKanS* durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse beschreibt der vorliegende Abschlussbericht.

Zunächst wurden bereits bestehende inspektionsbasierte Bewertungsansätze aus den Infrastrukturbereichen Entwässerungssysteme, Straßen, Verkehrswasserbauwerke, Wohn- und Geschäftsbauwerke sowie Ingenieurbauwerke auf nationaler und internationaler Ebene erfasst und näher beschrieben, um deren Verwendbarkeit bei der Entwicklung des Standards zu prüfen. Alternative Ansätze aus den Bereichen Wärme, Gas, Trinkwasser, Strom und Telekommunikation sowie Maschinenbau wurden ebenfalls gesichtet. Allerdings wurden diese entweder aufgrund des in diesen Bereichen verfolgten risikobasierten (statistischen) Ansatzes nur über Ausfallraten bzw. Versagenswahrscheinlichkeiten oder der ausschließlich auf einzelne Anlagenkomponenten bezogenen Betrachtungsweise nicht weiterverfolgt. Der Fokus der durchgeführten Recherche über Methoden zur Substanzklassifizierung bzw. Substanzbewertung von Vermögensgegenständen wurde auf inspektionsbasierte Ansätze gelegt, da die Inspektion bei Entwässerungsnetzen möglich und üblich ist und die Erfahrungen der anderen Branchen mit direkter Erfassung des baulichen/technischen Zustands für die konkrete Fragestellung in *SubKanS* die höhere Relevanz haben.

Die Recherche hat ergeben, dass Methoden zur baulichen Substanzklassifizierung von Abwasserkanälen und -schächten außerhalb Deutschlands nicht existieren. Die bestehenden internationalen Modelle identifizieren insbesondere Sanierungsbedarf und -dringlichkeit im Sinne einer Zustandsklassifizierung, bieten jedoch keine methodische Unterstützung für die Auswahl eines geeigneten Sanierungshauptverfahrens. Die in Deutschland gebräuchlichen Substanzklassifizierungsmodelle für Kanalhaltungen und Schächte waren über ihre Anbieter vollständig im Projektkonsortium vertreten. Die insgesamt fünf Modelle wurden ausführlich in Hinblick auf Grundverständnis für Abnutzung und Substanz(klasse), verwendete Eingangs- und Ausgangsdaten sowie Prozesskette zur Substanzklassifizierung verglichen. Nicht zuletzt aufgrund der unterschiedlichen Substanzverständnisse ergeben sich erhebliche Unterschiede hinsichtlich Methodik und konkreter Substanzbeurteilung, die anhand einer

Beispielhaltung mit Sensitivitätsanalyse ausführlich gegenübergestellt wurden. Auf Basis des Modellvergleichs, des Expertenaustauschs mit Kanalnetzbetreibern und Sanierungsplanern im Rahmen von durchgeführten Workshops und der Ergebnisse der Substanzklassifizierungsrecherche aus den anderen Infrastrukturbereichen wurden Anforderungen an die Substanzklassifizierung von Abwasserkanälen und Schächten abgeleitet. Insbesondere galt es, die Abnutzung als Einschränkung der Funktionsfähigkeit (Dichtheit, Standsicherheit und Betrieb) mit einem belastbaren Algorithmus für die gesamte Betrachtungseinheit abzubilden. Dabei war ein direkter Bezug zu technischer und akzeptierter Nutzungsdauer sowie Substanz herzustellen und die Summe aller die Funktion beeinträchtigenden Indikationen bzw. Schadensbilder zu berücksichtigen.

Das daraufhin im Rahmen von *SubKanS* entwickelte Standardverfahren zur Ermittlung der baulichen Substanz von Abwasserkanälen auf Basis von i.d.R. verfügbarer Stamm- und Zustandsdaten gliedert sich in folgende fünf Prozessschritte:

- Klassifizierung der Einzelzustände
- Festlegung von Schadensart und Schadensausprägung
- Berechnung des Schadensgewichts
- Ermittlung der Abnutzung
- Substanzklassifizierung

Ausgehend von der bereits existierenden Klassifizierung der Einzelzustände (bzw. der einzelnen Feststellungen) nach Merkblatt DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) als Grundlage der Zustandsklassifizierung wurden die Schadensbilder (Einzelzustand bzw. Kombination aus mehreren sich überlagernden Einzelzuständen) dahingehend evaluiert, inwieweit diese sich auch für die Beurteilung der baulichen Substanz eignen. Notwendige Modifikationen wurden aufgelistet.

Als Schadensart wird in *SubKanS* nach Punktschaden *PktS*, Umfangschaden *UmfS* und Streckenschaden *StrS* unterschieden. Die Schadensausprägung kann ein durchdringender (wanddurchdringender und damit korrespondierender) Schaden *DdS*, ein Oberflächenschaden *OfS* oder ein Schaden ohne Bezug zur baulichen Struktur *SoB* sein. Die Kombination von Schadensart und Schadensausprägung dient der Festlegung eines Startgewichts. Das ist erforderlich, um eine ausgewogene Gesamtbewertung zu ermöglichen.

Die Länge eines Schadens i wird sodann abhängig von Schadensart und -ausprägung sowie seiner -schwere mit einem Startgewicht StG_i und seinem Klassengewicht KG_i gewichtet.

Die Summe der gewichteten Schäden ergibt die (absolute) Bruttoschadenslänge BSL_{abs} .

Die Abnutzung *ABN* entspricht der relativen Bruttoschadenslänge *BSL_{rel.}*. Sie beschreibt das Verhältnis von absoluter Bruttoschadenslänge und Objektausdehnung (Objektlänge) *OL* und korrespondiert mit der Substanz *SUB*.

Für die abschließende Substanzklassifizierung wurde die Substanz-Skala in 6 Bereiche von 0 (Substanz vollständig aufgebraucht/vollständige Abnutzung) bis 5 (sehr gute bis vollständige Substanz/vernachlässigbare bis keine Abnutzung) unterteilt.

Anhand von etwa 100.000 Inspektionsdatensätzen (3.989 km Haltungslänge) und bereits bestehender Modelle zur Substanzbewertung wurden die Modellparameter (Startgewichte und Klassengewichte) kalibriert. Die Datensätze wurde zunächst deskriptiv analysiert, um ihre Repräsentanz für Kanalhaltungen in Deutschland nachzuweisen.

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurde weiterhin geprüft, wie das entwickelte Verfahren auf Fehler in den Inspektionsprotokollen (z. B. fehlerhafte Kodierungen oder nicht erfasste Schadensbilder) reagiert. Im Ergebnis zeigt sich, dass solche Fehler für die Beurteilung der Substanz mehr Relevanz haben können als für die prioritätsorientierte Zustandsklassifizierung. Die mittleren Abweichungen für die betrachteten Fälle sind mit < 5 % allerdings gering.

Eine weitere Zielsetzung der Projektbearbeitung war die Ableitung von Sanierungstendenzen (Monitoring (*MOM*), Reparatur (*REP*), Renovierung (*REM*) und Erneuerung (*ERM*)) und -aufwand anhand der ermittelten Substanz(klasse). Hierzu wurden zunächst von den fünf im Konsortium vertretenen Modellanbietern auf Basis ihrer langjährigen Erfahrungen und praxiserprobten Entscheidungsmodelle Sanierungsempfehlungen für die vorhandenen Daten ermittelt. Zur allgemeingültigen Ableitung von Sanierungstendenzen wurden die investiven Verfahren (*REN / ERM*) zusammengefasst und mit der Tendenz für Reparaturen in Abhängigkeit des Abnutzungsgrades gesetzt. Hieraus lassen sich in der praktischen Anwendung Auswirkungen verschiedener Sanierungsszenarien auf Objekt- und Netzebene untersuchen.

Der Nutzen der Substanzermittlung für die Anwender wurde anhand von verschiedenen Praxisbeispielen verdeutlicht. Auf Einzelobjektebene wurde gezeigt, wie sich die Sanierung (durch unterschiedliche Verfahren) auf die Substanzverbesserung auswirken kann. Weitreichende Aussagen über erwartbare Sanierungsverfahren und Sanierungserfolge sind durch die standardisierte Substanzbeurteilung auf Objektebene ableitbar. Für (Teil-)Netze ermöglicht die Kenntnis über die Verteilung der Substanzklassen eine Einschätzung des vorhandenen Sanierungs- bzw. Investitionsbedarfes, die den Netzbetreiber bei der Entwicklung bzw. Überprüfung und Anpassung der Sanierungsstrategie unterstützen soll. Auf Netzebene erlaubt die Substanzklassifizierung eine deutlich umfassendere Analyse des Systems als dies bei alleiniger Betrachtung der Zustandsklasse möglich ist: aus der Kombination von Zustands- und Substanzklasse können gegenwärtige und mittelfristig erwartbare Risiken identifiziert sowie erwartbare Sanierungslasten abgeschätzt werden.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Ableitung eines Sanierungshauptverfahrens nicht allein über die Substanzklasse erfolgen kann (oder soll). Neben Substanz sind zusätzliche ingenieurmäßige Beurteilungen und die Einbeziehung zahlreicher weiterer Randbedingungen, insbesondere der kaufmännischen Faktoren, für die dezidierte Festlegung von Sanierungsverfahren erforderlich.

Um die Ergebnisse von *SubKanS* in ein technisches Regelwerk zu überführen und die Substanz(klasse) als Bewertungsparameter für Kanalisationen zu implementieren, wurde die DWA-Arbeitsgruppe ES-4.7 „Sanierungsstrategien“ in enger Abstimmung mit der DWA-AG ES-4.1 „Zustandserfassung und -beurteilung“ mit der Erstellung des Merkblattes DWA-M 149-10 „Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden, Teil 10: Substanzklassifizierung“ beauftragt.

Die für Kanalhaltungen entwickelte und parametrisierte Methodik ist vom Grundsatz auf andere Systemelemente, wie Schächte, Anschlusskanäle oder Grundstücksentwässerungsanlagen übertragbar. Eine Übertragbarkeit auf andere Infrastrukturen ist ebenfalls möglich, sofern Inspektionsergebnisse vorliegen.

Für die Erreichung einer wissenschaftlich fundierten Substanzklassifizierung für Schächte, die in einen Normungsprozess eingespeist werden kann, sind detailliertere Betrachtungen notwendig als dies im gegebenen Projektumfang möglich war. So sollte beispielsweise erforscht werden, inwieweit eine Differenzierung des baulichen Schadens nach Bauteil (Konus, Mittelteil, Berme, ...) und evtl. auch nach Tiefenlage sinnvoll und inwieweit die Sanierungstendenz Schacht auch von der Sanierungstendenz Haltung abhängig ist. Dies würde zu einem Substanzklassifizierungsansatz führen, der deutlich von dem für Kanalhaltungen entwickelten Ansatz abweicht, was entsprechend im Rahmen eines Anschlussvorhabens zu validieren und in der Fachwelt zu etablieren wäre.

1 Begriffe

1.1 Glossar

- **Abnutzung¹**

„Abnutzung ist eine physikalische Erscheinung, die zu Verlust oder Verformung oder Zustandsänderung des Werkstoffs führt“ (DIN EN 13306 (DIN EN, 2018)).

„Abbau des Abnutzungsvorrates, hervorgerufen durch chemische und/oder physikalische Vorgänge“ (DIN 31051 (DIN, 2019)) (vgl. Bild 1).

Die Abnutzung von Abwasserkanälen und Schächten bezeichnet in diesem Sinne eine Einschränkung der Funktionsfähigkeit (Dichtheit, Standsicherheit und Betrieb) der gesamten Betrachtungseinheit (nicht die beispielsweise in DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) beschriebene Dringlichkeit, mit der eine Sanierung zu erfolgen hat). Die Abnutzung ergibt sich entsprechend aus der Summe aller die Funktion beeinträchtigenden Indikationen. Analog zu DWA-M 149-1 (DWA, 2018) umfasst Funktionsfähigkeit im hier verwendeten Sinne zwar betriebliche, nicht aber hydraulische Funktionseinschränkungen im Sinne einer Unterdimensionierung.

- **Abnutzungsgrenze**

„vereinbarter oder festgelegter Mindestwert des Abnutzungsvorrates“ (DIN 31051 (DIN, 2019), vgl. Bild 1)

Die Abnutzungsgrenze eines Abwasserkanals / eines Schachtes ist erreicht, wenn aufgrund des (über optische Inspektion erfassten) Zustandes das Objekt aus technischer Sicht unter Einhaltung der bautechnischen, funktionalen und rechtlichen Vorgaben nicht mehr genutzt werden kann und damit eine „bestimmungsgemäße und den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechende Verwendung des Objektes nicht mehr möglich ist (vgl. technische Nutzungsdauer)“². Die Abnutzungsgrenze ist (ebenso wie die Sanierungspriorität) keine (im physikalischen oder mathematischen Sinne) absolute und zwingende Ein- oder Zuordnung, sondern das Ergebnis einer ingenieurtechnischen Betrachtung und damit das Ergebnis von Festlegungen.

- **Abnutzungsvorrat**

„Vorrat der möglichen Funktionserfüllungen unter festgelegten Bedingungen, der eines Objekts aufgrund der Herstellung, Instandsetzung oder Verbesserung innewohnt“ (DIN 31051 (DIN,

¹ Anmerkungen gem. DIN EN 13306 (DIN EN, 2018):

- „Solche Vorgänge, die durch unterschiedliche Beanspruchungen hervorgerufen werden, sind z. B. Reibung, Korrosion, Ermüdung, Alterung, Kavitation, Bruch usw.“
- „Abnutzung ist unvermeidbar.“

² Dieser Zustand entspricht der „Abnutzungsgrenze“ als vereinbartem oder festgelegtem Mindestwert des Abnutzungsvorrates gem. DIN 31051 (DIN, 2019) bzw. dem „Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit“.

2019), vgl. Bild 1 und Restsubstanz).

Die Zusammenhänge sind im Folgenden dargestellt:

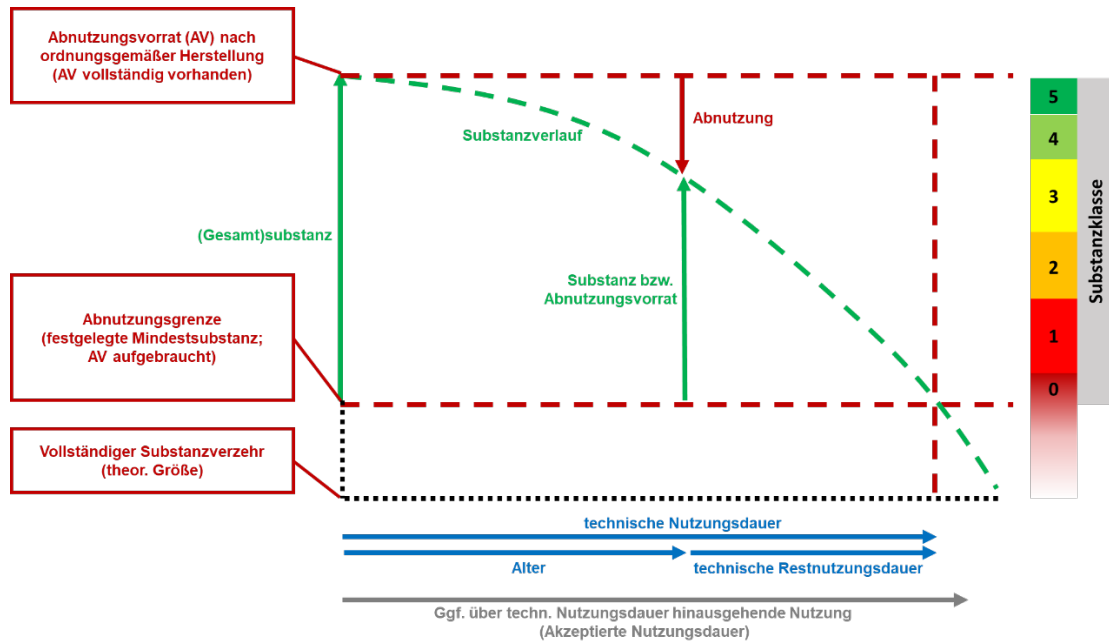


Bild 1: Abbau des Abnutzungsvorrates über die Zeit und Begrifflichkeiten gem. *SubKanS*-Verständnis (Abnutzungsvorrat noch nicht aufgebraucht) (eigene Darstellung)

- **Änderung³ (Modifikation)**

„Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements zur Änderung einer oder mehrerer Funktionen eines Objekts“ (DIN 31051 (DIN, 2019))

- **Anforderungen**

„Basierend auf den einschlägigen Normen/Richtlinien, müssen an ein regelkonformes Entwässerungssystem mindestens drei grundlegende Anforderungen gestellt werden. Dies sind:

- Dichtigkeit (D),
- Standsicherheit (S) und
- Betriebssicherheit (B)“

(DWA-M 149-3 (DWA, 2015a)).

³ Anmerkungen gem. DIN 31051 (DIN, 2019):

- „Eine Änderung ist keine Instandhaltungsmaßnahme, sondern bezieht sich auf die Änderung der bisherigen geforderten Funktion eines Objekts in eine neue geforderte Funktion. Eine Änderung kann einen Einfluss auf die Funktionsicherheit oder die Leistung eines Objekts haben.“
- „Der Wechsel eines Objekts, bei dem eine andere Version das ursprüngliche Objekt ersetzt, ohne dass sich die geforderte Funktion ändert oder die Funktionsicherheit des Objekts verbessert, wird als Ersatz bezeichnet und stellt keine Änderung dar.“

- **(Betrachtungs-)Einheit**

Betrachtungseinheiten sind die Objekte „Kanalhaltung“ bzw. „Abwasserkanal“ sowie „Schacht“.

- **Einzelschadensklasse ESK_{i,j}**

Klasse der einzelnen Feststellung (bzw. des Einzelschadens) i nach Schutzziel j (D/S/B/G). Die Einzelschadensklasse wird durch DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) definiert.

- **Entwässerungssystem**

„System, das Sammlung, Transport, Behandlung von Abwasser und seine Einleitung in ein Gewässer gewährleistet“ (DIN EN 16323 (DIN EN, 2014))

„Infrastruktur für das Management von Abwasser und Oberflächenabfluss in der bebauten Umwelt“ (DIN EN 752 (DIN EN 2017))

- **Erneuerung**

„Herstellung neuer Abwasserleitungen oder Abwasserkanäle in der bisherigen oder einer anderen Linienführung, wobei die neuen Anlagen die Funktion der ursprünglichen Abwasserleitungen und Abwasserkanäle einbeziehen“ (DIN EN 16323 (DIN EN, 2014))

- **(geforderte) Funktion⁴**

„Funktion, eine Kombination von Funktionen oder eine Gesamtkombination der Funktionen eines Objekts, die für die Erfüllung einer vorgegebenen Anforderung als notwendig erachtet wird“ (DIN 31051 (DIN, 2019))

- **Funktionserfüllung⁵**

„Erfüllen der bei der Herstellung einer Einheit definierten Anforderungen“ (DIN 31051 (DIN, 2019))

- **Funktionsfähigkeit**

„Fähigkeit eines Objekts zur Funktionserfüllung aufgrund ihres Zustandes“ (DIN 31051 (DIN, 2019))

⁴ Anmerkungen gem. DIN 31051 (DIN, 2019):

- „Die „Erfüllung einer vorgegebenen Anforderung“ kann auch die Werterhaltung der Anlage einschließen.“
- „Die vorgegebene Anforderung kann explizit festgelegt werden oder auch nur implizit beinhaltet sein und kann in manchen Fällen auch niedriger als die ursprünglich vorgesehenen Leistungsdaten liegen.“
- „Die geforderte Funktion schließt stillschweigend auch mit ein, was das Objekt nicht erbringen darf.“
- „Unter Funktion wird Erfüllung des definierten Nutzungszwecks verstanden.“

⁵ Anmerkungen gem. DIN 31051 (DIN, 2019):

- „Die Herstellung beginnt mit der Planung und Entwicklung und endet mit der Auslieferung der Betrachtungseinheit. Unter Herstellung wird auch die Änderung (Modifikation) mit dem Ziel der Änderung der Funktion verstanden.“

- **[Kanal]haltung**

„Abschnitt einer Abwasserleitung oder eines Abwasserkanals zwischen zwei angrenzenden Knotenpunkten“ (DIN EN 16323 (DIN EN, 2014))

- **Inspektion**

Allgemein:

„Prüfung auf Konformität der maßgeblichen Merkmale eines Objekts durch Messung, Beobachtung oder Prüfung“ (DIN EN 13306 (DIN EN, 2018))

Entwässerungssysteme:

„Untersuchungen zur Erfassung des baulichen/betrieblichen Zustands“ (DWA-M 149-3 (DWA, 2015a))

- **Instandsetzung**⁶ (vgl. auch Sanierung)

„physische Maßnahme, die ausgeführt wird, um die Funktion eines fehlerhaften Objekts wiederherzustellen“ (DIN 31051 (DIN, 2019))

- **(Abwasser)Kanal**

„Meist erdverlegte Rohrleitung oder andere Vorrichtung zur Ableitung von Abwasser aus mehreren Quellen“ (DIN EN 16323 (DIN EN, 2014))

- **Kanalisation**

„Netz von Rohrleitungen und Zusatzbauten, das Abwasser von Anschlusskanälen zu Kläranlagen oder zu anderen Entsorgungsstellen ableitet“ (DIN EN 16323 (DIN EN, 2014))

- **Kanalnetz**

„Netz von Elementen (Haltungen, Leitungen etc.) und Knoten (Schächte, fiktive Schächte etc.)“ (BFR, 2019)

⁶ Anmerkungen gem. DIN 31051 (DIN, 2019):

- „Diese Maßnahmen können beinhalten:
 - Auftrag, Auftragsdokumentation und Analyse des Auftragsinhaltes
 - Vorbereitung der Durchführung, beinhaltend Kalkulation, Terminplanung, Abstimmung, Bereitstellung von Personal, Mitteln und Material, Erstellung von Arbeitsplänen
 - Vorwegmaßnahmen wie Arbeitsplatzausrüstung, Schutz- und Sicherheitseinrichtungen usw.
 - Überprüfung der Vorbereitung und der Vorwegmaßnahmen einschließlich der Freigabe zur Durchführung
 - Durchführung
 - Funktionsprüfung und Abnahme
 - Fertigmeldung
 - Auswertung einschließlich Dokumentation, Kostenaufschreibung, Aufzeigen der Möglichkeit von Verbesserungen
 - Rückmeldung.“

- **Klassengewicht KG_i**

relative Gewichtung des Schadens i gem. der zugeordneten Schadensklasse SK. Es gilt:

Tabelle 1: Klassengewicht KG_i

SK	KG
0	1,00
1	0,80
2	0,25
3	0,15
4	0,05
(5)	(0,0)

- **(Rest-)Nutzungsdauer, technische**

„Die technische Nutzungsdauer beschreibt den Zeitraum, in welchem der Netzbestandteil aus technischer Sicht unter Einhaltung der bautechnischen, funktionalen und rechtlichen Vorgaben genutzt werden kann. Entsprechend dem Nutzungsbegriff nach DIN 31051 (DIN, 2019) ist dies der Zeitraum, in dem eine „bestimmungsgemäße und den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechende Verwendung einer (Betrachtungs-)Einheit [...]“ erfolgt. Innerhalb der technischen Nutzungsdauer kann ein Wirtschaftsgut durch geeignete Instandhaltungsmaßnahmen im technisch erforderlichen Zustand gehalten werden, sofern nicht Wirtschaftlichkeitsaspekte dagegensprechen.“ (DWA-A 143-14 (DWA, 2017)) Der Bestimmung der zutreffenden (Rest-)Nutzungsdauer einer Haltung kommt bei der Bestimmung des Substanzwertes eine erhebliche Bedeutung zu.

„Die technische Nutzungsdauer kann auf Basis von Alterungsprognosemodellen sowie unter Berücksichtigung von Funktionsänderungen des Kanalnetzes geschätzt werden“ (DWA-A 143-14 (DWA, 2017)).

- **(Rest-)Nutzungsdauer, wirtschaftliche**

„Zeitraum, innerhalb dessen die anfallenden Kosten für die Unterhaltung des bestehenden Netzbestandteils geringer sind als die Kosten einer Erneuerung. Die wirtschaftliche Nutzungsdauer kann auf Basis von Wirtschaftlichkeitsberechnungen unter Berücksichtigung der Zustandsverschlechterung (z. B. durch Alterungsprognosemodelle) bestimmt werden.“ (DWA-A 143-14 (DWA, 2017))

- **Objekt⁷**

„Teil, Bauelement, Gerät, Teilsystem, Funktionseinheit, Betriebsmittel oder System, das/die für sich allein beschrieben und betrachtet werden kann“ (DIN 31051 (DIN, 2019))

„Bestandteil eines Entwässerungssystems (z. B. Abwasserkanal, Abwasserleitung, Schacht, Sonderbauwerk)“ (DWA-M 149-3 (DWA, 2015a))
- **Renovierung**

„Maßnahmen zur Verbesserung der aktuellen Funktionsfähigkeit von Abwasserleitungen und Abwasserkanälen unter vollständiger oder teilweiser Einbeziehung ihrer ursprünglichen Substanz“ (DIN EN 16323 (DIN EN, 2014))
- **Reparatur**

„Maßnahmen zur Behebung örtlich begrenzter Schäden“ (DIN EN 16323 (DIN EN, 2014))
- **Restsubstanz**

Restsubstanz = (materielle) Substanz abzüglich Abnutzung (vgl. Bild 1).
- **Sanierung**

„Maßnahmen zur Wiederherstellung oder Verbesserung von vorhandenen Systemen, umfasst Renovierung, Reparatur und Erneuerung“ (DIN EN 16323 (DIN EN, 2014))
- **[Einsteig]schacht**

„Bauwerk mit abnehmbarem Deckel, welches auf einer Abwasserleitung oder einem Abwasserkanal angebracht ist, um den Einstieg von Personen zu ermöglichen“ (DIN EN 16323 (DIN EN, 2014))
- **Schaden**

Überschreitung des Toleranzbereiches für die Abweichung zwischen dem Ist- und dem Soll-Zustand zum Zeitpunkt der Inspektion
- **Schadensart**

Einordnung der Feststellungen entsprechend ihrer Schadenslänge bzw. Schadensausrichtung

 - **Punktschaden PktS**

punktuelle Schaden ohne Ausdehnung über größere Haltungsbereiche (z. B. schadhafter Anschluss oder fehlendes Wandungsteil)

⁷ Anmerkungen gem. DIN 31051 (DIN, 2019):

- Eine Anzahl von Objekten, z. B. ein Komplex von Objekten oder ein Muster, kann selbst als Objekt angesehen werden.

- **Umfangschaden *UmfS***
Schaden entlang des Rohrumfangs (z. B. Querriss oder einragende Dichtung)
- **Streckenschaden *StrS***
Schaden über größere (axiale) Längsbereiche (z. B. Längsrisse oder Korrosion)
- **Schadensausprägung**
Einordnung der Feststellungen entsprechend ihres Einflusses auf das Rohrmaterial bzw. das Boden-Rohr-System
 - **durchdringender (wanddurchdringender und damit korrespondierender) Schaden *DdS***
Schaden mit Ausprägung durch das komplette Rohrmaterial (z. B. Riss oder sichtbarer Boden)
 - **Oberflächenschaden *OfS***
nicht das gesamte Rohrmaterial durchdringender Schaden (z. B. Korrosion oder Abrasion)
 - **Schaden ohne Bezug zur baulichen Struktur *SoB***
betrieblicher oder sonstiger Schaden (z. B. Ablagerungen oder einragende Dichtung)
- **Schadensgewicht *SG_i***
Gewichtung des Schadens *i*
- **Schadensklasse *SK_{s, i, j}***
Klasse der gem. Überlagerungsregeln (siehe Kap. 5.3.2) unter Berücksichtigung von Schadensart und Schadensausprägung zu einem Schaden[sbild] zusammengeführten Einzelschäden *i* nach Schutzziel *j* (D/S/B/G). Während die Einzelschadensklasse durch DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) definiert ist, wird diese Begrifflichkeit durch *SubKanS* neu eingeführt.
- **Schadenskodierung**
Gem. *SubKanS*-Verständnis: Kennzeichnung eines Einzelschadens im Schadensprotokoll anhand des Kodiersystems nach DIN EN 13508-2 (DIN EN, 2011)
- **Schadenslänge *SL_i***
Entsprechung der tatsächlichen geometrischen Ausdehnung des durch einen Schaden *i* beeinträchtigten Haltungsbereiches. Es gilt als Näherung:

- Punktschaden:
SL = 0,3 m (Entsprechung des Umfangs eines Anschlusses DN 100)
- Umfangschaden:
SL = $\pi * DN$ [m] (Entsprechung des Rohrumfangs)
- Streckenschaden:
SL = Position_{Schadensende} - Position_{Schadensanfang}
bzw. auch
SL = kodierte Streckenlänge

- **Schutzziel j**

Gem. DWA-M 149-3 (DWA, 2015a): Dichtheit D, Standsicherheit S und Betriebssicherheit B. Ergänzend wird der Gesamtwert G als Minimum der schutzzielbezogenen Schadensklasse aufgeführt.

- **Startgewicht StG_i**

relative Gewichtung des Schadens i nach Schadensart und -ausprägung. Es gilt:

Tabelle 2: Startgewicht StG_i

	DdS	OfS	SoB
PktS	8	8	8
UmfS	3	3	3
StrS	1	1	1

- **Substanz**

„Die Substanz (lateinisch *sub stare* ‚darunter stehen‘) ist, woraus etwas besteht“ (Wikipedia, 2020b).

- **[Bau]substanz / materielle Substanz**

„Der Begriff Bausubstanz wird im Bauwesen und in der Baudenkmalpflege als Bezeichnung für den Bestand, also die vorhandene Substanz von Bauwerken, verwandt. In der gebräuchlichen Verwendung bezeichnet der Begriff den materiellen Bestand von Gebäuden oder Gebäudeteilen, die eine Teilmenge des Oberbegriffs Bauwerk abdecken.“

„Bausubstanz ist [u. a.] das,

- woraus Bauwerke bestehen und woraus alle Erscheinungen des Gebauten sich ableiten“ und

- „was einem Wandel unterliegt, z. B. durch nutzungsabhängige (Verschleiß bzw. Abnutzung) oder unabhängige (Naturkräfte) Einflüsse“. (Wikipedia, 2020a).

Gem. DWA-A 143-14 (DWA, 2017) beschreibt die materielle Substanz eines Kanalnetzes „die bestehende, auch künftig noch zu erwartende Verfügbarkeit eines Netzes“.

Gem. *SubKanS*-Verständnis werden (materielle) Substanz und Bausubstanz gleichgesetzt.

- **Substanzklasse**

Unterteilung der Substanz in Klassen bzw. Einordnung der Restsubstanz in eine Klasse.

- **Substanzwert**

„Der Substanzwert stellt den materiellen Wert eines Wirtschaftsgutes, eines Kanalnetzes oder einer Haltung unter Berücksichtigung seines Alters sowie gegebenenfalls vorhandener Mängel dar. Der Substanzwert wird in jeweils aktuellen Preisen ausgedrückt. Zum Zeitpunkt der ordnungsgemäßen Erstellung sind der Substanzwert einer Haltung und der Wiederbeschaffungswert gleich. Zum Zeitpunkt der Außerbetriebnahme der Haltung aus baulichen Gründen ist der Substanzwert verbraucht und beträgt 0.“ (DWA-A 143-14 (DWA, 2017))

Eine mögliche Perspektive zur Beurteilung eines Netzes besteht in der Bildung des relativen Substanzwertes (vgl. DWA-A 143-14 (DWA, 2017)).

„Der Substanzverzehr ergibt sich als Differenz des aktuellen Substanzwertes und des Wiederbeschaffungswertes“ DWA-A 143-14 (DWA, 2017).

Zwischen dem relativen Substanzwert nach DWA-A 143-14 und dem Abnutzungsvorrat besteht ein (rein) qualitativer Zusammenhang:

Ein hoher Abnutzungsvorrat geht mit einem hohen relativen Substanzwert einher u. U. beides korreliert statistisch mit einander. Ein kausaler Zusammenhang besteht zwischen beiden Begriffen jedoch nicht zwangsläufig. Zum Zeitpunkt der Neu-Errichtung eines Bauwerks (im einwandfreien Zustand) sind beide Kennwerte maximal. Zum Zeitpunkt der Außerbetriebnahme sind beide Kennwerte 0.

- **Verbesserung⁸** (vgl. auch Sanierung)
„Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements zur Steigerung der immanenten Zuverlässigkeit und/oder Instandhaltbarkeit und/oder Sicherheit eines Objekts, ohne ihre ursprüngliche Funktion zu ändern“ (DIN 31051 (DIN, 2019))
- **Zustandsbeschreibung**
Gem. *SubKanS*-Verständnis: Beschreibung des Ergebnisses der Inspektion im Schadensprotokoll bezogen auf einen Einzelschaden. Zur Beschreibung der mithilfe der optischen Inspektion festgestellten Schäden ist ein einheitliches Kodiersystem nach DIN EN 13508-2 (DIN EN, 2011) zu verwenden.
- **Zustandsbeurteilung (baulich/betrieblich)**
„Einstufung der Ergebnisse der Zustandserfassung nach dem Handlungsbedarf aufgrund der gestellten Anforderungen sowie maßgeblicher Einflussfaktoren. Sie basiert auf den Teilschritten Zustandsklassifizierung und Zustandsbewertung.“ (DWA-M 149-3 (DWA, 2015a))
- **Zustandsbewertung (baulich/betrieblich)**
„Zustandsbewertung ist die Verknüpfung der Ergebnisse der baulich/betrieblichen Zustandsklassifizierung mit maßgeblichen Einflussfaktoren“ (DWA-M 149-3 (DWA, 2015a))
- **Zustandserfassung**
„Maßnahmen zur Feststellung des baulichen/betrieblichen, hydraulischen und umweltrelevanten Ist-Zustands von Objekten“ (DWA-M 149-3 (DWA, 2015a))

⁸ Anmerkungen gem. DIN 31051 (DIN, 2019):

- „Eine Verbesserung kann auch vorgenommen werden, um Fehler während des Betriebs zu verhindern und um Ausfälle zu vermeiden.“
- „Diese Maßnahmen können beinhalten:
 - Auftrag, Auftragsdokumentation und Analyse des Auftragsinhaltes
 - Vorbereitung der Durchführung, beinhaltend Kalkulation, Terminplanung, Abstimmung, Bereitstellung von Personal, Mitteln und Material, Erstellung von Arbeitsplänen
 - Vorwegmaßnahmen wie Arbeitsplatzausrüstung, Schutz- und Sicherheitseinrichtungen usw.
 - Überprüfung der Vorbereitung und der Vorwegmaßnahmen einschließlich der Freigabe zur Durchführung
 - Durchführung
 - Funktionsprüfung und Abnahme
 - Fertigmeldung
 - Auswertung einschließlich Dokumentation, Kostenaufschreibung, Aufzeigen der Möglichkeit von Verbesserungen
 - Rückmeldung.“

- **Zustandsklasse**

Einordnung eines Einzelschadens und der Haltung bzw. des Schachtes in eine Klasse. Es wird gem. DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) von fünf Zustandsklassen zur Klassifizierung von Mängeln ausgegangen. Diese werden hinsichtlich der Schwere wie folgt definiert:

Tabelle 3: Festlegung der Zustandsklassen gem. DWA-M 149-3 (DWA, 2015a)

Klassifizierung	Erläuterung
Zustandsklasse 0	sehr starker Mangel (Gefahr im Verzug)
Zustandsklasse 1	starker Mangel
Zustandsklasse 2	mittlerer Mangel
Zustandsklasse 3	leichter Mangel
Zustandsklasse 4	geringfügiger Mangel
Zustandsklasse 5	aus rechentechnischen Gründen zusätzlich festgelegt für Feststellungen, die keine Mängel sind
Hinweis: Der Begriff „Mangel“ im Sinne dieses Merkblattes ist nicht gleichbedeutend mit dem Begriff „Mangel“ im Sinne des Bauvertragsrechts.	

- **Zustandsklassifizierung (baulich/betrieblich)**

„Zustandsklassifizierung ist die Einstufung der Ergebnisse der Zustandserfassung durch Vergleich mit den gestellten Anforderungen (Dichtheit, Standsicherheit, Betriebssicherheit)“ (DWA-M 149-3 (DWA, 2015a))

- **Zustandsüberwachung⁹**

„manuell oder automatisch ausgeführte Tätigkeit zur Messung der Merkmale und Parameter des physischen Ist-Zustands eines Objekts bestimmten Zeitabständen“ (DIN EN 13306 (DIN EN, 2018))

⁹ Anmerkungen gem. (DIN EN 13306 (DIN EN, 2018)):

- „Die Überwachung unterscheidet sich von der Inspektion dadurch, dass sie zur Bestimmung jedweder Veränderungen der Parameter des Objekts über die Zeit dient.“
- „Die Überwachung kann kontinuierlich, in regelmäßigen Zeitabständen oder nach einer festgelegten Anzahl von Betriebseinsätzen erfolgen.“
- „Die Überwachung wird üblicherweise im Betriebszustand durchgeführt.“

1.2 Abkürzungen

Abkürzung	Erläuterung
a.a.R.d.T.	allgemein anerkannte Regeln der Technik
ABN	Abnutzung
B	Betriebsicherheit
BE	Baustelleneinrichtung
BSL	Bruttoschadenslänge
bspw.	beispielsweise
D	Dichtheit
DdS	(wand-)durchdringender (und damit korrespondierender) Schaden
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DN	Durchmesser
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
EG	Europäische Gemeinschaft
EN	Europäische Norm
EP	Einheitspreis
ERN	Erneuerung
EU	Europäische Union
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V.
FH	Fachhochschule
G	Gesamt
GSL	Gesamtschadenslänge
GSS	gewogene Schadensschwere
HL	Haltungslänge
HS MD-ST	Hochschule Magdeburg-Stendhal

Abkürzung	Erläuterung
HWRM-RL	Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie
IK	Interventionsklasse
INV	investive (Sanierungs-)Verfahren
KG	Klassengewicht
KVR	Kostenvergleichsrechnung
LWG	Landeswassergesetz
MON	Monitoring
MW	Mischwasser
OfS	Oberflächenschaden
OL	Objektausdehnung (Objektlänge)
PKBW	Projektkostenbarwert
PktS	Punktschaden
rel.	relativ
REN	Renovierung
REP	Reparatur
RND	Restnutzungsdauer
RW	Regenwasser
S	Standsicherheit
SBK	Substanzklasse
SG	Schadensgewicht
SKW	Schadenskonzentrationswert
SL	Schadenslänge
SoB	Schaden ohne Bezug zur baulichen Struktur
StG	Startgewicht
StrS	Streckenschaden
SUB	Substanz

Abkürzung	Erläuterung
SW	Schmutzwasser
SW	Substanzwert
UmfS	Umfangschaden
UWWTD	Kommunalabwasserrichtlinie (Englisch: Urban Waste Water Treatment Directive)
vgl.	vergleiche
WBW	Wiederbeschaffungswert
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
ZEB	Zustandserfassung und -beurteilung
ZK	Zustandsklasse

2 Einführung und Zielsetzung

2.1 Einführung

Die Länge des bundesdeutschen Kanalnetzes betrug 2018 gemäß einer Umfrage der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) ca. 594.000 km (Berger et al., 2020). Der Wiederbeschaffungswert allein der Abwasserkanäle kann aus diesen Untersuchungen mit etwa 1.010 Mrd. € abgeschätzt werden. Hinzu kommen Schacht- und Sonderbauwerke sowie öffentliche und private Anschlussleitungen. Die Kanalisation (hier zu verstehen als Netz von Abwasserkanälen und Schachtbauwerken) ist damit i. d. R. das größte kommunale Anlagenvermögen.

Aus o. g. Umfrage geht ebenfalls hervor, dass etwa 20 % der Abwasserkanäle sehr starke bis mittlere Mängel aufweisen. Diese Netzbereiche wären in den nächsten 10 Jahren zu sanieren; d. h. es sind entweder lokale Schäden durch Reparaturen zu beheben oder aber die gesamte Kanalhaltung ist investiv mittels Renovation oder Erneuerung zu sanieren.

Der Zustand der Entwässerungssysteme in Deutschland ist nahezu flächendeckend durch optische Inspektion erfasst. Dabei werden verschiedene Schäden, wie

- Risse in Längs- oder Querrichtung sowie Rohrbrüche bzw. Einstürze,
- Lageabweichungen an den Rohrverbindungen,
- Abflusshindernisse, wie bspw. Ablagerungen oder Wurzeleinwüchse,
- [Beton]korrosion oder
- mechanischer Verschleiß z. B. durch Geschiebetransport

sowie deren Schadenscharakteristik (z. B. Rissbreite oder Ausmaß einer Korrosion) kodiert und hinsichtlich Sanierungsdringlichkeit klassifiziert. Hierauf aufbauend werden die Zustandsklassen von Abwasserkanälen bzw. Schächten bestimmt. Die Methodik der Zustandsbeschreibung und Zustandsklassifizierung ist über Normen und technische Regelwerke wie z. B. DIN EN 13508-2 (DIN EN, 2011) bzw. DWA-M 149-2 (DWA, 2013b) oder DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) standardisiert.

Bestimmend für die Zustandsklasse ist dabei im Sinne einer Sanierungspriorität der größte Einzel Schaden, sodass über die Zustandsklasse der ggf. vorhandene Handlungsbedarf objektscharf festgestellt werden kann. Der Fokus liegt dabei auf der Beurteilung der gegenwärtigen Funktionserfüllung. Aussagen zur verbleibenden Kanalsubstanz und damit zur zukünftigen Funktionserfüllung sowie daraus ableitbare Schlussfolgerungen in Hinblick auf Restnutzungsdauer, Abnutzungsvorrat, erforderliche Sanierungsart (Reparatur, Renovierung oder Erneuerung), Sanierungsaufwand oder Sanierungskosten sind systembedingt aus der Zustandsklasse nicht ableitbar. Hierzu bedarf es im Grundsatz ingenieurtechnischer Gutachten für das einzelne Entwässerungsobjekt in Form einer Sanierungsplanung.

Vor dem Hintergrund der Netzlängen, deren wirtschaftlicher Bedeutung (sowie der ökologischen und gesellschaftlichen Relevanz funktionstüchtiger Abwasserentsorgungssysteme) und des aktuellen Zustands der Kanalisationen sind viele Netzbetreiber bestrebt, zukünftig nicht nur reaktiv¹⁰ zu handeln, sondern zum Zwecke des Erhalts der Bausubstanz vorausschauend und damit auch unter Berücksichtigung einer prognostizierten Zustandsentwicklung der jeweiligen Netze bzw. Netzelemente Budgets zu planen und baulich umzusetzen. Die Verwendung von Prognosemodellen auf der Grundlage eines baulichen Substanzwertes ermöglicht dabei eine wesentlich effizientere Sanierungsplanung von Netzen als die derzeit in aller Regel vorgenommene reaktive Sanierungsplanung.

Wesentliche Grundlage für die Sanierungsplanung ist neben dem Zeitpunkt der Reinvestition (Erneuerung der bestehenden Haltung) die Wahl von Sanierungszeitpunkt sowie Sanierungsverfahren und damit die Bestimmung der technischen und der kalkulatorischen (Rest-)Nutzungsdauer von Kanälen. Während die kalkulatorische Nutzungsdauer die Zeit beschreibt, in der Investitionen abgeschrieben werden, beschreibt die technische Nutzungsdauer, wie lange das Bauteil tatsächlich seinen technischen Zweck erfüllt. DIN 31051 (DIN, 2019) führt hierzu den Begriff des Abnutzungsvorrats ein. (vgl. Glossar, Kap. 1.1)

Der Abnutzungsvorrat wird über die technische Nutzungsdauer abgebaut, bis eine (festzulegende!) Abnutzungsgrenze erreicht ist und das Bauteil ausfällt (vgl. Bild 2).

Bei Immobilien bestimmt sich der Abnutzungsvorrat aus der Baustoff- und Ausführungsqualität der Bauelemente. Die Materialwahl, -kombination, -güte, -verträglichkeit sowie -verarbeitung haben somit hohen Einfluss auf den Abnutzungsvorrat und den Grad der Abnutzung (vgl. auch Schönfelder, 2012). Der Abnutzungsvorrat kann durch Instandsetzung¹¹ oder Schwachstellenbeseitigung wieder aufgebaut oder verbessert werden.

¹⁰ Reaktive Sanierungsstrategie: Sanierungsbudgets werden festgelegt und Haltungen entsprechend ihrer Priorität saniert; die sich daraus ergebene Zustandsentwicklung kann lediglich rückblickend analysiert werden. Erst dann können ggf. erforderliche Budgetanpassungen vorgenommen werden.

¹¹ Festzuhalten ist in diesem Zusammenhang, dass der Begriff der *Instandsetzung* bei Entwässerungssystemen ungebräuchlich ist. Vielmehr werden unter dem Begriff *Sanierung* gem. DIN EN 752 (DIN EN, 2017) Maßnahmen zur Wiederherstellung oder Verbesserung vorhandener Entwässerungssysteme in Form von Erneuerung, Renovierung oder Reparatur verstanden.

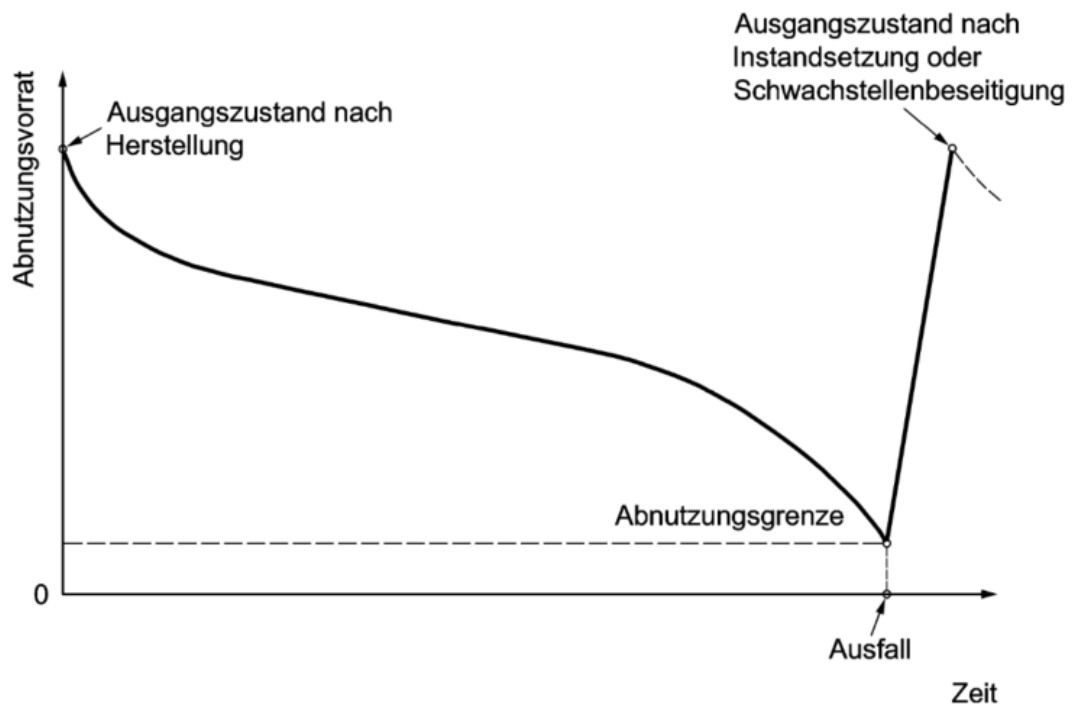


Bild 2: Abbau des Abnutzungsvorrats über die Nutzungsdauer gem. DIN 31051 (DIN, 2019)¹²

2.2 Beurteilung der (Bau-)Substanz von Entwässerungssystemen gem. Recht und Regelwerk

Die Hauptaufgaben des Entwässerungssystems¹³ sind die sichere und überflutungsfreie Entwässerung sowie die Vermeidung bzw. Reduzierung niederschlagsbedingter Gewässerbelastungen (vgl. DWA-A 100 (DWA, 2006a)). Im Sinne einer „integralen“, d. h. ganzheitlichen Betrachtungsweise in der Siedlungsentwässerung sind „Verzahnungen zu benachbarten Aufgabengebieten und Teilsystemen (Einzugsgebiet, Grundstücksentwässerung, Kläranlage, oberirdische Gewässer, Grundwasser)“ mit zu betrachten (DWA, 2006a).

Die wichtigsten Rechtsnormen auf EU-Ebene für die Siedlungsentwässerung sind die Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL, 2000), die Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (EG-HWRM-RL, 2007) und die Kommunalabwasserrichtlinie (EG-UWWTD, 1991). Die EG-WRRL wird durch das Wasserhaushaltsgesetz (WHG, 2009) in Bundesrecht umgesetzt. Dieses wird auf Länderebene durch die jeweiligen Landeswassergesetze (LWG) sowie spezielle Verordnungen und Verwaltungsvorschriften (z. B. zur Eigenüberwachung von Kanalisationsanlagen) ergänzt und konkretisiert (DWA-A 143-14 (DWA, 2017)). Für den Vollzug der in Deutschland gültigen Rechtsnormen wird in Verwaltungsvorschriften

¹² Die Abbaukurve des Abnutzungsvorrates ist nur ein Beispiel der möglichen Verläufe.

¹³ (Teil-)Einzugsgebiete, Kanäle und baulichen Anlagen (DIN-A 100 (DWA, 2006) und DIN EN 752 (DIN EN, 2017)).

(behördenintern), Entwässerungssatzungen und Bescheiden auf Konkretisierungshilfen in Form von technischen Normen (z. B. DIN-Norm) oder technischen Regelungen von Fachverbänden (z. B. DWA-Regelwerk) hingewiesen, die dadurch obligat berücksichtigt werden müssen.

Den Rahmen für Planung, Bau, Unterhalt, Betrieb und Sanierung (Instandhaltung) von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden gibt die Europäische Norm EN 752 vor (DIN EN, 2017).

„Sie gilt für Entwässerungssysteme von dem Punkt an, an dem das Abwasser das Gebäude bzw. die Dachentwässerung verlässt oder in einen Straßenablauf fließt, bis zu dem Punkt, an dem das Abwasser in eine Kläranlage oder ein aufnehmendes Gewässer eingeleitet wird. Abwasserleitungen und -kanäle unterhalb von Gebäuden sind hierbei eingeschlossen, solange sie nicht Bestandteil der Gebäudeentwässerung sind.“ (DIN EN 752 (DIN EN, 2017))

DIN EN 752 gibt zum einen Ziele bezogen auf das technische System¹⁴ bzw. das Management des technischen Systems und zum anderen Funktionalanforderungen zum Erreichen dieser Ziele sowie Grundsätze für Strategien und Vorgehensweisen zum Kanalmanagement vor. Sie wird unterstützt durch Detailnormen zu *„Untersuchung & Beurteilung“*, *„Planung & Bau“* oder *„Management & Überwachung“* von Entwässerungssystemen sowie ergänzende Merk- und Arbeitsblätter der DWA. (vgl. DIN EN 752 (DIN EN, 2017))

Grundlage für den Betrieb und die Sanierung des Entwässerungssystems bildet das integrale Siedlungsentwässerungsmanagement (auch integrales Kanalmanagement). Es bezeichnet den Prozess der Berücksichtigung der Anforderungen an ein Entwässerungssystem bzw. an seine Systemkomponenten sowie der Planung und Umsetzung von Maßnahmen zur Erfüllung dieser Anforderungen (DIN EN 752 (DIN EN, 2017)). Das integrale Kanalmanagement gliedert sich in folgende Abschnitte:

- *„Untersuchung aller Leistungsaspekte des Entwässerungssystems in angemessenem Umfang;*
- *Beurteilung der Leistungsfähigkeit durch Vergleich mit den Leistungsanforderungen einschließlich des Erkennens von Ursachen für jegliche beobachtete Leistungsmängel;*
- *Planung - Entwicklung des Plans der durchzuführenden Maßnahmen;*
- *Umsetzung des Plans.“*

Grundlage für die Bestimmung der Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen bilden die in der DIN EN 752 (DIN EN, 2017) festgelegten Ziele *„Öffentliche Gesundheit und Sicherheit“*, *„Gesundheit und Sicherheit des Betriebspersonals“*, *„Umweltschutz“* und *„Nachhaltige Entwicklung“*. Zum Erreichen dieser Ziele werden Funktionalanforderungen festgelegt. Für jede Funktionalanforderung müssen messbare Leistungsanforderungen abgeleitet werden; dabei sind auch

¹⁴ System von Abwasserleitungen und -kanälen, einschließlich der Mischwasserüberläufe, Pumpenanlagen und weiterer Systemkomponenten (DIN EN 752 (DIN EN, 2017)).

rechtliche Anforderungen, öffentliche Erwartungen und finanzielle Zwänge zu berücksichtigen. Bei wesentlichen Eingriffen in das System sollen die Leistungsanforderungen überprüft und ggf. aktualisiert werden, wobei die Leistungsanforderungen an ein saniertes System prinzipiell denen an ein neues System entsprechen sollen (DIN EN 752 (DIN EN, 2017)). Vorgaben werden zu folgenden Aspekten aufgeführt:

- Umweltschutzbezogene Leistungsanforderungen,
- Hydraulikbezogene Leistungsanforderungen,
- Bauliche Anforderungen,
- Anforderungen an den Betrieb (bezogen auf Betriebsabläufe).

Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit eines Systems bzgl. der Leistungsanforderungen erfolgt die Untersuchung der Abwasserkanäle und Schächte gemäß folgender einzelner Arbeitsschritte (DIN EN 752 (DIN EN, 2017)):

- Überprüfung der Informationen zur Leistungsfähigkeit,
- Festlegung des Untersuchungsrahmens,
- Überprüfung vorhandener Informationen,
- Aktualisierung der Bestandsdaten.

Im ersten Arbeitsschritt – der Untersuchung von bestehenden Entwässerungssystemen - wird die Leistungsfähigkeit anhand vorhandener Informationen geprüft. Dies erfolgt über Berichte von Störfällen, wie beispielsweise Aufzeichnungen über Überflutungen, Verstopfungen, Zusammenbrüche von Abwasserkanälen etc. Durch diesen ersten Arbeitsschritt kann im Folgenden festgelegt werden, ob und in welchem Umfang Untersuchungen bezüglich umweltrelevanter, hydraulischer, baulicher und betrieblicher Aspekte notwendig sind. Nach Festlegung des Umfangs (vgl. Kap. 3.2.1.1) werden die vorhandenen Informationen geprüft und ggf. durch Inspektionen (siehe Kap. 3.2.1.2) ergänzt. (vgl. DIN EN 752 (DIN EN, 2017))

Der Prozess der Zustandserfassung und -beurteilung (ZEB) soll die notwendigen objektbezogenen Schadensinformationen liefern, um innerhalb des Lebenszyklus der Komponenten eines Entwässerungssystems zielgerichtete Maßnahmen planen und ausführen zu können, damit die umweltrelevante, bauliche, betriebliche und hydraulische Leistungsfähigkeit unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen und technischen Möglichkeiten aufrechterhalten wird (vgl. (DIN EN 752 (DIN EN, 2017), DWA-M 149-1 (DWA, 2018) sowie Kap. 3.2.1.2).

Die Substanzbeurteilung im Sinne des Vorhabens *SubKanS* ist einzureihen in die grundlegende Aktivität nach DIN EN 752 (DIN EN, 2017) „*Beurteilung der Leistungsfähigkeit durch Vergleich mit den Leistungsanforderungen einschließlich des Erkennens von Ursachen für jegliche beobachtete Leistungsmängel*“. Diese basiert auf einer vorangehenden Untersuchung und erfolgt in folgenden Schritten:

- Beurteilung der Ergebnisse der Untersuchung (baulich, betrieblich, etc.),
- Vergleich mit Leistungsanforderungen,
- Ermittlung der Mängel (baulich, betrieblich etc.),
- Ermittlung der Ursachen für mangelhafte Leistungsfähigkeit.

Jeder Kanalzustand beeinflusst die Reinhaltung des Grundwassers, den Schutz des Bodens, die Betriebssicherheit oder die Standsicherheit der baulichen Anlagen. Zurzeit ist eine exakte Quantifizierung von Risiken eines baulichen Zustands nicht möglich, sodass Beurteilungsansätze vielfach auf Erfahrungen und Abschätzungen basieren (DWA-M 149-3 (DWA, 2015a)): *„Erkennbare bauliche und betriebliche Zustände, die nicht den a. a. R. d. T. entsprechen, müssen gem. DWA-M 149-1 (DWA, 2018) in angemessenen Zeiträumen beseitigt werden.“*

Dabei kommt der Betriebssicherheit des Kanalnetzes und dem Umweltschutz eine besondere Bedeutung zu. Bei der konkreten Gefahr einer Grundwasserverschmutzung muss die Sanierung aufgrund der Abwasserbeseitigungspflicht unverzüglich erfolgen. Die Verschmutzung von Grundwasser und Boden sowie der Tatbestand der umweltgefährdenden Abfallbeseitigung stellen eine Straftat gegen die Umwelt gemäß §§ 324, 324 a bzw. 326 StGB dar (StGB, 1998).

Allgemeine bauteilspezifische Anforderungen für Abwasserleitungen und -kanäle werden zudem durch DIN EN 476 (DIN EN, 2020), DIN EN 13380 (DIN EN, 2001) und DIN EN 14457 (DIN EN, 2004) festgelegt (vgl. DIN EN 752 (DIN EN, 2017)).

Die Ergebnisse der Leistungsbeurteilung hinsichtlich o. g. Aspekte sind gem. DWA-M 149-1 (DWA, 2018) so zusammenzufassen, dass die Leistungsfähigkeit des Systems und seiner Systemkomponenten mit den Leistungsanforderungen verglichen werden kann (DIN EN 752 (DIN EN, 2017)). Für die Untersuchung und Beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden ist in diesem Zusammenhang die (Detail-)Normenreihe DIN EN 13508 (DIN EN, 2011 und DIN EN, 2013) maßgeblich.

Für die Zustandserfassung und -beurteilung aus baulicher, betrieblicher und umweltrelevanter Sicht wird die Norm DIN EN 13508 (DIN EN, 2011 und DIN EN, 2013) durch die Merkblattreihe DWA-M 149 in Hinblick auf die Sanierungspriorität weiter konkretisiert (siehe Kap. 3.2.1).

Ein (DWA-)Regelwerk, welches einen Standard für die Substanzklassifizierung definiert, existiert bislang nicht. Hilfestellung liefert bisher lediglich der DWA-Themenband T 4/2012 "Leitfaden zur strategischen Sanierungsplanung von Entwässerungssystem außerhalb von Gebäuden" (DWA, 2012) (siehe Kap. 3.2.2.1).

2.3 Gesamtziel des Vorhabens

Aus der oben beschriebenen Ausgangssituation ergibt sich der Bedarf nach einem einheitlichen Verfahren zur baulichen Substanzklassifizierung als Untersuchungskern des Vorhabens *SubKanS*. Für die darauf aufbauende Zukunftsperspektive eines Substanzerhalts der Netze ist als Grundvoraussetzung ein einheitliches Verständnis der Substanzklassifizierung herbeizuführen.

Die vorrangige Zielstellung des Vorhabens ist somit die Entwicklung eines einheitlichen und praxisrelevanten Verfahrens zur Beschreibung und Klassifizierung der baulichen Substanz als Grundlage für die Ermittlung des vorhandenen Abnutzungsvorrates sowie ergänzend die Ableitung einer Zuordnung von Sanierungshauptverfahren (Erneuerung, Renovierung oder Reparatur) für geschädigte Abwasserkanäle und Schächte. Durch Offenlegung und Transparenz der Berechnungsgrundlagen soll das zu entwickelnde Standardverfahren allen Betreibern von Kanalnetzen und Anwendern als Referenz dienen. Ein solcher Standard soll die strategische Sanierungsplanung erleichtern, indem er eine einheitliche Grundlage für die Ermittlung der technischen Restnutzungsdauer (RND) bzw. weitere Prognoserechnungen legt. Er ist ferner zwingende Voraussetzung für die Ermittlung des im Arbeitsblatt DWA-A 143-14 „Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 14: Entwicklung einer Sanierungsstrategie“ formulierten baulichen Substanzwertes von Abwasserkanälen und Schächten bzw. ganzen Netzen (vgl. DWA-A 143-14 (DWA, 2017)).

Ziel ist, dass das entwickelte Verfahren zur Substanzklassifizierung folgende Eigenschaften besitzt:

- Methodik wie auch Ergebnis müssen den Anforderungen von Betreibern und Anwendern an die Praxistauglichkeit genügen. U. a. muss die Berechnungsgrundlage der Substanzklassifizierung den allgemein verfügbaren Daten von Betreibern und Anwendern Rechnung tragen.
- Aus Gründen der Akzeptanz soll die Methodik zur Substanzklassifizierung größtmögliche Analogien zur Methodik der Zustandsklassifizierung gem. DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) aufweisen. Auch soll die Substanzbeurteilung auf der Schadenskodierung nach DIN EN 13508-2 (DIN EN, 2011) bzw. DWA-M 149-2 (DWA, 2013b) basieren.
- Die Datenqualität der verwendeten Daten ist bei der Berechnungsmethodik zu berücksichtigen. Die abgeleitete Berechnungsmethode sollte entsprechend robust gegenüber Schwankungen in der Datenqualität sein.
- Aus der Substanzklasse soll ableitbar sein, mit welchen Sanierungs-(haupt-)verfahren eine Kanalhaltung bzw. ein Schacht technisch und wirtschaftlich saniert werden kann und welcher Sanierungsaufwand zu erwarten ist. Auf dieser Grundlage sollen Budgeteinplanungen z. B. für die Aufstellung von Abwasserbeseitigungskonzepten ermöglicht werden.
- Die Methodik soll so aufgebaut werden, dass sie zur Umsetzung einer Mehrspartenstrategie mit entsprechender Anpassung auf den gesamten Straßenraum übertragen werden kann.

2.4 Vorgehen und Methodik

Das Vorgehen zur Ableitung einer standardisierten Substanzklassifizierung ist in Bild 3 grob skizziert.

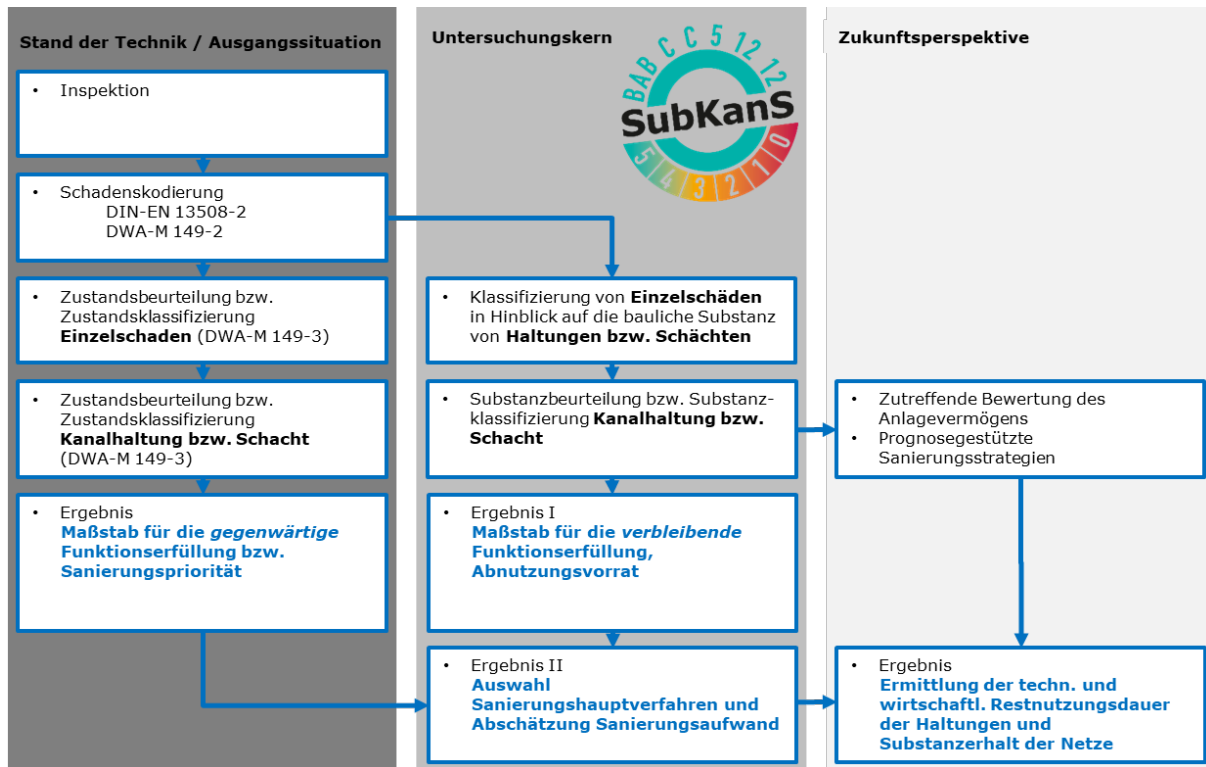


Bild 3: Untersuchungsgegenstand *SubKans* im Kontext von Stand der Technik und Zukunftsperspektive (eigene Darstellung)

In einem ersten Schritt wurden vergleichbare Beurteilungssysteme in der Sanierungsplanung von Infrastrukturelementen auf nationaler und internationaler Ebene recherchiert (Kap. 3). Die Definition der baulichen Substanz in Zusammenhang mit der Abnutzung, dem Abnutzungsvorrat, der Substanzklasse, etc. wurde anhand der Rechercheergebnisse erörtert und bei der Entwicklung des eigenen Ansatzes zur Substanzklassifizierung berücksichtigt. Anforderungen an die Substanzklassifizierung von Abwasserkanälen und Schächten wurden definiert.

Als Grundlage für die Substanzklassifizierung dienen die Stamm- und Zustandsdaten der Haltungen und Schächte. Die bestehende Klassifizierung der Einzelzustände gemäß der Methodik nach DWA-M 149-2 (DWA, 2013b) und DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) bildet dabei die Grundlage für die Substanzklassifizierungen. Der bestehende Katalog mit den Schadensbildern der einzelnen Feststellungen wurde auf die Aussagekraft und Verwertbarkeit in Hinblick auf die bauliche Substanz untersucht und erforderliche Anpassungen vorgenommen. Dies erfolgte sowohl für die Haltungen (Kap. 5.2) als auch für die Schächte (Kap. 11.2).

Anhand eines ersten „kleinen Datensatzes“ (105 Kanalhaltungen) wurde für die Entwicklung eines Rechenalgorithmus zur Substanzklassifizierung von den beteiligten Modellanbietern eine erste Auswertung angefertigt. Diese diente insbesondere der Entwicklung eines gemeinsamen Verständnisses von Abnutzung, Abnutzungsvorrat und baulicher Substanz. Auch wurde erforderliche Daten(formate) und Schnittstellen für die weiteren Untersuchungen erarbeitet und getestet. Anhand des kleinen Datensatzes wurde ein erster Rechenalgorithmus zur Substanzklassifizierung gebildet und erste Kalibrierungspunkte diskutiert. Gleichzeitig wurde geprüft, welche weiteren Informationen (z. B. Rohrmaterial, Nennweite usw.) bei der Substanzklassifizierung zu berücksichtigen sind.

Es galt zu vermeiden, dass den Schadensbildern, die über mehrere Feststellungen erfasst werden, allein aus diesem Grund tendenziell eine höhere Relevanz in Hinblick auf die Substanzbeeinträchtigung zugeordnet wird, als jenen Schadensbildern, die durch nur eine Feststellung vollumfänglich beschrieben sind. Auch ist insbesondere für sich überlagernde Streckenschäden festzulegen, ob mehrere Feststellungen zu einem (z.B. Längsriss oben und unten) oder zu verschiedenen Schadensbildern (z.B. Längsriss und verfestigte Ablagerungen) gehören. Daher wurde Überlagerungsregeln entwickelt, wie die einzelnen Feststellungen sachgerecht zu Schadensbildern zusammengeführt werden können.

Im Projektverlauf wurde der kleine Datensatz erweitert, um eine repräsentative Datengrundlage zu schaffen („großer Datensatz“ mit 100.532 Kanalhaltungen (vgl. Kap. 6.4)). Die Stamm- und Zustandsdaten wurden statistisch ausgewertet und auf ihre Aussagekraft hinsichtlich Repräsentativität und Vielfalt in den Schadensbildern geprüft. Die Daten aus dem zusammengestellten Projektdatensatz wurden durch die im Projekt vertretenen Modellanbieter ausgewertet und der entwickelte *SubKanS*-Abnutzungsalgorithmus anhand der Modellergebnisse kalibriert. Weiter wurde eine Sensitivitätsanalyse durch Variation festgelegter Parameter (wie z. B. Gewichtung, Einflusslänge usw.) am Datensatz durchgeführt. Durch die Parameterstudie konnte gewährleistet werden, dass in der Praxis auftretende mögliche Datenvarianten (bspw. Schadenkombinationen) bei der Entwicklung des Rechenalgorithmus bzw. bei der Parameterfestlegung hinreichend berücksichtigt werden konnten.

Parallel zur Entwicklung des Rechenalgorithmus und Parameterfestlegung wurde die Zuordnung der Sanierungsempfehlung (bzw. Sanierungstendenz) und des Sanierungsaufwandes erarbeitet. Für die Ermittlung des Sanierungsaufwandes wurden Standardwerte aus der KVR-Ermittlung (LAWA et al., 2012) für die einzelnen Sanierungsverfahren ausgearbeitet.

Die Substanzklassifizierung von Abwasserschächten sollte analog zu den Abwasserkanälen entwickelt werden. Dazu wurde ein Datensatz mit entsprechenden Stamm- und Zustandsdaten von Schächten verschiedener Betreiber erstellt. Die Relevanz des Einzelschadens auf die Substanzklassifizierung auf Grundlage des Katalog aus der DIN 13508-2 (DIN EN, 2011) wurde analog auch für die Schächte untersucht. Mit Erkenntnis während der Projektdurchführung, dass detailliertere Betrachtungen notwendig sind, wurden die abschließenden Klassifizierungsarbeiten in ein Folgevorhaben ausgelagert.

3 Stand von Wissenschaft und Praxis in Bezug auf die Substanzklassifizierung bzw. Substanzbewertung relevanter Assets

3.1 Einleitung

Als Grundlage für die Entwicklung eines einheitlichen und praxisrelevanten Verfahrens zur Beschreibung und Klassifizierung der baulichen Substanz von Abwasserkanälen und Schächten und insbesondere als Grundlage für die Definition von Anforderungen an das zu entwickelnde Verfahren zur Substanzklassifizierung (vgl. Kap. 4) werden in diesem Kapitel 3 die Ergebnisse einer (inter)nationalen Recherche in Bezug auf die Substanzklassifizierung bzw. Substanzbewertung von Vermögensgegenständen zusammengestellt.

National sowie international existieren bereits eine Reihe marktrelevanter Verfahren zur Substanzklassifizierung von Abwasserkanälen (siehe Kap. 3.2.1). Diese unterscheiden sich sowohl in der Herangehensweise als auch im Verständnis der baulichen Substanz in Zusammenhang mit der Abnutzung oder auch des Abnutzungsvorrats. Im Rahmen von *SubKanS* wurden deshalb Begriffsdefinitionen ergänzt (siehe Kap. 1.1), ein einheitliches Verständnis der Substanzbeurteilung bzw. -klassifizierung entwickelt und die existierenden Modelle vor diesem Hintergrund eingeordnet.

Auf internationaler Ebene ist die Durchdringung der baulichen Substanzbeurteilung noch gering. Daher baut die internationale Recherche nicht rein auf einer identischen oder substitutiven Verwendung von Fachbegriffen auf. Vielmehr werden Methoden zur Klassifizierung von Einzelschäden in Hinblick auf die bauliche Substanz sowie zur Substanzbeurteilung betrachtet. Mit Blick auf die weitere Nutzung wurden auch bestehende Ansätze zur automatisierten Kostenermittlung und Maßnahmenbildung in Zusammenhang mit Substanzerhalt recherchiert.

Um ein umfassendes Bild von den bestehenden Verfahren und Möglichkeiten einer technischen Substanzbeurteilung zu erhalten, wurden neben Kanalisationen weitere technische Infrastrukturen betrachtet. Die Sicherstellung der Substanz solcher Assets ist auf Langlebigkeit und Funktionalität ausgerichtet; viele technische Infrastrukturen (Elemente der Ver- und Entsorgungssysteme, Tief- und Hochbau) dienen der Daseinsvorsorge. Deren Planung, Erstellung und Instandhaltung erfolgen in der Regel durch öffentlich-rechtliche Einrichtungen, sodass grundsätzliche Analogien zu Abwasseranlagen hinsichtlich der Untersuchung und Beurteilung bestehen (vgl. auch Tabelle 4).

Resultierend aus den Möglichkeiten der Inspektion bestehen in den verschiedenen Bereichen unterschiedliche Kenntnisse über das jeweilige Netz. Bei Entwässerungssystemen ist eine *inspektionsbasierte* Zustands- und Substanzbeurteilung möglich; ebenso im Tief- und Hochbau. In anderen Bereichen, wie bspw. den Bereichen der Versorgungsnetze, dem Maschinenbau und der Elektrotechnik sind nur *statistische (risikobasierte)* Bewertungsmethoden (Bewertung über

Ausfallraten/Versagenswahrscheinlichkeiten) möglich oder üblich. In den Infrastrukturbereichen Stromnetz, Maschinenbau und Elektrotechnik werden Beurteilungsverfahren speziell auf Anlagenkomponenten bezogen.

Tabelle 4: Arten der Zustandserfassung und -beurteilung in unterschiedlichen Netzsparten und (Infrastruktur-)Bereichen

Netzsparte bzw. Bereich	Art der Erfassung des baulichen/technischen Zustands (Regelverfahren)	Art der Zustandsbeurteilung (Regelverfahren)
Kanalisation (Misch-, Schmutz- oder Regenwasser)	direkt über Inspektion	zustandsbasiert
Wärmenetz	teilweise direkt über Inspektion, größtenteils indirekt ¹⁵	risikobasiert
Gasverteilnetz (Erdgas/Biogas)	indirekt ¹⁵	risikobasiert
Wasserversorgungsnetz (Trink- bzw. Brauchwasser)	indirekt ¹⁵	risikobasiert
Kommunikationsnetze (Postkabel/-anlagen, Fernmelde- und Signalkabel, Nachrichtenkabel für Polizei und Feuerwehr)	indirekt ¹⁵	risikobasiert
Stromnetz	indirekt ¹⁵	risikobasiert
Straße	direkt über Inspektion	zustandsbasiert
Verkehrswasserbauwerke	direkt über Inspektion	zustandsbasiert
Immobilien (Wohn- und Geschäftsgebäude)	direkt über Inspektion	zustandsbasiert
Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen gem. DIN 1076 (1999)	direkt über Inspektion	zustandsbasiert
Maschinenbau	direkt über Inspektion sowie indirekt ¹⁵	risikobasiert

¹⁵ Die „indirekte Zustandserfassung“ erfolgt i. d. R. über Extrapolation von Auswertungen zum Ausfall von Systemelementen in Verbindung zu Alter und zustandsbeeinflussenden bzw. alterungsbeeinflussenden Parametern wie Material, statische/dynamische Belastungen usw.

Im Folgenden wird deshalb der Fokus auf inspektionsbasierte Ansätze (und damit auf die in Tabelle 4 grün hinterlegten Bereiche) zur Substanzbeurteilung gelegt, da diese für die konkrete Fragestellung in *SubKanS* eine höhere Relevanz haben.

In Kapitel 3.2 werden die Methoden der Zustandsbeurteilung bzw. -klassifizierung von Abwasserkanälen und Schächten zur Ermittlung des baulichen/betrieblichen Sanierungsbedarfs mit dem Ziel untersucht, für die Entwicklung der standardisierten Substanzklassifizierung notwendige Arbeitsschritte bzw. Berechnungsgrundlagen herauszuarbeiten.

Ab Kapitel 3.3 werden für die in Tabelle 4 identifizierten weiteren Infrastrukturbereiche Art der Zustandserfassung sowie Methoden der Zustands- und Substanzbeurteilung erläutert und hinsichtlich der Anwendbarkeit für die Entwicklung einer standardisierten Substanzklassifizierung von Kanalisationen beurteilt.

Aus den Rechercheergebnissen werden abschließend in Kapitel 4 Anforderungen an das zu entwickelnde Verfahren zur Substanzbeurteilung und -klassifizierung von Abwasserkanälen und Schächten abgeleitet.

3.2 Entwässerungssysteme

3.2.1 Technisches Regelwerk zur Zustandserfassung, Zustandsbeschreibung und Zustandsbeurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden

3.2.1.1 Systembeschreibung gem. DWA-M 149-1

Die Vorgaben der DIN EN 752 (DIN EN, 2017) zur Untersuchung von Entwässerungssystemen werden durch das Merkblatt DWA-M 149-1 „Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 1: Grundlagen“ (DWA, 2018) konkretisiert. In Bild 4 werden Prozessdefinition und -ablauf der Zustandserfassung und -beurteilung dargestellt.

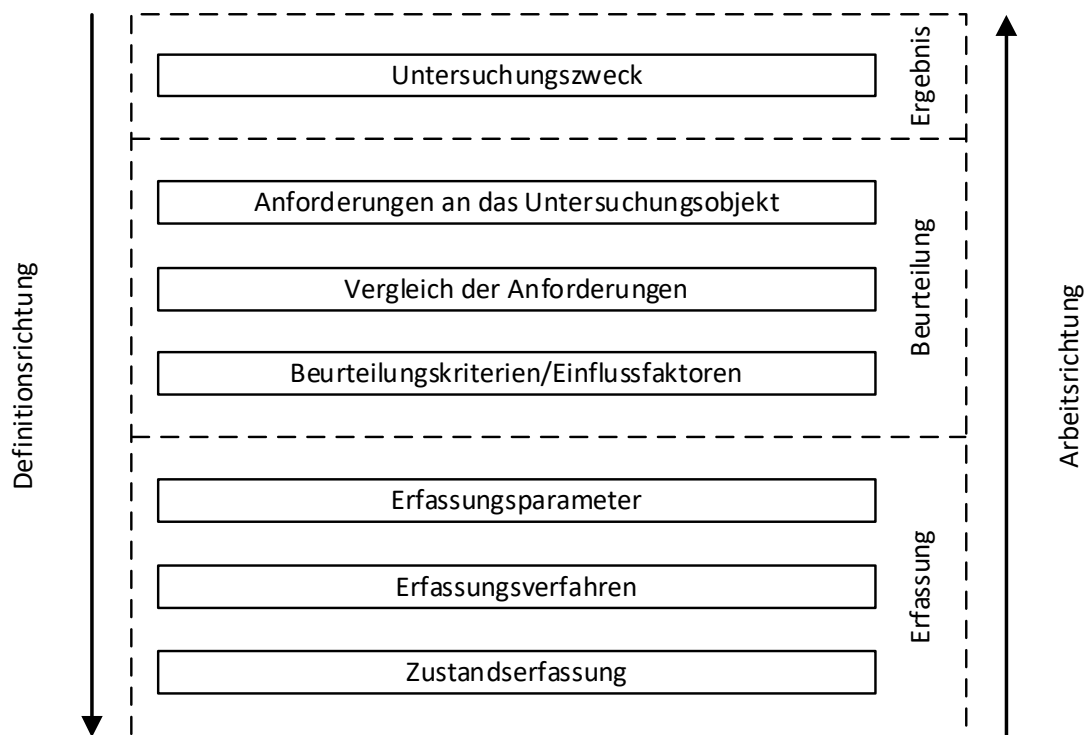


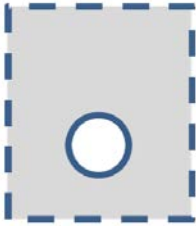

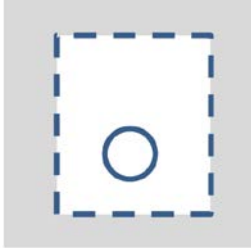
Bild 4: Prozessdefinition und -ablauf der Zustandserfassung/-beurteilung gemäß DWA-M 149-1 (DWA, 2018)

Der Prozess wird dabei entgegengesetzt zur Arbeitsrichtung definiert. Zuerst wird der Untersuchungsrahmen festgelegt. Dieser beinhaltet das zu betrachtende Untersuchungsgebiet, die Untersuchungsobjekte und den Detaillierungsgrad. Letzterer wird durch den Untersuchungszweck bestimmt. Diese ersten Festlegungen bestimmen das Untersuchungsverfahren, die zu dokumentierenden Feststellungen bzw. den Umfang der Datengrundlage (DWA-M 149-1 (DWA, 2018)). In *SubKanS* stellen Kanalhaltungen und Schächte die Untersuchungsobjekte dar. Tabelle 5 führt für die Bereiche der baulichen, betrieblichen und umweltschutzrelevanten Leistungsanforderungen an Entwässerungssysteme und deren Systemelemente beispielhafte Zwecke der Zustandserfassung und –beurteilung auf. Als Basis für die Substanzbeurteilung eignen sich Untersuchungen zum Zweck der Bedarfsplanung zur Sanierung (vgl. DWA-M 149-1: „Ziel der Bedarfsplanung ist die Prognose des erforderlichen Mittelbedarfs auf Basis der notwendigen Maßnahmen entsprechend dem Handlungsbedarf (DWA, 2018)). Bezogen auf den Zweck der Untersuchung werden basierend auf den gültigen Rechtsnormen und technischen Regelungen konkrete (bauliche / betriebliche / umweltschutzrelevante / hydraulische) Leistungsanforderungen an die Untersuchungsobjekte ermittelt. Hinsichtlich der Substanzbeurteilung sind dies Standsicherheit (S), Dichtheit (D) und Betriebssicherheit (B). Für den Vergleich der Ergebnisse der Zustandserfassung mit den gestellten Leistungsanforderungen müssen überprüfbare Beurteilungskriterien festgelegt werden. Daraus ergeben sich die Anforderungen an den Prozess der Zustandserfassung, z. B. die Wahl der Inspektionsmethode. Des Weiteren sind Randbedingungen zu ermitteln, die bei der Beurteilung zu berücksichtigen sind. (vgl. DWA-M 149-1 (DWA, 2018))

Abwasserkanäle und -schächte werden gemäß den Festlegungen in DIN EN 1610 bzw. Arbeitsblatt DWA-A 139 (DIN EN, 2015; DWA, 2019) *„als Bauwerke verstanden, bei denen das Zusammenwirken von Bauteilen und Bettung/Verfüllung unter den vorhandenen Umgebungsbedingungen die Grundlage für Stand- und Betriebssicherheit ist (Ingenieurbauwerk). Demzufolge wird hier die äußere Umgrenzung der Leitungszone als Abgrenzung zu Grundwasser und Boden bzw. der Umwelt allgemein definiert.“* (DWA-M 149-1 (DWA, 2018))

Abhängig vom betrachteten Leistungsanforderungsbereich sind bei der Zustandserfassung/-beurteilung unterschiedliche Betrachtungsgegenstände (Systembereiche) abzugrenzen (siehe Tabelle 5). Für die Substanzklassifizierung werden dieselben Systemgrenzen untersucht. Bei der Untersuchung in Bezug auf betriebliche Anforderungen ist nur der Rohrrinnenraum relevant. Dagegen beziehen sich bauliche Anforderungen auf das gesamte Ingenieurbauwerk und umweltschutzrelevante Anforderungen auf den angrenzenden Boden sowie ggf. das Grundwasser.

Tabelle 5: Zweck der Zustandserfassung/-beurteilung (Beispiele) nach DWA-M 149-1 (DWA, 2018), eigene Darstellung)

Zweck der Zustandserfassung/ -beurteilung (ZEB)				
Anforderung	Baulich	Betrieblich	Umwelt	Hydraulik
Beispiele für Zweck der ZEB	<ul style="list-style-type: none"> • Bedarfsplanung • Selbstüberwachung (Erst-/Wiederholungsuntersuchung) • Feststellung Zustandsentwicklung • Bedarfs-/Objektplanung • Bauabnahme • Gewährleistungsabnahme • Maßnahmen Dritter • Schadensprävention z. B. Hohlraumdetektion 	<ul style="list-style-type: none"> • Bedarfsplanung • Selbstüberwachung (Erst-/Wiederholungsuntersuchung) • Funktionskontrolle • Betriebsoptimierung z. B. Reinigungsstrategie • Arbeitssicherheit und Unfallverhütung 	<ul style="list-style-type: none"> • Bedarfsplanung • Gefährdungsanalyse 	Nicht Gegenstand des Merkblatts
	<p>Sonderzweck:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bestandserfassung • Akute Schäden z. B. Einstürze, Versackungen • Beweissicherung 	<p>Sonderzweck:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Emissionen (z. B. Geruch) • Fremdwasser • Betriebsstörungen (z. B. Rückstau wegen Abflusshindernis) 	<p>Sonderzweck:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einzelfallbetrachtung 	
Gegenstand	<p>Betrachtungsgegenstand Ingenieurbauwerk</p> 	<p>Betrachtungsgegenstand Rohrrinnenraum</p> 	<p>Betrachtungsgegenstand Umwelt</p> 	

3.2.1.2 Zustandsbeschreibung gem. DWA-M 149-2

Die Zustandserfassung dient der „Feststellung des baulichen/betrieblichen, hydraulischen und umweltrelevanten Ist-Zustands von Objekten“ (vgl. DWA-M 149-3 (DWA, 2015a)). Als Teil der Untersuchung nach DIN EN 752 (DIN EN, 2017) bildet sie mit der Beschreibung der vorhandenen Schäden die Grundlage für die Zustandsbeurteilung (siehe auch Kap. 2.2). Sie besteht aus den Hauptprozessbestandteilen Inspektion und Schadenskodierung, welche nachfolgend kurz beschrieben werden.

Inspektion

„Zur vollständigen Zustandserfassung ist eine Inspektion des Objekts von innen erforderlich“ (DWA-M 149-2 (DWA, 2013b)).

Unabhängig vom Untersuchungszweck ist in Deutschland das Basisverfahren zur Untersuchung von Abwasserkanälen und Schächten i. d. R. die optische Inspektion (DWA-M 149-1 (DWA, 2018)). Sie erfolgt im Allgemeinen mit ferngesteuerten Kameras und liefert visuelle Daten (Bilder oder Videos) der inneren Oberfläche des inspizierten Objektes (Haltung oder Schacht). Durch die Analyse der Bilder können die Art der Schäden, wie

- Risse in Längs- oder Querrichtung sowie Rohrbrüche, Wurzeleinbrüche bzw. Einstürze,
- Lageabweichungen an den Rohrverbindungen,
- Abflusshindernisse, wie bspw. Ablagerungen oder Wurzeleinwüchse,
- (Beton-)Korrosion oder
- mechanischer Verschleiß z. B. durch Geschiebetransport

sowie deren Schadensausprägungen (z. B. Rissbreite oder Ausmaß einer Korrosion) und Lage ermittelt werden.

In begehbaren Haltungsbereichen sowie bei Schächten und Bauwerken kann die optische Inspektion auch durch direkte Inaugenscheinnahme erfolgen. Die Kanalspiegelung, auch die elektronische Kanalspiegelung, wird nur bei betrieblichen Fragestellungen bzw. Voruntersuchungen eingesetzt (DWA-M 149-2 (DWA, 2013b)).

Regelungen zur optischen Inspektion sind in den Merkblättern DWA-M 149-5 „Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 5: Optische Inspektion“ (DWA, 2010b) sowie DWA-M 149-8 „[...] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen (ZTV) - Optische Inspektion“ (DWA, 2014) aufgeführt. Letztgenanntes legt Anforderungen an die Durchführung der baulichen/betrieblichen Untersuchungen fest.

Die optische Inspektion kann bei Bedarf um weitere Inspektionsverfahren ergänzt werden (DWA-M 149-1 (DWA, 2018)). Bild 5 zeigt, welche Verfahren zur Erfassung des baulichen Zustandes der Objekte eines Entwässerungssystems genutzt werden können. Die Kamerabefahrung als Basisverfahren ist blau umrandet.

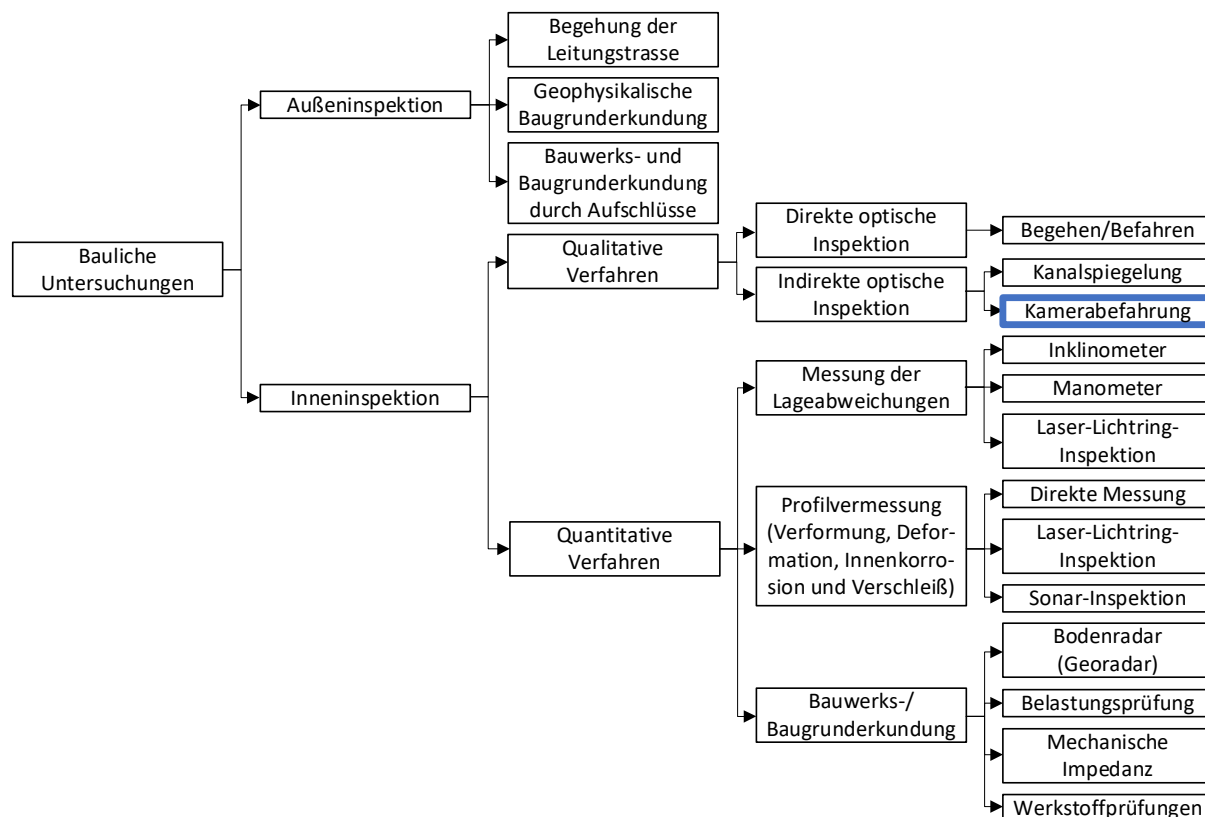


Bild 5: Verfahren zur Untersuchung des baulichen Zustandes von Entwässerungssystemen nach DWA-M 149-1 (DWA, 2018, eigene Darstellung)

Zusammenfassend werden TV-Inspektionen seit Jahrzehnten als Industriestandard für die Erfassung des baulichen Zustandes von Abwasserkanälen und -schächten eingesetzt¹⁶. Ebenfalls können aus der optischen Inneninspektion Aussagen zum betrieblichen Zustand abgeleitet werden (siehe DWA-M 149-1 (DWA, 2018)).

Die Umweltrelevanz von zu sanierenden Abwasserkanälen und Schächten wird wesentlich durch das Zustandsmerkmal „Dichtheit“ geprägt. Schäden, die zu Dichtheitsverlusten führen, bestimmen entsprechend je nach Randbedingungen den Umfang einer möglichen Infiltration oder Exfiltration. Solche Schäden sind insbesondere Risse, Rohrbrüche, Löcher, schadhafte Anschlüsse und Verbindungen

¹⁶ Um den baulichen Zustand des Boden-Rohr-Systems vertiefend beurteilen zu können, können Zusatzverfahren, wie z. B. geophysikalische Verfahren, eingesetzt werden (DWA-M 149-1 (DWA, 2018)).

sowie Wurzeleinwuchs (DWA-M 149-1 (DWA, 2018)). Entsprechend können aus der optischen Inspektion erste Rückschlüsse auf mögliche Undichtigkeiten durch Feststellung entsprechender Schäden gezogen werden: *„Bei der Dichtheitsbeurteilung nach Merkblatt DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) werden neben Art und Ausmaß des Einzelzustands auch Anzahl und Ausdehnung weiterer Schäden berücksichtigt. Über eine Einbeziehung relevanter Randbedingungen ergibt sich abschließend ein Maß für die Dichtheit des jeweiligen Objekts, z. B. ausgedrückt als Zustands- und Bewertungspunkte.“* (DWA, 2018)¹⁷

Schadenskodierung

Bei der Schadenskodierung werden die Feststellungen aus der optischen Inspektion (s. o.) entsprechend der Forderung der DIN EN 752 (DIN EN, 2017) nach festgelegten Regeln kodiert. Dieses Vorgehen soll sicherstellen, dass die Inspektionsergebnisse untereinander vergleichbar sind.

Die Europäische Norm EN 13508-2 beschreibt ein System *„zur objektiven Aufzeichnung von Ergebnissen der optischen Inspektion“* (DIN EN, 2011). Die darin festgelegten Codes sind sprachenunabhängig. Sie dürfen aber auch in eine Liste von konformen nationalen Codes überführt werden, wobei eine Zuordnungstabelle in einem nationalen Anhang der Norm enthalten sein sollte. Basierend auf dieser EN beschreibt das Merkblatt DWA-M 149-2 (DWA, 2013b) die Kodierung der Ergebnisse der optischen Inneninspektion gemäß DWA-M 149-5 (DWA, 2010b), welche die Grundlage für die Zustandsklassifizierung darstellt (vgl. DWA-M 149-1 (DWA, 2018) und DWA-M 149-2 (DWA, 2013b)).

Für Deutschland wird empfohlen DIN EN 13508-2 (DIN EN, 2011) und DWA-M 149-2 (DWA, 2013b) gemeinsam zu verwenden, wobei DWA-M 149-2 eine Konkretisierung der DIN EN-Codes enthält. Die Schäden werden eindeutig nach Art, Lage und Charakteristik kodiert. Hierzu wird jedem Schaden ein Kürzel zugeordnet, welches eine eindeutige Beschreibung und Quantifizierung des Schadens beinhaltet. Der Aufbau des Kodiersystems für Abwasserleitungen und -kanäle gemäß DIN EN 13508-2 (DIN EN, 2011) ist in Tabelle 6 dargestellt.

¹⁷ Ergänzende Verfahren zur Erfassung von Undichtigkeiten werden gem. DWA-M 149-1 (DWA, 2018) in den Merkblättern DWA-M 149-6 (DWA, 2016b) und DWA-M 149-7 (DWA, 2016a) benannt. Zudem können optisch nicht feststellbare Undichtigkeiten über indirekte oder prognostische Ansätze abgeschätzt werden. Diese berücksichtigen z. B. die Auswertung des baulichen Zustands oder die Berücksichtigung bestimmter Merkmale wie Baujahr oder Art der Rohrverbindung als Maßstab für eine potenzielle Undichtheit. Ergänzende Hinweise enthält zudem Arbeitsblatt DWA-A 143-2 (DWA, 2015b).

Tabelle 6: Aufbau des Inspektionsdatenfeldkodes für Abwasserleitungen und -kanäle gem. DIN EN 13508-2 (DIN EN, 2011) bzw. DWA-M 149-2 (DWA, 2013b)

Feldname		Beschreibung
Hauptkode		Bestehend aus 3 Buchstaben: 1. Buchstabe: Zuordnung zu einer Bauelementart (B = Haltung; D = Schacht) 2. Buchstabe: Gruppenzuordnung (A = Hauptkode zur Struktur der Rohrleitungen; B = Hauptkode zum Betrieb der Rohrleitungen; C = Hauptkode zur Bestandsaufnahme; D = weitere Hauptkodes) 3. Buchstabe: spezifische Feststellung
Zusatzinformationen	Charakterisierung 1 Charakterisierung 2	Maximal zwei Kodes, welche das Merkmal näher beschreiben
	Quantifizierung 1 Quantifizierung 2	Maximal zwei Werte, zur Quantifizierung des Merkmals (Einzelwerte oder Bandbreiten möglich)
	Anmerkungen	Text zur Beschreibung von Aspekten der Feststellung, die nicht auf andere Weise beschrieben werden können
	Lage am Umfang 1 Lage am Umfang 2	Maximal zwei Zifferblattreferenz-Nennungen (Uhrzeit) zur Lokalisierung der Feststellung am Umfang
	Lage in Längsrichtung (horizontal oder vertikal), ggf. Kode für Streckenschaden	Entfernung vom Bezugspunkt einschließlich der Möglichkeit zur Aufzeichnung von Feststellungen, die sich über eine größere Länge erstrecken
	Fotoreferenz	Eindeutige Referenzhinweise auf Standfotos oder Computer-Standbilder
	Videoreferenz	Eindeutige Referenzhinweise auf die Stellen im Video

Treten mehrere Merkmale an derselben Stelle auf, ist gem. DIN EN 13508-2 jeder Schaden bzw. jedes Zustandsmerkmal getrennt zu kodieren (DIN EN, 2011).

3.2.1.3 Zustandsklassifizierung gem. DWA-M 149-3

Die Ergebnisse der Zustandserfassung werden bei der Zustandsbeurteilung mit den Anforderungen verglichen und mögliche Differenzen klassifiziert und bewertet (DWA-M 149-1 (DWA, 2018)). Ziel ist die Erstellung einer abgestuften Auflistung des Sanierungsbedarfs (im Sinne einer Dringlichkeit, mit der eine Sanierung zu erfolgen hat) für die betrachteten Kanalobjekte, welche eine Prioritäten orientierte Einteilung und Umsetzung von Sanierungsmaßnahmen ermöglichen soll (DWA-M 149-3 (DWA, 2015a)).

Die Zustandsbeurteilung bezieht sich einzeln auf bauliche/betriebliche, hydraulische oder umweltschutzbezogene Aspekte. Die Festlegung von Sanierungsmaßnahmen muss, aufgrund möglicher Wechselwirkungen der Lösungsansätze, im Rahmen einer Gesamtbetrachtung erfolgen. Dabei sind die Ergebnisse der Beurteilung des baulichen/betrieblichen Zustands (nach DWA-M 149-3 (DWA, 2015a)), der Dichtheit (nach DWA-M 149-6 (DWA, 2016b)), der Umweltrelevanz (nach DWA-M 149-7 (DWA, 2016a)) sowie des hydraulischen Zustands und gegebenenfalls weitergehender Beurteilungen - im Sinne eines integralen Ansatzes - miteinander in Beziehung zu setzen (DWA-M 149-1 (DWA, 2018)).

In Deutschland erfolgt die Beurteilung des baulichen Zustands i. d. R. gemäß DWA-M 149-3 (DWA, 2015a), welches die Kodierung einer vorausgegangenen TV-Inspektion nach DWA-M 149-2 (DWA, 2013b) voraussetzt. Dabei werden auch betriebliche Aspekte betrachtet, die im Rahmen der optischen Inspektion miteingefasst wurden. Das Merkblatt DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) beschreibt das Vorgehen zur baulichen/betrieblichen Zustandsklassifizierung und -bewertung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden im Rahmen des Gesamtprozesses der Sanierung. In einem allgemeinen Teil werden die Anforderungen an die Zustandsklassifizierung und -bewertung - unabhängig von möglichen Modellstrukturen - in Form von wesentlichen Voraussetzungen, Grundlagen, Arbeitsschritten und Ergebnisdarstellungen benannt. In einem informativen Anhang wird beispielhaft ein mögliches Beurteilungsmodell, das die Anforderungen des allgemeinen Teils erfüllt, dargestellt (DWA, 2015a).

Für eine aussagekräftige Zustandsbeurteilung ist eine möglichst vollständige und fehlerfreie Datenbasis erforderlich. Hierzu ist eine Qualitätssicherung der Dateninformationen bestehend aus einer formalen und sachlichen Prüfung sowie weitere Verarbeitung der Daten erforderlich (DWA, 2015a).

Zum Prozessablauf der Zustandsbeurteilung empfiehlt das Merkblatt DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) die folgenden Arbeitsschritte in frei wählbarer Reihenfolge:

- Klassifizierung des Einzelzustands,
- Bewertung des Einzelzustandes oder des Objekts,
- Beurteilung des Objekts,
- Ermittlung des Sanierungsbedarfes des Objekts.

Die Arbeitsschritte werden in den nachfolgenden Unterkapiteln detaillierter dargestellt. Einen möglichen Ablauf der Zustandsbeurteilung zeigt das in Bild 6 dargestellte Schema.

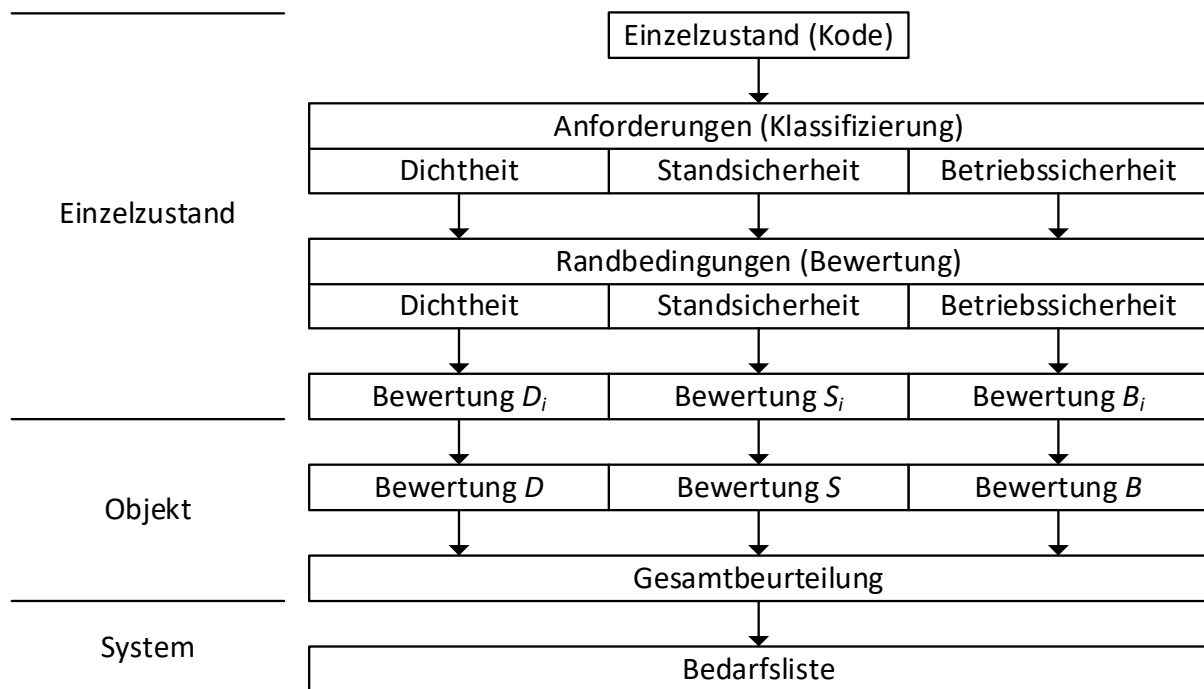


Bild 6: Möglicher Aufbau der Zustandsbeurteilung gem. DWA-M 149-3 (DWA, 2015, eigene Darstellung)

- Legende:
- D: Dichtheit
 - S: Standsicherheit
 - B: Betriebssicherheit (hydraulische Leistungsfähigkeit)
 - i: Zähler über Einzelschäden eines Objektes

Klassifizierung des Einzelzustands (Zustandsklassifizierung)

Bei der Zustandsklassifizierung werden die Ergebnisse der Zustandserfassung¹⁸ (merkmalsbezogene Codes) durch Vergleich mit den Anforderungen eines regelkonformen Entwässerungssystems (Dichtheit (D), Standsicherheit (S) und Betriebssicherheit (B)) in eine abgestufte Bewertungsskala (Zustandsklassen) eingeordnet (DWA-M 149-3 (DWA, 2015a)).

Dazu werden die Ergebnisse der Zustandserfassung mit zusätzlichen Informationen (z. B. Kanalstammdaten, Ergebnisse bisheriger Inspektionen etc.) verknüpft. Abhängig von den Anforderungen an das Entwässerungssystem werden mindestens die Schadensart (Kode) und das Schadensausmaß (z. B. Quantifizierung und Stationierung) berücksichtigt (DWA, 2015a).

¹⁸ Gem. DWA-M 149-3 (DWA, 2015a): Beschreibung des baulichen/betrieblichen Zustands von Kanälen, Leitungen, Schächten, Inspektionsöffnungen und Bauwerken der Ortsentwässerung nach DIN EN 13508-2 (DIN EN, 2011) in Verbindung mit dem Merkblatt DWA-M 149-2 (DWA, 2013).

Die Abstufung kann abhängig von den jeweiligen Anforderungen und des vorgesehenen Zeitrahmens zur Schadensbehebung erfolgen (DWA, 2015a).

Zunächst werden die Einzelzustände in Abhängigkeit der oben genannten Anforderungen eingestuft. Dies kann getrennt für jede Anforderung oder in einem Schritt, z. B. nur für die relevante Anforderung (Schutzziele D/S/B) nach Tabelle 1 bzw. 2 des DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) erfolgen. Dabei wird mithilfe der Charakterisierung ein qualitativer Zusammenhang zwischen der jeweiligen Feststellung und einer Anforderung hergestellt. Eine vorläufige Einteilung kann automatisiert erfolgen. Wenn mithilfe des Zustandskodes keine umfassende Zustandsbeschreibung möglich ist, muss die Schadenseinordnung einzeln erfolgen. Erläuterungen zeigen Tabelle 7 und Tabelle 8.

Tabelle 7: Einordnung der Zustandsklassen von Einzelfeststellungen/Schäden gem. DWA-M 149-3 (DWA, 2015, eigene Darstellung)

Klassifizierung	Erläuterung
Zustandsklasse 0	sehr starker Mangel (Gefahr im Verzug)
Zustandsklasse 1	starker Mangel
Zustandsklasse 2	mittlerer Mangel
Zustandsklasse 3	leichter Mangel
Zustandsklasse 4	geringfügiger Mangel
Zustandsklasse 5	aus rechentechnischen Gründen zusätzlich festgelegt für Feststellungen, die keine Mängel sind
Hinweis: Der Begriff „Mangel“ im Sinne dieses Merkblattes ist nicht gleichbedeutend mit dem Begriff „Mangel“ im Sinne des Bauvertragsrechts.	

Tabelle 8: Klassifizierung von Einzelschäden gem. DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) am Beispiel des Schadensbildes „Rissbildung“ (eigene Darstellung)

Haupt- kode	Charakteri- sierung		Anforde- rung			Maß- einheit	Zustandsklasse					Geltungs- bereich	
	Ch1	Ch2	D	S	B		0	1	2	3	4		
BAB	A	A		x		mm						alle	
	B, C	A, B, C, D	x			mm		> 2	> 1 ≤ 2	≤ 1			
				x		mm	≥ 8	≥ 5 < 8	≥ 3 < 5	≥ 1 < 3	< 1	allgemein	
		A		x		mm	≥ 3	≥ 2 < 3	≥ 1 < 2	≥ 0,5 < 1	< 0,5	≤ DN 300*	
				x		mm	≥ 5	≥ 3 < 5	≥ 2 < 3	≥ 1 < 2	< 1	> DN 300 ≤ DN 500*	
				x		mm	≥ 8	≥ 4 < 8	≥ 3 < 4	≥ 2 < 3	< 2	> DN 500 ≤ DN 700*	
		B		x		mm					alle		
	C, D		x		mm	Einzelfallbetrachtung							
<p>Anmerkung: gültig für Risslänge größer oder gleich der Einzelrohrlänge in den Nennweiten kleiner gleich 700 mm aus Steinzeug oder unbewehrtem Beton</p>													

Bewertung des Einzelzustandes oder des Objekts (Zustandsbewertung)

Bei der Zustandsbewertung werden die Ergebnisse der baulich/betrieblichen Zustandsklassifizierung mit Randbedingungen verknüpft, welche maßgeblichen Einfluss auf das Schadenspotential einer Feststellung haben können. Die Berücksichtigung der Randbedingungen trägt dazu bei, das Ergebnis der Klassifizierung in Bezug auf die Auswirkungen auf Dichtheit, Standsicherheit und Betriebssicherheit zu differenzieren (vgl. DWA-M 149-3 (DWA, 2015a)).

Bei der Beurteilung der Sanierungsdringlichkeit baulich/betrieblicher Mängel können gem. DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) neben den Ergebnissen der optischen Inneninspektion auch Randbedingungen berücksichtigt werden, die z. B. hydraulischer und/oder umweltrelevanter Natur sind.

Tabelle 9 gibt einen Überblick über wesentliche Randbedingungen und deren Relevanz auf die drei grundlegenden Schutzziele Dichtheit, Standsicherheit und Betriebssicherheit.

Tabelle 9: Relevanz wesentlicher Randbedingungen gem. DWA-M 149-3 (DWA, 2015, eigene Darstellung)

Randbedingung	Dicht- heit	Standsicher- heit	Betriebssicher- heit
Material	o	+	o
Überdeckung (Leitung) / Tiefe (Schacht)	o	+	+
Lage im Verkehrsraum	o	+	o
Kanalnutzung	o	o	+
Baujahr (Einfluss auf Art der Rohrverbindung)	+	o	o
Wanddicke	o	+	o
Lage zum Grundwasser	+	+	o
Bodengruppe	+	+	o
Lagerungsart / Bettung (Leitung)	+	+	o
Hydraulische Auslastung	+	o	+
Lage am Umfang	+	o	o
Anmerkungen: o keine Auswirkung + Auswirkung			

„Diese Informationen stehen jedoch nicht immer zur Verfügung bzw. sind nur mit großem Aufwand zu erhalten“. Sofern einzelne Randbedingungen nicht bekannt sind, ist zur Abschätzung des Gefährdungspotenzials eine Sicherheitsbetrachtung vorzunehmen (DWA, 2015a).

„Die Einbeziehung der Randbedingungen kann umfassend oder auf einzelne Anforderungen begrenzt sein“. Sie kann in Abhängigkeit des zur Klassifizierung angewendeten Verfahrens zustands- oder objektbezogen erfolgen und durch unterschiedlich komplexe mathematische Modelle realisiert werden (DWA, 2015a).

Das Ergebnis der Zustandsbewertung ist eine Zuordnung aufgrund von Punkten, Kennzahlen und Wichtungen in unterschiedliche Kategorien bzw. Prioritätskennzahlen (DWA, 2015a).

Beurteilung des Objekts (Gesamtbeurteilung)

Basierend auf den vorangehenden Schritten werden die Ergebnisse der Inspektion nach ihrem Handlungsbedarf eingestuft. Hierbei wird aus den Ergebnissen der Klassifizierung und Bewertung ein Gesamtwert für das betrachtete Objekt (Kanalhaltung oder Schacht) berechnet, wobei folgende Kriterien beachtet werden:

- größter Einzelschaden,
- Häufigkeit und Ausmaß der weiteren Schäden,
- Längenausdehnung der Einzelschäden sowie
- ggf. weitere Kriterien.

Diese Verdichtung kann auch bereits nach der Klassifizierung erfolgen (DWA, 2015a).

Für die Ermittlung des Gesamtwertes¹⁹ können graphische und/oder rechnerische Methoden angewandt werden. Die Berechnung kann auch Überlagerungen von Kodierungen und Schäden sowie ggf. eine Wichtung nach Dichtheit, Standsicherheit und Betriebssicherheit der Gesamtbewertung des Objektes berücksichtigen. Je größer der Gesamtwert der betrachteten Anforderung ist, desto größer ist die Wichtung. Zur Beurteilung der Objekte eines Entwässerungsgebiets ist durchgängig ein einheitlicher Maßstab anzuwenden. Nach der Wichtung werden die Werte der drei Anforderungsbereiche (Schutzziele) zu einer Sanierungsbedarfszahl zusammengefasst. Damit kann der Handlungsbedarf nach Tabelle 10 abgeleitet werden (vgl. DWA, 2015a).

Tabelle 10: Handlungsbedarf abgeleitet aus Sanierungsbedarfszahl gem. DWA-M 149-3 (DWA, 2015, eigene Darstellung)

Sanierungsbedarfszahl (SZ)	Handlungsbedarf	Zustandsbeurteilung
SZ ≥ 9.000	sofort	sehr starker Mangel (Gefahr im Verzug)
8.000 ≤ SZ < 9.000	kurzfristig	starker Mangel
7.000 ≤ SZ < 8.000	mittelfristig	mittlerer Mangel
6.000 ≤ SZ < 7.000	langfristig	leichter Mangel
5.000 ≤ SZ < 6.000	kein Handlungsbedarf, geringfügige Schäden	geringfügiger Mangel
SZ = 0	schadensfrei	kein Mangel

¹⁹ Die genaue Berechnung mit den Berechnungsschritten ist in DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) nachzuschlagen.

Ermittlung des Sanierungsbedarfes des Objekts (Bedarfsliste)

Die Zustandsklassifizierungen von Abwasserkanälen und Schächten kann in einem abschließenden Arbeitsschritt für das Entwässerungssystem in Form einer Bedarfsliste zusammengestellt und als Grundlage für die Festlegung eines Sanierungsplans genutzt werden (vgl. DWA, 2015a).

Die Bedarfsliste beinhaltet eine vergleichende Darstellung der Einzelobjekte und stellt eine Rangfolge für die Sanierungsbedürftigkeit hinsichtlich baulicher/betrieblicher Aspekte dar. Für die Festlegung eines konkreten Bauprogramms müssen jedoch weitere Bedingungen berücksichtigt werden (vgl. DWA, 2015a). Zustände, die aus Vorsorgegründen unverzügliches Handeln erfordern, sind z. B.:

- Funktionsbeeinträchtigungen, die die betriebliche Funktion des Objekts weitgehend aufheben,
- alle baulichen Schäden in der Wasserschutzzone II und im nahen Einzugsbereich von Heil- und Mineralquellen, die eine Dichtheit des Entwässerungssystems infrage stellen,
- Feststellung einer tatsächlichen Grundwasserbeeinträchtigung durch austretendes Abwasser,
- alle Situationen, in denen Einsturzgefahr des Objekts, anliegender Bauten oder des umgebenden Bodens droht - darunter fallen beispielsweise Situationen wie
 - Grundwassereinbruch mit Bodeneintrag,
 - Hohlraumfeststellung oder
 - Straßeneinbruch im Kanalbereich,
- Zustände, die Leib und Leben des Betriebspersonals gefährden (DWA, 2015a).

3.2.1.4 Fazit

Das Ergebnis der Klassifizierung und Bewertung des baulichen/betrieblichen Zustandes ist eine Zustandsklasse für jedes inspizierte Objekt (Haltung oder Schacht), welche die Dringlichkeit der Sanierung darstellt, d. h. die Priorität hinsichtlich eines Ausfalls oder Zusammenbruchs. Diese ist, neben zahlreichen anderen Aspekten, eine wichtige Grundlage für die Erarbeitung von Sanierungsstrategien und -maßnahmen (vgl. DIN EN 752 (DIN EN, 2017) oder auch DWA-A 143-14 (DWA, 2017)). Da bei der Zustandsklassifizierung bzw. der Ermittlung der Sanierungsbedarfszahl in aller Regel lediglich der schwerste Einzelschaden maßgebend für die gesamte Beurteilung ist, und weitere Faktoren wie die Schadensverteilung und –dichte nicht oder nur sehr nachrangig berücksichtigt werden, bildet diese Kennzahl keine bauliche Substanz ab.

Allerdings bilden bei der Zustandserfassung und -klassifizierung die Inspektion und die Beurteilung des Schadensbildes eine solide Grundlage, die für die in *SubKanS* zu entwickelnde Substanzklassifizierung genutzt werden kann. Die gesammelten Informationen lassen sich mit (vorhandener) Kodierung und (angepasster) Einzelschadensklassifizierung für die Beurteilung der baulichen Substanz verwenden.

3.2.2 Modelle zur Substanzklassifizierung

3.2.2.1 Leitfaden zur strategischen Sanierungsplanung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden

Bei der Substanzklassifizierung nach dem Leitfaden zur strategischen Sanierungsplanung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden (DWA, 2012) steht die Substanzklasse für einen Kennwert zur realistischen Beurteilung der vorhandenen Haltungssubstanz hinsichtlich des noch vorhandenen Abnutzungsvorrats. Dabei definiert sich der Abnutzungsvorrat über die erwartete wirtschaftliche Restnutzungsdauer (vgl. Glossar bzw. DWA-A 143-14 (DWA, 2017)). DWA-A 143-14 (DWA, 2017) führt den Begriff des relativen Substanzwertes als Verhältnis des Substanzwertes zum Wiederbeschaffungszeitwertes ein. Der relative Substanzwert beträgt zum Zeitpunkt des Neubaus (ohne Mängel) 1, d. h. gleich dem Neubauwert des Wirtschaftsgutes. Er beträgt zum Zeitpunkt der Außerbetriebnahme, d. h. bei Ablauf der Nutzungsdauer, 0. Der relative Substanzwert weist damit Ähnlichkeit zum Prinzip der kaufmännischen Abschreibung auf. Wesentliche Bedeutung kommt dabei der Einschätzung bzw. Kenntnis der konkreten Nutzungsdauer in einem Kanalnetz zu. In DWA-A 143-14 (DWA, 2017) wird auf die Bedeutung der zutreffenden betriebsgewöhnlichen Nutzungsdauer hingewiesen, die die Schnittstelle zwischen kaufmännischer und technischer Betrachtungsweise darstellt.

Ein Beispiel für ein Substanzklassifizierungsmodell gemäß DWA-Leitfaden wurde in der DWA-Arbeitsgruppe ES 8.9 „Strategische Sanierungsplanung“ entwickelt und im Programm TPSanierung (Fischer Teamplan, o.J.) integriert.

Das Klassifizierungsmodell ist in Anlehnung an das im Arbeitspapier 9 (Richtlinien für die Erhaltungsplanung im Straßenbau) der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV, 2011) dargestellte Modell so aufgebaut, dass anhand der einzelnen Schäden innerhalb der Haltung die Gesamtlänge des schadhaften Bereiches ermittelt und zur Gesamtlänge der Haltung in Beziehung gesetzt wird. Dabei werden unterschiedliche Einflusslängen von Einzel- und Streckenschäden berücksichtigt, die bei Überlappung zu Schadensbereichen zusammengefasst werden. Die Schäden werden anhand ihrer prioritätsorientierten Zustandsklasse gewichtet.

Der Algorithmus zur Bestimmung der Substanzklasse ist vom Grundsatz auf Schächte übertragbar. Dabei wird entsprechend DIN EN 13508-2 DIN (DIN EN, 2011) sowie DWA-M 149-2 (DWA, 2013b) und -3 (DWA, 2015a) die Betrachtung in vertikaler Richtung geführt. Die Festlegung von Einflusslängen und Stützpunkten erfolgt im Leitfaden nicht.

Die Ausweisung separater Ergebnisse für die Schutzziele Standsicherheit, Dichtheit und Betriebssicherheit ist möglich; die Ergebnisse lassen sich durch die vorhandene Systematik und die separate Klassifizierung nach Merkblatt DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) auswerten.

Klassifizierung der Einzelschäden

Die Klassifizierung der Einzelschäden (bzw. Festlegung der Schadensklasse) erfolgt im DWA-Leitfaden gem. DWA-M 149-3 (DWA, 2015a). Dabei wird von den drei schutzzielbezogenen²⁰ Schadensklassen das Minimum als Schadensklasse für die einzelne Feststellung ermittelt und im Weiteren verwendet.

Festlegung der Einflusslängen von Einzelschäden

Bei der Substanzklassifizierung gemäß DWA-Leitfaden werden im ersten Schritt die Einflusslängen der Einzelschäden (im Sinne der Feststellungen gem. DIN EN 13508-2 (DIN EN, 2011b) bzw. DWA-M 149-2 (DWA, 2013b) festgelegt. Die Einflusslänge eines Schadens kennzeichnet den Bereich, bei dessen Unterschreitung zwei benachbarte Schäden zusammen repariert werden. Dieser Bereich ist für Reparaturen in offener und geschlossener Bauweise unterschiedlich lang. Darüber hinaus müssen vor dem Hintergrund des Kostenvergleichs gleiche Einflusslängen in etwa auch die gleiche Kostenrelevanz haben. Bei richtiger Wahl der Einflusslänge spielt die Verteilung der Schäden im Weiteren keine Rolle mehr.

Die Einflusslängen werden bei Einzelschäden mittig zur Schadensposition und bei Streckenschäden hälftig an Anfang und Ende addiert. Überlappende Schadensbereiche werden einfach mit der jeweils höheren Zustandsklasse berücksichtigt. Bei durchschnittlichen Verhältnissen wird eine Einflusslänge von 1,0 m bei geschlossener Bauweise und von 4,0 m bei offener Bauweise angesetzt. Diese Festlegungen lassen sich wie folgt begründen:

- Einflusslänge für Schäden, die in geschlossener Bauweise repariert werden können²¹
Die Einflusslänge für Schäden, die in geschlossener Bauweise repariert werden können, können z. B. mit dem Reparaturverfahren Kurzliner durchgeführt werden. Der Kurzliner wird in ausreichender Länge rechts und links über der Schadstelle überstehend eingebaut. Liegen 2 Schadstellen eng beieinander, werden sie mit einem längeren Kurzliner repariert. Liegen die

²⁰ Schutzziele:

- Dichtheit (D)
- Standsicherheit (S)
- Betriebssicherheit (B)

²¹ Schäden an Abzweigen bzw. Stutzen stellen eine Besonderheit dar:

- Eine gemeinsame Reparatur mit anderen Schäden ist zumindest bei geschlossener Bauweise kaum möglich.
- Bei Renovierung und z. T. auch Erneuerung führen Abzweige und Stutzen zu zusätzlichen Kosten.
- Die Kosten für Reparatur in geschlossener Bauweise sind vergleichsweise hoch.
- Eine Abschätzung zwischen offener und geschlossener Bauweise ist zumindest bei der alten Schadensbeschreibung nach Merkblatt ATV-M 143-2 (DWA, 2013) schwierig.

Die einzelnen Punkte heben sich teilweise auf, sodass bei geschlossener Bauweise eine Einflusslänge von 1,0 m auch hier realistisch erscheint. Bei offener Bauweise ist eine Einflusslänge von 2,0 m - 2,5 m realistisch.

Schadstellen weiter auseinander, kann eine längere Reparatur zwar sinnvoll sein, bringt aber keine wirtschaftlichen Vorteile. Als wirtschaftliche Grenze kann ungefähr 1 m angesetzt werden. Entsprechend wird als Einflusslänge für einen Schaden, der in geschlossener Bauweise repariert werden kann, 1 m gewählt.

- Einflusslänge für Schäden, die in offener Bauweise repariert werden können²¹

Für die Festlegung der Einflusslänge der Schäden in offener Bauweise werden die relativen Reparaturkosten betrachtet. Diese können bei mittlerer Tiefe gemäß Gleichung 1 abgeschätzt werden:

$$\text{Kosten}_{\text{Rep. offen}} = 8 \text{ DN} + 2 \text{ DN} \cdot \text{Länge}$$

Gleichung 1

Aus der Formel lässt sich ableiten, dass es bis zu einem Abstand zweier Schadstellen von ca. 4,0 m wirtschaftlich ist, zwei benachbarte Schadstellen in einer gemeinsamen Baugrube zu reparieren. Auch hier kann eine längere Reparatur technisch sinnvoll sein, bringt aber ebenso keine wirtschaftlichen Vorteile.

Zusammenfassend ergeben sich im DWA-Leitfaden für die Einflusslängen folgende Festlegungen:

- Einzelschäden, geschlossene Bauweise:
1,0 m mittig zur Schadensposition
- Einzelschäden, offene Bauweise:
4,0 m mittig zur Schadensposition
- Streckenschäden, geschlossene Bauweise:
Schadenslänge + 1,0 m
- Streckenschäden, offene Bauweise:
Schadenslänge + 4,0 m.

Ermittlung der Gesamteinflusslänge

Im nächsten Schritt werden die Einflusslängen der Einzelschäden überlagert. Dabei sind zu berücksichtigen²²:

- die Lage der Schäden zueinander,
- die Zustandsklassen der Schäden,
- die Bauweise (offen/geschlossen).

Zunächst werden nur die Schäden der höchsten Zustandsklasse (ZK1 einschließlich ZK0) überlagert, indem bei überlappenden Einflusslängen eine gemeinsame Einflusslänge gebildet wird. Diese ragt bei geschlossener Bauweise je 0,5 m und bei offener Bauweise je 2 m über die beiden äußeren Schadensenden hinaus.

Im nächsten Schritt wird im noch freien Bereich nach dem gleichen Algorithmus die Gesamteinflusslänge für die Zustandsklasse 2 und im Anschluss für die Zustandsklasse 3 ermittelt. Die Gesamteinflusslängen werden in den einzelnen Zustandsklassen getrennt ausgewiesen (siehe Bild 7).

²² Besondere Überlegungen erfordert die Überlagerung

- am Rohranfang oder Rohrende sowie
- bei der Kombination von offener und geschlossener Bauweise

Rohranfang und Rohrende

Liegt der Schaden direkt am Rohranfang oder Rohrende, ragt die Einflusslänge über das Rohr hinaus. Bei geschlossener Bauweise verbleibt der Einflussbereich in der Stationierung zwischen 0 und Haltungsende, wenn als Bezug die Haltungslänge und Haltungsstationierung beibehalten wird, da im Normalfall die Haltungslänge je 0,5 m über die Rohrlänge hinausragt. Bei offener Bauweise reicht die Einflusslänge über die Länge der Haltung und deren Stationierung hinaus. Dies ist zunächst in der Analyse korrekt. Die Gesamteinflusslänge muss allerdings in jedem Fall auf maximal die Haltungslänge begrenzt werden, um Überbewertungen zu vermeiden.

Kombination von offener und geschlossener Bauweise

Die Berücksichtigung von gleichzeitig offener und geschlossener Bauweise in einer Haltung ist möglich, da sich die gleichen Grenzwerte ergeben und damit die Einflusslängen in etwa als gleichwertig anzusehen sind. Zwar weichen die Projektkostenbarwerte von Erneuerung und Renovierung etwas voneinander ab, jedoch bieten sich auch gemischte Möglichkeiten der Sanierung, z. B. zunächst eine offene Reparatur vorzusehen und dann einen Inliner einzuziehen.

Die Einflusslängen eines Schadens bei geschlossener Bauweise mit einem Schaden bei offener Bauweise überlappen bei Unterschreitung eines Abstandes von 2,5 m. Für eine wirtschaftliche Zusammenfassung der Reparatur (Verlängerung der Baugrube) ist jedoch die geringere Einflusslänge der geschlossenen Reparatur (1 m) maßgebend. Deshalb sind 2 Fälle zu unterscheiden:

- Abstand < 1,0 m:
Die Einflusslänge der offenen Maßnahme wird um den Abstand verlängert.
- Abstand > 1,0 m und < 2,5 m:
Das Ende der Einflusslänge ergibt sich aus dem größeren Wert von offenem oder geschlossenem Schaden. Die Gesamteinflusslänge wird ähnlich wie bei Rohranfang/Rohrende um den sonst verlorengehenden Anteil der Einflusslänge des geschlossenen Schadens erhöht (mit Begrenzung auf Haltungslänge). Alternativ wird auch in diesem Fall die Einflusslänge der offenen Maßnahme um den Abstand verlängert.

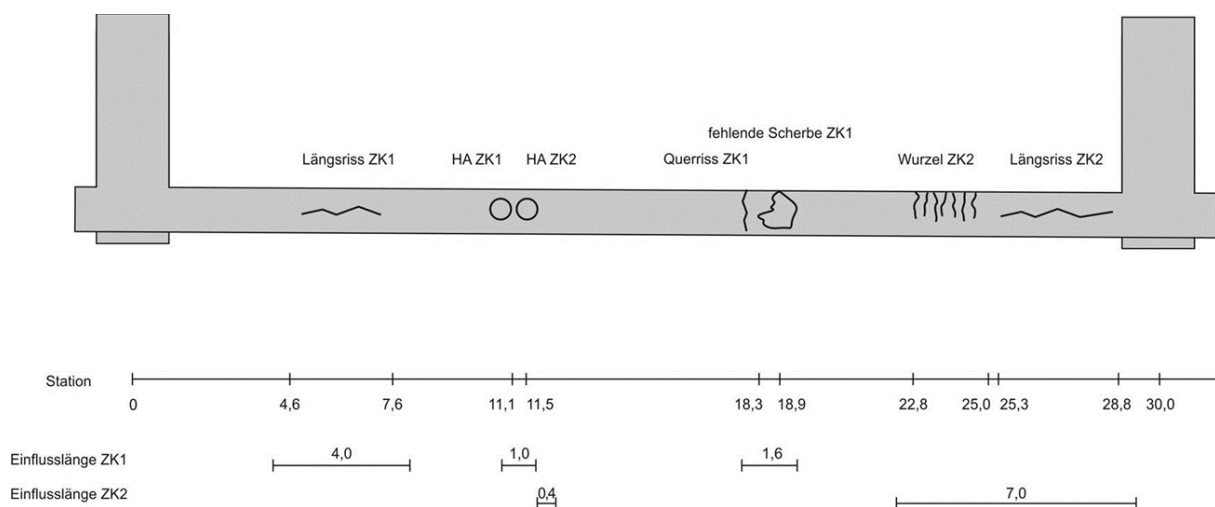


Bild 7: Ermittlung und Überlagerung der Einflusslängen nach DWA-Leitfaden (DWA, 2012))

Zur Berücksichtigung von Schäden, die durch die durchgeführten Inspektionen nicht erfasst wurden, wie z. B. nicht sichtbare Risse, Muffenundichtigkeiten etc., wird ein fiktiver Streckenschaden über die gesamte Haltungslänge erzeugt. In Abhängigkeit des Baujahres wird dem Streckenschaden eine geringe Priorität zugeordnet, der mit aufsteigendem Baujahr ausläuft.

Bei der Substanzklassifizierung wird in den Programmstandardeinstellungen

- für das Baujahr ≤ 1965 ein Streckenschaden mit 100 % in der Zustandsklasse 4 bei Wichtung 2,7 %,
- zwischen Baujahr 1965 und 1975 linear abnehmend von 100 % auf 30 % Zustandsklasse 4 und
- für das Baujahr bis 1999 linear auslaufend von 30 % Zustandsklasse 4 auf Zustandsklasse 5

erzeugt. Die Einstellungen des in Abhängigkeit des Baujahres eingeführten Streckenschadens können im Bedarfsfall auch auf eine höhere Priorität angepasst werden.

Wichtung der Einzelschäden

Für die Bestimmung der Substanzklasse werden die Einzelschäden nach ihrer Sanierungspriorität gewichtet. Dies ist erforderlich, da weniger dringliche Schäden nicht direkt einen Sanierungsbedarf auslösen. Die Dringlichkeit für die Sanierung von Haltungen oder Schächten ergibt sich aus der Zustandsklasse. Die Wichtung erfolgt jeweils in einer 30 %-Abstufung. Daraus ergeben sich die in Tabelle 11 aufgeführten Werte.

Dabei wird nach DWA-Leitfaden als logische Bedingung angesetzt, dass ein Streckenschaden über die ganze Haltung der Zustandsklasse 2 gerade noch nicht die Substanzklasse 1 bedingt. Er ist damit gleichwertig mit einer Einflusslänge von 30 % in Zustandsklasse 1 ohne weitere Schäden im übrigen

Bereich. Die Potenzreihe des Schwellenwertes ergibt sich gemäß Tabelle 11 bei logischer Fortsetzung dieses Ansatzes für die weiteren Zustandsklassen.

Tabelle 11: Wichtung nach Zustandsklassen gemäß DWA-Leitfaden (DWA, 2012)

Zustandsklasse	0 und 1	2	3	4
Wichtung	100 %	30 %	9 %	2,7 %

Bestimmung der Schadensdichte

Die Schadensdichte nach DWA-Leitfaden ergibt sich aus den Einflusslängen und ihrer jeweiligen Wichtung nach Gleichung 2 wie folgt:

$$\text{Schadensdichte} = \frac{\sum_i \text{Einflusslänge}_i \cdot \text{Wichtung}_i}{\text{Objektlänge}} \quad \text{Gleichung 2}$$

Bestimmung der Substanzklasse

Die Substanzklasse nach DWA-Leitfaden wird aus der Schadensdichte über eine Normierungsfunktion ermittelt (vgl. Bild 8).

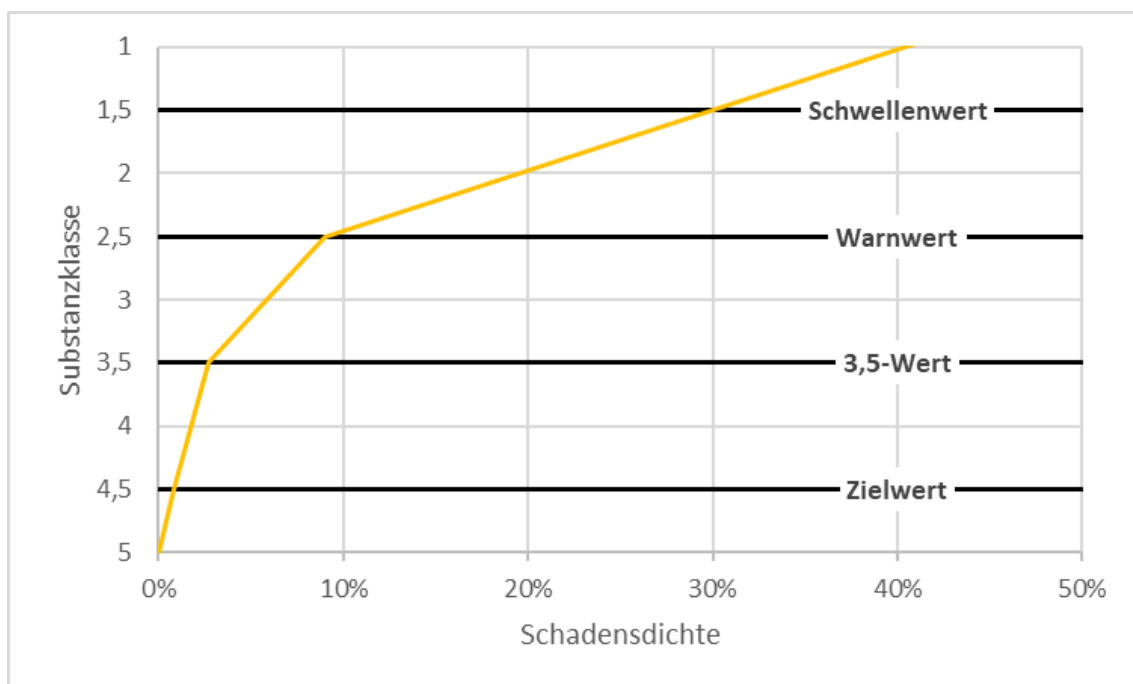


Bild 8: Normierungsfunktion nach DWA-Leitfaden (DWA, 2012)

Der Schwellenwert in Bild 8 kann dabei als durchschnittliche Grenze der Reparaturfähigkeit gewählt werden. Im Sinne eines „wirtschaftlichen Totalschadens“ ist dies nach DWA-Leitfaden der Zeitpunkt,

ab dem sich eine Reparatur nicht mehr lohnt. Übliches Werkzeug für diese Entscheidung ist im Rahmen einer Sanierungsplanung die dynamische Kostenvergleichsrechnung. Damit wird die unterschiedliche Lebensdauer der einzelnen Verfahren berücksichtigt.

Aus diesem Grund wurde im DWA-Leitfaden die Herleitung des Schwellenwertes auf gleicher Grundlage durchgeführt. Hierzu wurden typische Kostensituationen analysiert und die Reparatur in geschlossener Bauweise mit Renovierung einerseits und die Reparatur in offener Bauweise mit Erneuerung andererseits verglichen. Im Ergebnis wurde ein Schwellenwert von 30 % als typische Grenze einer Investitionsentscheidung ermittelt. Dabei wurde der Schwellenwert über eine vereinfachte Kostenvergleichsrechnung für verschiedene Nennweiten mit vereinfachten, empirischen Kostenfunktionen ermittelt. Der ermittelte Schwellenwert kann mit abweichender Festlegung der Kosten und der Nutzungsdauern an die örtlichen Verhältnisse angepasst werden. Darüber hinaus können strategiebedingt Zu- oder Abschläge gewählt werden. Analog zur Herleitung der Wichtungsfaktoren ergeben sich die weiteren Stützpunkte der Normierungsfunktion als Potenzreihe des Schwellenwertes (vgl. Tabelle 12).

Tabelle 12: Stützpunkte der Normierungsfunktion nach DWA-Leitfaden (DWA, 2012)

Stützpunkt	Zielwert	3,5-Wert	Warnwert	Schwellenwert
Schadensdichte	0,81 %	2,7 %	9 %	30 %

Diese Stützpunkte (siehe Bild 8) lassen sich wie folgt beschreiben:

- Substanzklasse 5,0 = neuwertige Haltung bzw. Schacht
- Substanzklasse 4,5 = Zielwert: Grenze des Soll-Zustandes einer neuen Haltung (nur wenige geringfügige Mängel)
- Substanzklasse 3,5 = 3,5-Wert: mittlerer Zustand einer in Betrieb befindlichen Haltung (mehrere Schäden mit geringerer Dringlichkeit / wenige Schäden mit höherer Dringlichkeit)
- Substanzklasse 2,5 = Warnwert: Grenze, ab der Erhaltungsmaßnahmen (Renovierung/Erneuerung) in der weiteren strategischen Planung berücksichtigt werden sollten (mehrere Schäden mit höherer Dringlichkeit)
- Substanzklasse 1,5 = Schwellenwert: Grenze, ab der weitere Reparaturen unwirtschaftlich sind - Ende der wirtschaftlichen Nutzungsdauer (umfangreiche Schäden höherer Dringlichkeit)

3.2.2.2 STATUS_{Kanal}

Die Substanz(klasse) ist aus Sicht von STATUS_{Kanal} die Entsprechung des Abnutzungsvorrates gemäß DIN 31051 (DIN, 2019).

Nach Aufbrauch des Abnutzungsvorrates, welcher gemäß DIN 31051 (DIN, 2019) durch unterschiedliche Beanspruchungen hervorgerufen werden kann (z. B. Reibung, Korrosion, Ermüdung, Alterung, Kavitation, Bruch), kann das betreffende Objekt (Kanalhaltung bzw. Schacht) bei Berücksichtigung rechtlicher und normativer Vorgaben aus technischer Sicht nicht mehr genutzt werden.

Damit bildet der vollständige Abbau des Abnutzungsvorrates bzw. der Substanz die Grenze der technischen Nutzungsdauer, wie sie auch in DWA-A 143-14 (DWA, 2017) definiert wird.

Die Substanz(klasse) ist damit gem. Modellverständnis von STATUS_{Kanal} ein maßgebliches Kriterium für die Abschätzung der Restnutzungsdauer des Objektes (siehe Gleichung 3). Darüber hinaus wird die Substanz(klasse) genutzt, um zu entscheiden, welches Sanierungshauptverfahren (Reparatur, Renovierung oder Erneuerung) dem Objekt aus technischer Sicht zugeordnet werden kann.

Für diese differenzierte bauliche Entscheidung wird nicht nur die Substanz, sondern auch die nach den Schutzziele Standsicherheit, Dichtheit und Betriebssicherheit differenzierten (Teil-)Substanzen herangezogen.

$$S_i = 1 - \frac{\text{Alter}_i}{\text{techn. Nutzungsdauer}_i} \quad \text{Gleichung 3}$$

mit: S_i : Substanz des betreffenden Netzbestandteils (Objektes) i

Klassifizierung der Einzelschäden

Die Klassifizierung der Einzelschäden (bzw. Festlegung der Schadensklasse) erfolgt in STATUS_{Kanal} in Anlehnung an die geltenden Regelwerke (z. B. DWA-M 149-3 (DWA, 2015a)). Aus modelltechnischen Gründen werden die Schadensklassen in ein fünfstufiges Klassensystem transformiert, in welchem die Schadensklasse SK 1 den geringsten Schaden und Schadensklasse SK 5 den schwersten Schaden darstellt. Für die Schadensklassen nach DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) gilt entsprechend Gleichung 4:

$$SK_{trans} = 5 - SK_{DWA}$$

Gleichung 4

Zur Ermittlung der Gesamtsubstanz in $STATUS_{\text{Kanal}}$ wird von den drei schutzzielbezogenen Schadensklassen das Maximum SK_{trans} als Schadensklasse für die einzelne Feststellung ermittelt und im Weiteren verwendet. Zusätzlich erfolgt eine schutzzielbezogene Substanzklassifizierung. Für die Gesamtsubstanz findet der Maximalwert der Grundanforderungen (D/S/B) des Einzelschadens Anwendung, für die Substanz nach D/S/B die entsprechend ermittelte Schadensklasse der jeweiligen Anforderung.

Generell können im Modell auch Ergebnisse von beliebigen numerischen Einzelschadensbewertungen verwendet werden, sofern zusätzlich die entsprechende Bewertungsskala für eine Bewertungstransformation vorliegt.

Erstellung des Schadensprofils

Zur Ermittlung der Substanz(klasse) wird in $STATUS_{\text{Kanal}}$ ein Schadensprofil erstellt. Hierbei wird jedem Punktschaden abhängig vom Schadensbild eine individuelle Schadenslänge (Einflusslänge) zugeordnet. Streckenschäden gehen mit der ihnen eigenen Schadenslänge in das Schadensprofil ein. Zur Erstellung des Schadensprofils werden die einzelnen Schäden mit ihren Schadensklassen und so ermittelten Schadenslängen auf der Haltung aufgetragen, wobei geringere Schäden von an gleicher Stelle liegenden schwereren Schäden überlagert werden. Bei Streckenschäden bestimmen Anfang und Ende den jeweiligen Einflussbereich des Schadens, bei Punktschäden wird die zugewiesene Schadenslänge an der Position des Schadens vermittelt. Sowohl für den Gesamtzustand als auch differenziert nach Funktionalanforderungen (D/S/B) werden Schadensprofile erstellt. Beispiele für zwei verschiedene Kanalhaltungen sind in Bild 9 dargestellt.

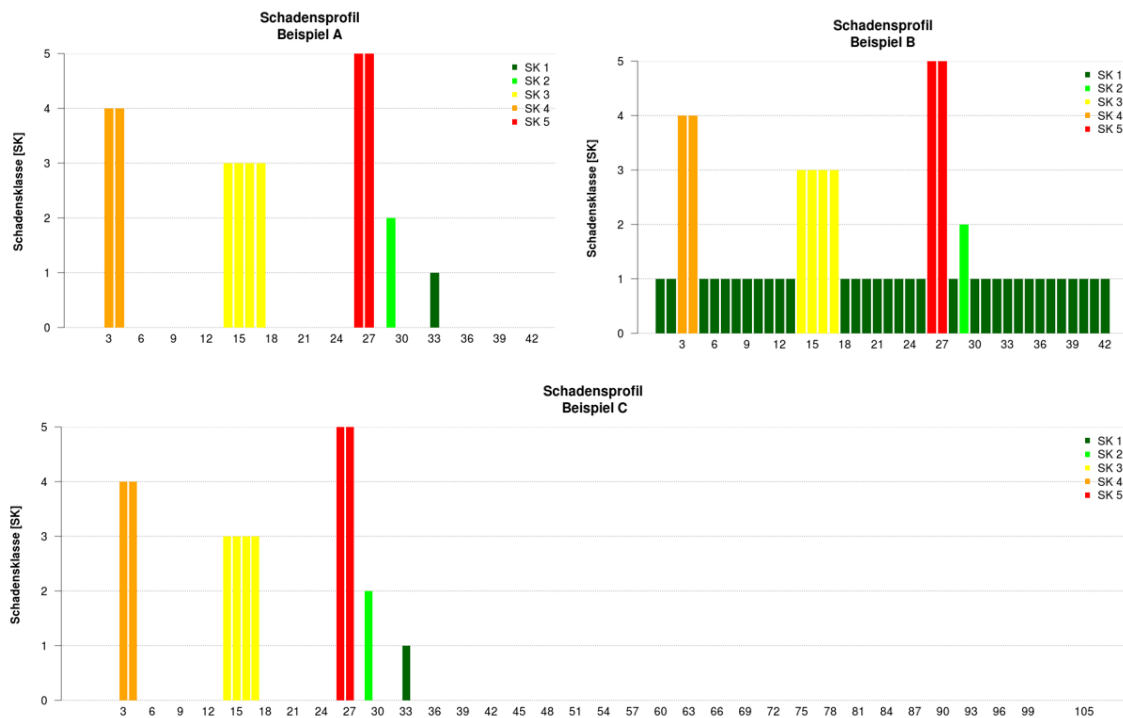


Bild 9: Beispiel Schadensprofile auf Basis der Zustandsklasse und der jeweiligen praktikablen Sanierungslänge (Gesamtzustand) (Stein und Stein, 2019)

Ermittlung der gewogenen Schadensschwere

Die gewogene Schadensschwere (GSS) nach STATUS_{Kanal} gibt Aufschluss über die Schwere (Schadensklasse) und das Ausmaß (Schadenslänge) von Schäden innerhalb einer Haltung. Sie wird anhand des Schadensprofils (vgl. Bild 9) ausschließlich aus den Anteilen (Schadensklassen[längen]anteilen) der beschädigten Teilstücke einer Haltung berechnet (vgl. Bild 10).

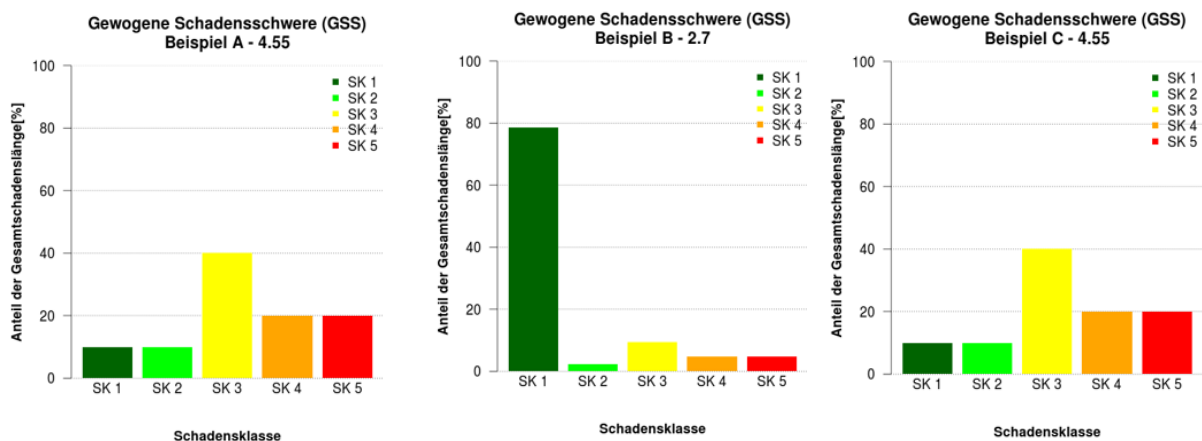


Bild 10: Ermittlung der gewogenen Schadensschwere in STATUS_{Kanal} für die in Bild 9 dargestellten Beispiele (Stein und Stein, 2019)

Die gewogene Schadensschwere ergibt sich aus dem Mittelwert und der Standardabweichung der kumulierten Schadensklassenanteile (Gleichung 5).

$$GSS = \begin{cases} \frac{\bar{x}_{arithm} + \sigma}{5} & \text{falls } \bar{x}_{arithm} + \sigma < 5 \\ \bar{x}_{arithm} + \sigma & \text{falls } \bar{x}_{arithm} + \sigma \geq 5 \end{cases} \quad \text{Gleichung 5}$$

mit: \bar{x}_{arithm} : Arithmetisches Mittel
 σ : Standardabweichung

Die gewogene Schadensschwere wird mit Hilfe eines definierten Vektors fuzzifiziert, das heißt, es wird ein Zugehörigkeitsvektor für die GSS ermittelt. Dieser Vektor ist ein Eingangsvektor für die Substanzermittlung in STATUS_{Kanal} (Tabelle 13).

Tabelle 13: Wertebereichszuordnung gewogene Schadensschwere in STATUS_{Kanal}

Wertebereich	Fuzzyvektor _{GSS}	Bedeutung
	1,00	GSS äußerst niedrig
	1,57	GSS sehr niedrig
	2,14	GSS niedrig
	2,71	GSS mittel
	3,29	GSS hoch
	3,86	GSS sehr hoch
	4,43	GSS äußerst hoch
	5,00	

Ermittlung des Schadenskonzentrationswertes

Der Schadenskonzentrationswert (SKW) nach STATUS_{Kanal} gibt Aufschluss über die Verteilung der Schäden innerhalb einer Haltung. Für den Schadenskonzentrationswert sind die Länge und Station der Schäden, nicht aber die Schadensklasse relevant. Die Berechnung des Schadenskonzentrationswertes setzt sich aus zwei Faktoren zusammen (vgl. Gleichung 6).

Für den ersten Faktor werden die Anteile an der Gesamtschadenslänge kumuliert. Auf diese Weise wird ein sogenanntes beidseitig begrenztes Intervall gebildet, dessen Grenzen bei Anteilen von 10 % bzw. 90 % an der Gesamtschadenslänge liegen (siehe Bild 11). Damit lässt sich der Bereich ermitteln, innerhalb dessen 80 % der Schadenslänge liegen. Diese Strecke wird in Bezug zur Objektlänge (hier: Haltungslänge HL) gesetzt. Der zweite Faktor wird aus dem Anteil der Gesamtschadenslänge (GSL) an der Haltungslänge (HL) ermittelt (vgl. Gleichung 6).

$$SKW = \left(\frac{(Q_{90} - Q_{10}) \cdot GSL}{HL} \right) \cdot 100 \%$$

$$= \left(\frac{(Q_{90} - Q_{10}) \cdot GSL}{HL^2} \right) \cdot 100 \%$$

Gleichung 6

mit: $(Q_{90}-Q_{10})$: Schadenskonzentrationsintervall (Quantile)
 GSL: Gesamtschadenslänge
 HL: Haltungslänge

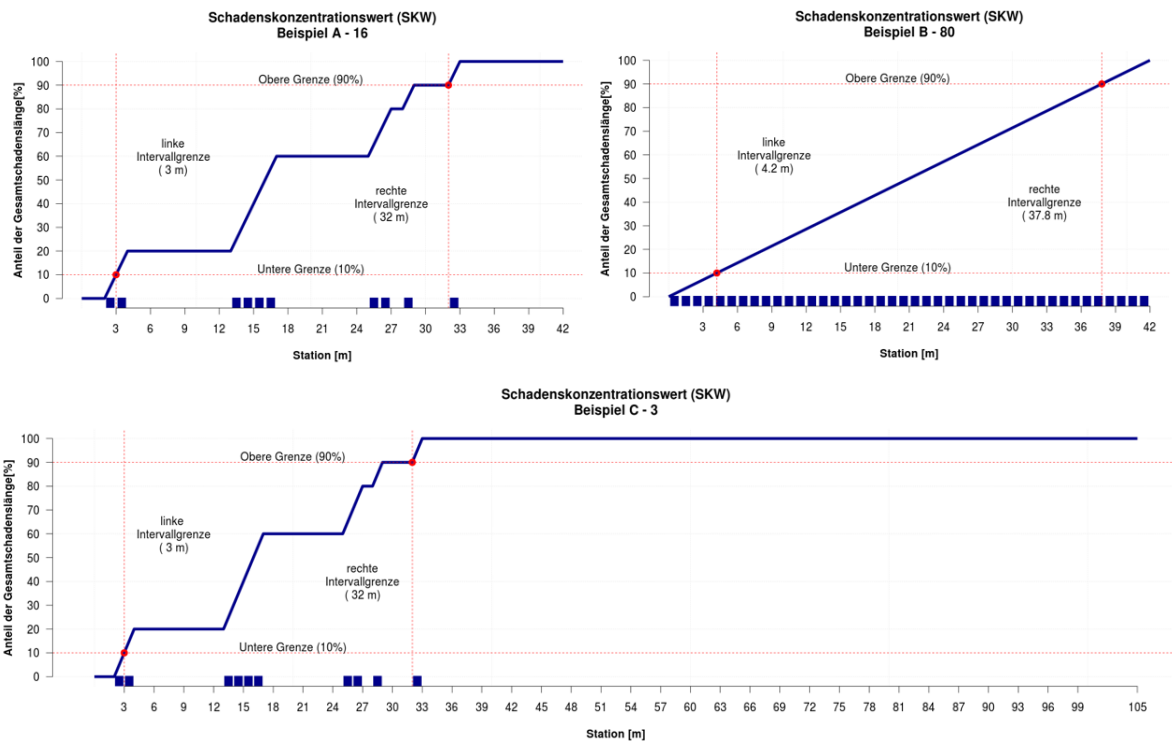


Bild 11: Ermittlung des Schadenskonzentrationswertes in STATUS_{Kanal} für die in Bild 9 dargestellten Beispiele (Stein und Stein, 2019)

Für diesen Wert wird ebenfalls mit Hilfe eines Zugehörigkeitsvektors der zweite Eingangsvektor für die Substanzermittlung gebildet (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14: Wertebereichszuordnung Schadenskonzentration in STATUS_{Kanal}

Wertebereich Fuzzyvektor _{SKW}	Bedeutung
0,00	SKW äußerst niedrig
4,00	SKW sehr niedrig
12,50	SKW niedrig
30,00	SKW mittel
47,50	SKW hoch
65,00	SKW sehr hoch
100,00	

Für die Schadenskonzentration bedeutet, dass niedrige Werte (z. B. Bereich zwischen 0 bis 4) lokal begrenzte Sanierungsmaßnahmen (Reparatur) signalisieren, während hohe Werte (z. B. Bereich zwischen 65 bis 100) darauf hindeuten, dass eine Streuung der Schäden über die gesamte Haltung vorliegt. Die Sanierung solcher Schäden erfolgt i. d. R. über die gesamte Kanalhaltung (Renovierung oder Erneuerung). Die endgültige Entscheidung über das sinnvolle Sanierungsverfahren erfolgt in Zusammenhang mit der Substanzklassifizierung und unter Einbeziehung der Substanzbewertungsergebnisse der Schutzziele.

Berechnung der Substanzklasse

Die Verknüpfung der beiden Parameter - gewogene Schadensschwere und Schadenskonzentrationswert - zu einer Substanz erfolgt in STATUS_{Kanal} mittels Fuzzy-Logik basierter Zuordnung (vgl. Bild 12). In Bild 12 dargestellt ist das Ergebnis aus den drei bereits vorher in Bild 9 bis Bild 11 eingeführten Beispielen A - C. Diese Zuordnung ist fixiert und nicht von externen Parametern abhängig. Auf diese Weise ergeben identische bauliche Situationen mit identischen Schadensverteilungen, -ausdehnungen und -bewertungen immer identische und damit netzübergreifend objektive Substanzbewertungen. Die Zuordnung von Entscheidungen zur empfehlenswerten Hauptsanierungsart wird in Abhängigkeit der Substanzbewertungsergebnisse - insbesondere unter Einbeziehung der Ergebnisse der Substanzbewertung nach Schutzzielen - netzindividuell vorgenommen. Diese Zuordnung wird individuell mit dem jeweiligen Betreiber festgelegt. Damit soll gewährleistet werden, dass individuelle Schadensbilder und Randbedingungen, wie z. B. Wasserschutzzonen mit höheren Anforderungen an die Dichtheit in der Substanzbeurteilung berücksichtigt werden.

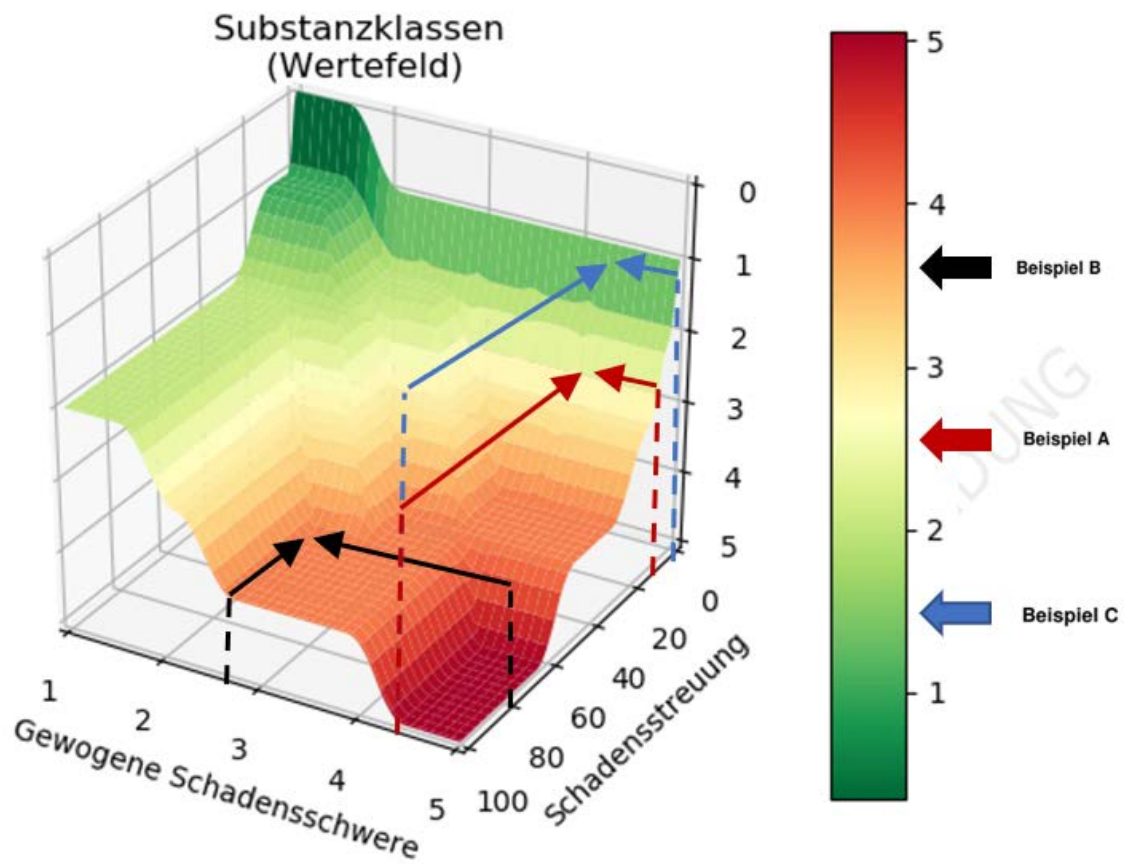


Bild 12: Beispielergebnis für die Ermittlung der Substanz nach $STATUS_{\text{Kanal}}$ in Abhängigkeit von gewogener Schadensschwere (GSS) und Schadenskonzentrationswert (SKW) (Stein und Stein, 2019)

Die Substanzklassen werden schlussendlich gem. Tabelle 15 festgelegt.

Tabelle 15: Zuordnung Substanzklassen in $STATUS_{\text{Kanal}}$

Substanz	Substanzklasse	Bedeutung
0 %	SBK 0	Abnutzungsvorrat voll
10 %	SBK 1	Abnutzungsvorrat sehr hoch
30 %	SBK 2	Abnutzungsvorrat hoch
50 %	SBK 3	Abnutzungsvorrat mittel
70 %	SBK 4	Abnutzungsvorrat niedrig
90 %	SBK 5	Abnutzungsvorrat aufgebraucht
100 %		

3.2.2.3 Bietigheimer Modell

Das Bietigheimer Modell zur Bestimmung einer ordinalen Substanzklasse SK ist Bestandteil des DynaStrat-Programms (Dynamische Sanierungsstrategie), welches die Entwicklung langfristiger Sanierungsstrategien von Kanalnetzen unterstützt. Die Substanzklasse SK hat darin die gleiche formale Struktur wie die Zustandsklasse ZK gemäß DWA-M 149-3 (DWA, 2015a). Sie unterscheidet ebenfalls die Beeinträchtigung der Schutzziele

- Substanzklasse Dichtheit (SKD)
- Substanzklasse Standsicherheit (SKS)
- Substanzklasse Betriebssicherheit (SKB)
- Substanzklasse Gesamt (SKG)

Die Gesamtsubstanz SKG errechnet sich im Bietigheimer Modell als Minimum der schutzzielbezogenen Substanzklassen SKD, SKS und SKB.

Zweck der Substanzklasse ist es, die Information der Zustandsklasse im Rahmen der Sanierungsplanung zu ergänzen. Die Zustandsklasse dient im Rahmen der Sanierungsplanung der Prioritätsreihung von Sanierungsmaßnahmen. Insbesondere dient sie der Differenzierung der Haltungen in solche mit

- vordringlichem Sanierungsbedarf
- nachrangigem Sanierungsbedarf und
- ohne Sanierungsbedarf.

Je Sanierungsbedarf (vordringlicher / nachrangiger / kein) werden im Bietigheimer Modell Interventionsklassen (IKD) von IKD 1 bis IKD 4 gebildet. Die Interventionsklasse IKD 1 steht für Haltungen mit Schäden, die vordringlich zu sanieren sind und IKD 4 für Haltungen ohne Sanierungsbedarf. Mit der Interventionsklasse soll nach dem Bietigheimer Modell die mögliche Sanierungsbereitschaft der Netzbetreiber dargestellt werden. Üblicherweise wird vom Netzbetreiber die Interventionsklasse IKD 1 für Haltungen der Zustandsklasse 0 und 1 verwendet, während Haltungen der Zustandsklassen 2 bis 4 als nachrangig sanierungsbedürftig und in den IKD 2 - 4 eingestuft werden. Abweichungen von der Interventionsklasse IKD 1 kommen vor: z. B. wird bei Regenwasserhaltungen festgelegt, dass nur Haltungen mit Schäden der Zustandsklasse 0 vordringlich sanierungsbedürftig sind. Die Interventionsklasse kann somit je Netzbetreiber unterschiedlich festgelegt werden.

Die schutzzielbezogenen Zustandsklassen ZKD, ZKS und ZKB beschreiben nicht die Dringlichkeit der Sanierung, sondern die Struktur der Schäden. Die Dringlichkeit des Schadens wird mit der Zustandsklasse ZKG abgebildet, die aus dem Minimum der schutzzielbezogenen Zustandsklassen ZKD, ZKS und ZKB abgeleitet wird.

Die traditionell ausschließliche Verwendung der Zustandsklasse zur Beschreibung des baulich bedingten Sanierungsbedarfs führte in der Vergangenheit zu einem Informationsdefizit bezüglich der Unterscheidung zwischen einem behebbaren und einem endgültigen Ausfall. Unter den Haltungen

mit vordringlichem Sanierungsbedarf gibt es solche mit „guter“ und mit „schlechter“ Bausubstanz. Bei guter Bausubstanz liegen wenige vordringliche Schäden vor, die mit begrenztem Aufwand teilsaniert werden können. Nach der (potentiellen) Teilsanierung wird sich die Zustandsklasse ZKG so weit verbessern, dass die Haltung nachrangig sanierungsbedürftig oder schadensfrei ist. Hier ist der Ausfall behebbar, die Nutzungsdauer im akzeptierten Zustand wird durch Reparatur verlängert.

Im Rahmen der dynamischen Sanierungsstrategie nach DynaStrat wird unterstellt, dass künftige Sanierungsentscheidungen des Netzbetreibers im Regelfall dem Schema nach Bild 13 folgen.

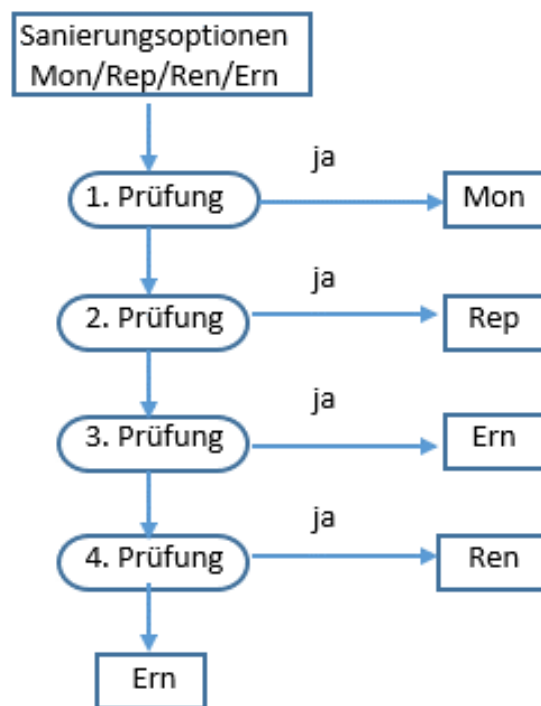


Bild 13: Auswahl einer Sanierungsoption nach DynaStrat

Diese Annahme ist Grundlage der Zustandsprognose und der Budgetplanung. Die dynamische Komponente des DynaStrat-Modells besteht darin, dass Haltungen im Zeitraum zwischen der letzten Inspektion und dem Sanierungsjahr rechnerisch gealtert werden. So kann z. B. eine Sanierung in 10 Jahren aufwändiger sein als im Planungsjahr.

Das Bietigheimer Modell dient dazu, die Bausubstanz zu klassifizieren und die zu kalibrierende Reparaturbereitschaft an die Sanierungspraxis des Netzbetreibers anzupassen. Die heutige Methodik ist eine Weiterentwicklung des im Jahr 1999 veröffentlichten Modells (Hochstrate, 1999). Insbesondere wurde die Rasterung der Haltung in 1 m-Abschnitte ersetzt durch eine stetige Festlegung der Einflusslängen von Schäden.

Klassifizierung der Einzelschäden

Die Klassifizierung der Einzelschäden (bzw. Festlegung der Zustandsklasse) erfolgt im Bietigheimer Modell gem. DWA-M 149-3 (DWA, 2015a). Dabei wird von den drei schutzzielbezogenen Zustandsklassen

- ZKD: Zustandsklasse Dichtheit,
- ZKS: Zustandsklasse Standfestigkeit,
- ZKB: Zustandsklasse Betriebssicherheit und
- das Minimum als ZKG: Zustandsklasse Gesamt

definiert (vgl. Kap. 3.2.1.3).

Festlegung der Interventionsklasse

Die Interventionsklasse (auf der Skala der Zustandsklasse ZKG) resultiert aus dem vorläufigen Sanierungsziel des Netzbetreibers. Bei einem Sanierungsziel, zunächst die Haltungen der Zustandsklassen 0 und 1 zu sanieren, ist die Interventionsklasse IKD 1, d. h. Haltungen welche die Schäden Zustandsklassen ZKG 0 oder ZKG 1 aufweisen werden als vordringlich sanierungsbedürftig deklariert.

Falls der Netzbetreiber seine vorläufigen Sanierungsziele differenziert (z. B. zwischen Regen- und Schmutzwasserhaltungen), gelten für diese unterschiedlichen Interventionsklassen mit der Konsequenz, dass gleichen Schadensbildern ggf. unterschiedliche Dringlichkeiten zugeordnet werden.

Einflusslängen von Schäden

Die Klassifizierung der Substanz hängt im Bietigheimer Modell wesentlich von der Anzahl und Schwere der Einzelschäden ab. Daneben spielt die Verteilung der Schäden über die Haltungslänge eine Rolle. So beeinträchtigen nach Bietigheimer Modell beispielsweise 6 Einzelschäden der Länge 0,5 m die Substanz stärker als ein Streckenschaden gleicher Klasse mit 3 m Länge. Wenn die Einzelschäden über die ganze Haltung verstreut sind, beeinträchtigen sie die Substanz stärker, als wenn sie dicht beieinanderliegen oder sich sogar überlagern.

Die Bewertungslogik des Bietigheimer Modells berücksichtigt diese Tatsache dadurch, dass jedem Einzelschaden eine Einflusslänge von mehreren Metern zugeordnet wird (im weiteren Verlauf 3 m). Streckenschäden wird ebenfalls mindestens diese Einflusslänge zugeordnet. Falls Schäden dicht beieinander liegen, überlagern sich deren Einflusslängen auf Teilstrecken. Im Überlagerungsbereich wird für jede Zustandsklasse (ZKD, ZKS, ZKB, ZG) die jeweils niedrigste Klassen-Einstufung festgelegt. Die Überlagerungslogik bewirkt, dass benachbarte Schäden in der Summe eine geringere Einflusslänge aufweisen als voneinander entfernte Schäden.

Kalibrierung der Reparaturbereitschaft

Die Reparaturbereitschaft wird im Bietigheimer Modell definiert als maximaler Anteil der Einflusslängen von Schäden die repariert bzw. teilsaniert werden (im nachfolgenden Text werden 33 % angenommen). Wenn die Einflusslängen diesen Anteil überschreiten, kommt für eine Zustandsverbesserung nur eine Gesamtsanierung (Renovierung oder Erneuerung) in Betracht.

Bei der Festlegung des konkreten Prozentsatzes der Reparaturbereitschaft ist ihre Wechselwirkung mit den festzulegenden Einflusslängen zu beachten, d. h. die Einflusslängen (z. B. 3 m) und die Reparaturbereitschaft (z. B. 33 %) müssen koordiniert festgelegt werden, um die reale Sanierungspraxis des Netzbetreibers abzubilden.

Diese Kalibrierung erfolgt zweckmäßigerweise anhand einer Auswahl von Haltungen im Grenzbereich zwischen Teil- und Gesamtsanierung. Wenn der Netzbetreiber die Hälfte dieser Haltungen teilsanierte, dann sollten Einflusslänge und Reparaturbereitschaft so festgelegt werden, dass das Modell ebenfalls für die Hälfte der Haltungen eine Teilsanierung (d. h. Reparatur oder Teilerneuerung) vorsieht.

Ermittlung der Substanzklasse

Die Substanzklasse nach Bietigheimer Modell ergibt sich aus den kumulierten Einflusslängen der Einzelschäden in einer Haltung sowie der Reparaturbereitschaft. Bild 14 zeigt beispielhaft die kumulierte Länge der prozentualen Einflusslängen in einer Haltung. Die rote waagerechte Linie markiert die Grenze der Reparaturbereitschaft. Daraus ergibt sich, dass die Schäden der Zustandsklassen 0 und 1 im Rahmen der Reparaturbereitschaft repariert werden können.

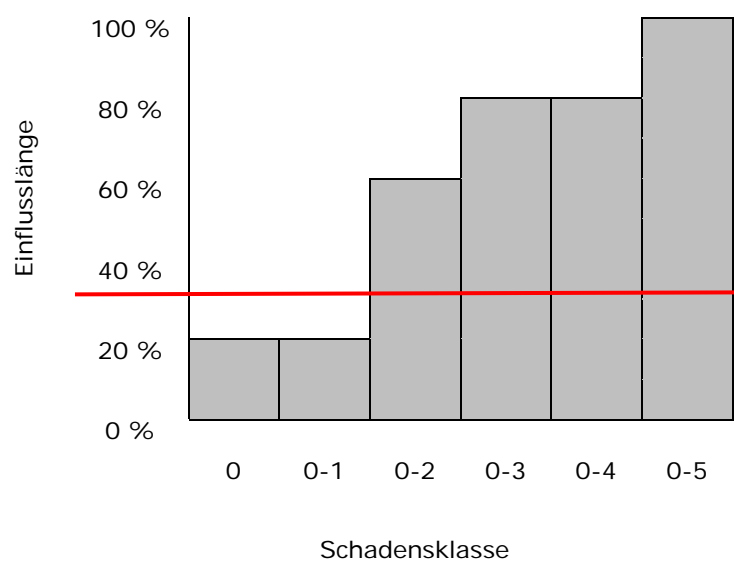


Bild 14: Feststellung der Substanzklasse nach Bietigheimer Modell

Als Folge der potentiellen Reparatur würde sich die Zustandsklasse von 0 auf 2 verbessern. Diese potentiell erreichbare Zustandsklasse ist ein Erfolgsindikator für eine in Betracht gezogene Reparatur. Sie wird im Bietigheimer Modell als Substanzklasse definiert.

Analog zu den Einzelschäden wird die Substanzklasse SKG auch schutzzielbezogen berechnet, also als

- SKD: Substanzklasse Dichtheit,
- SKS: Substanzklasse Standfestigkeit und
- SKB: Substanzklasse Betriebssicherheit.

Bei der Berechnung dieser Substanzklassen werden ausschließlich Zustandsklassen des jeweiligen Schutzzieles (Dichtheit / Standsicherheit / Betriebssicherheit) berücksichtigt. Damit wird die Information der Substanzklassen SKD, SKS und SKB präzisiert. Die jeweils schlechteste Substanzklasse zeigt an, welches Schutzziel am stärksten beeinträchtigt ist und damit die Substanzklasse Gesamt SKG bestimmt hat.

3.2.2.4 stratIS-kanal

In stratIS-kanal werden in Hinblick auf die Ziele eines mittel- und langfristigen Kanalmanagements sowie zur Substanzbewertung folgende Haupt-Kennwerte gebildet:

- relativer Substanzwert gemäß DWA-A 143-14 (DWA, 2017),
- relative Abnutzung (sowie daraus abgeleitet die Abnutzungs-/Substanzklasse) sowie
- erforderliche Sanierungsart (Reparatur, Renovierung, Erneuerung) aus einer durch umfangreiche Algorithmen berechneten automatischen Sanierungsplanung.

Der relative Substanzwert einer Haltung wird gemäß DWA-A 143-14 (vgl. Glossar bzw. DWA, 2017) klassifiziert. Ist bereits zum Bewertungsstichtag eine Erneuerung fällig, beträgt der rel. Substanzwert = 0. Liegt der Erneuerungszeitpunkt in der Zukunft, wird die Restnutzungsdauer (als Maß für den Abnutzungsvorrat) ermittelt. Die Restnutzungsdauer (Abnutzungsvorrat) bezieht sich dabei auf die erwartete technische Restnutzungsdauer (vgl. Glossar bzw. DWA, 2017). Die (optimale) Restnutzungsdauer des Objektes wird dabei aus dem Zustandsbefund über Wirtschaftlichkeitsberechnungen auf Basis des konkreten, monetären Sanierungsaufwandes sowie der erwarteten Erneuerungskosten ermittelt. Zusätzlich wird die relative Abnutzung berechnet, die sich aus dem Verhältnis der erforderlichen Instandhaltungskosten zu den Erneuerungskosten (Wiederbeschaffungszeitwert) ergibt. Aufbauend auf der rel. Abnutzung wird schließlich die Substanzklasse ermittelt. Die Substanzklassifizierung kann sowohl mit als auch ohne Berücksichtigung des Alters einer Haltung durchgeführt werden. Ebenfalls können weitere, über den optischen Zustandsbefund hinausgehende Einflüsse (z. B. hydraulische Erneuerungen, systemische Umbauten im Kanalnetz, Erkenntnisse über Muffendichtheit) berücksichtigt werden (vgl. Wolf, 2006; Lichtenberg und Wolf, 2018 und Wolf, 2007).

Modellvorstellung von stratIS-kanal ist ein an die operative Ingenieurplanung angelehntes objektscharfes Sanierungskonzept für die Einzelobjekte und für das Gesamtnetz. Theoretisch könnte die Substanzbewertung aus den Kenndaten einer manuellen, objektscharfen Ingenieurplanung abgeleitet werden. Eine derartige Planung wird allerdings meist schon an der personellen Kapazität scheitern. Entsprechend wurde mit stratIS-kanal ein Planungswerkzeug entwickelt, das in der Lage ist eine automatische Sanierungsplanung zu berechnen. Abhängig von Lage, Schwere, Ausmaß und Verteilung der Schäden im Objekt werden konkrete Sanierungsalternativen und -kosten bestimmt sowie die wirtschaftlichste Sanierungsart (Reparatur / Renovierung / Erneuerung) ausgewählt. Die Sanierungs- und Entscheidungsgrundsätze werden dabei auf die Belange des Kanalnetzbetreibers abgestimmt. Für Zwecke der Substanz- bzw. Abnutzungsermittlung werden alle relevanten Schäden berücksichtigt. Für die Zwecke der operativen Sanierungsplanung wird der Sanierungsumfang an die spezifischen Ziele und Randbedingungen des konkreten Kanalnetzbetreibers (Sanierungsstrategie) angepasst.

Klassifizierung der Einzelschäden

Die Klassifizierung der Einzelschäden (bzw. Festlegung der Schadensklasse in Hinblick auf die Sanierungsdringlichkeit) erfolgt bei stratIS-kanal gem. DWA-M 149-3 (DWA, 2015a). Dabei wird von den drei schutzzielbezogenen²³ Einzelschadensklassen das Minimum als Klasse für die einzelne Feststellung ermittelt und im Weiteren verwendet. Die Einzelschadens- und Zustandsklassen bilden eine Grundlage für die Modellierung der Zustandsverschlechterung in Hinblick auf die Sanierungsdringlichkeit, insbesondere zur Bestimmung des voraussichtlichen Zeitpunktes der Intervention (Zeitpunkt der Sanierung) für Schäden mit mittel- und langfristiger Relevanz (vgl. auch Interventionsklasse) bei Nutzung von stratIS-kanal als Prognosemodell.

Zuordnung möglicher Sanierungsverfahren

stratIS-kanal verfolgt u. a. den Ansatz der Berechnung eines automatischen Sanierungskonzeptes. In enger Anlehnung an die manuelle Bearbeitung durch einen fachkundigen Ingenieur werden die aus der optischen Inspektion vorliegenden Befunde analysiert, Sanierungsalternativen (mehrere Reparaturalternativen, Renovierung, Erneuerung) und deren Kosten bestimmt sowie auf Basis einer Kostenvergleichsrechnung die wirtschaftlichste Sanierungsalternative ermittelt. Eine detaillierte Entscheidungsmatrix definiert, in Abhängigkeit vom Ausmaß (sowie Randbedingungen), für welche Schadensbilder, welche Sanierungsmaßnahmen in Frage kommen. Angesetzt werden üblicherweise

²³ Schutzziele:

- Dichtheit (D)
- Standsicherheit (S)
- Betriebssicherheit (B)

verwendete Reparaturmaßnahmen (z. B. unterschiedliche Roboter, Manschetten, Partliner, Teilerneuerung usw.) sowie Renovierung und Erneuerung. Bei gravierenden Schadensbildern, bei denen eine Innensanierung nicht möglich ist, werden ggf. Teilerneuerungen angesetzt. Die Kosten werden, sofern notwendig, abhängig von DN, Material, Tiefe und Verhältnis differenziert bestimmt.

Bei der Berechnung des Sanierungskonzeptes werden wesentliche Bearbeitungsschritte analog zur Ingenieurbearbeitung umgesetzt. Maßnahmen werden auf der Haltung stationiert, Überlappungen beseitigt, zusammenliegende Maßnahmen, sofern sinnvoll, zusammengelegt. Anschlüsse werden, sofern notwendig, wieder eingebunden oder nach Renovierung aufgefräst. Insgesamt wird in stratIS-kanal die Methodik einer Ingenieurplanung gemäß DIN EN-Regelwerk und DWA-Empfehlungen umgesetzt. Damit ist stratIS-kanal in der Lage, transparent und nachvollziehbar auch große Kanalnetze (in Anlehnung an eine manuelle Bearbeitung) in Hinblick auf Sanierungsbedarf, -art und -kosten automatisiert auszuwerten. Die im Rahmen des automatischen Sanierungskonzeptes berechneten Ergebnisse können anschließend in weiteren Schritten, je nach Bedarf, durch manuelle Ergänzungen verfeinert werden, ohne das Grundkonzept der Ingenieurplanung zu verlassen. Bild 15 zeigt beispielhaft das Ergebnis der automatischen Sanierungsplanung für eine Haltung anhand eines Haltungsprotokolls.

Ebenso können Varianten berechnet und damit unterschiedliche Handlungsweisen (z. B. Sanierungsumfänge) verglichen sowie deren Auswirkungen auf Sanierungsarten und -kosten direkt und praxisnah bewertet werden.

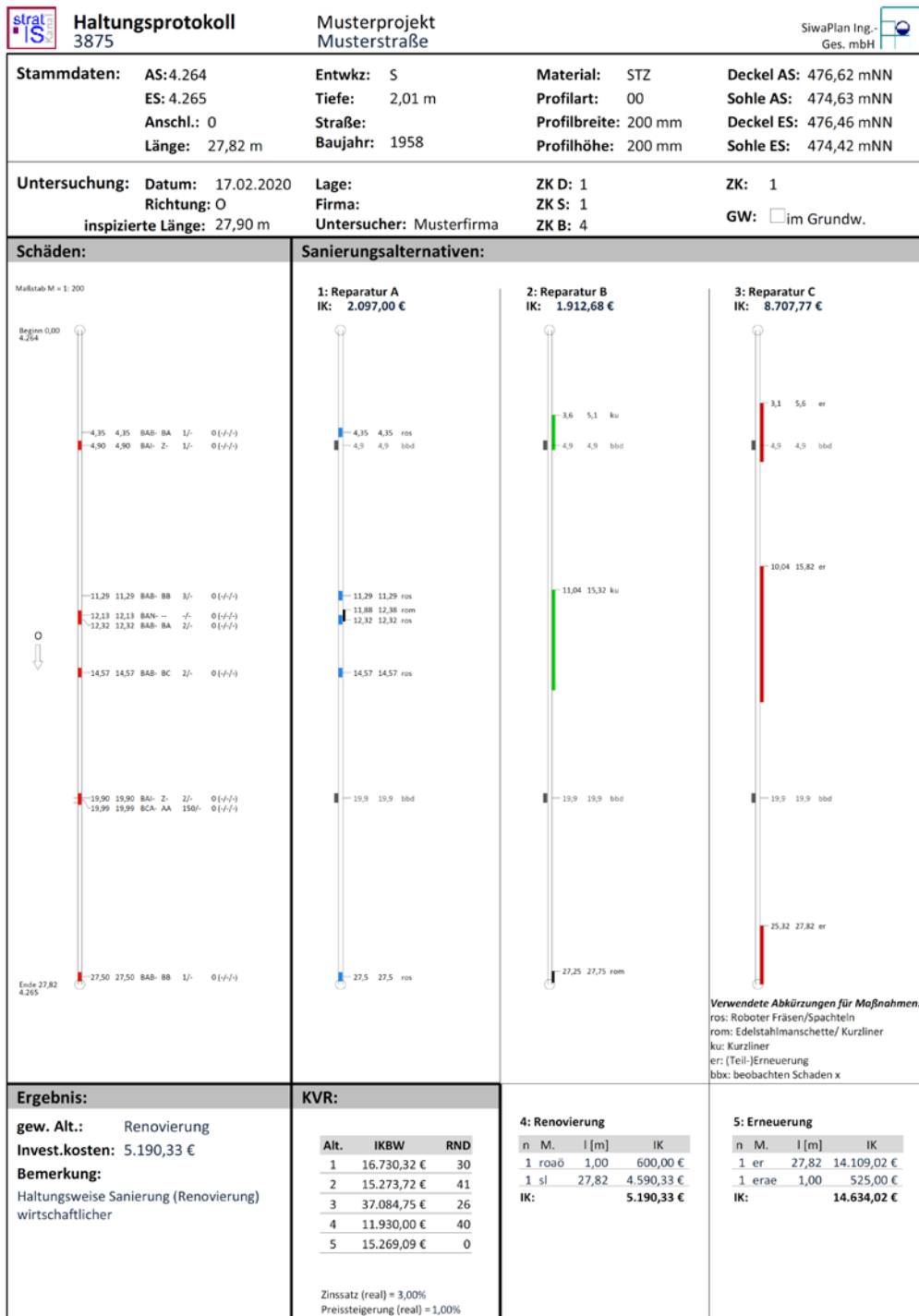


Bild 15: Haltungsprotokoll und automatische Sanierungsplanung für eine Haltung gem. stratIS-kanal

Bestimmung der (Rest)nutzungsdauern

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsberechnung unter Berücksichtigung einer möglichen Zustandsverschlechterung über die Zeit wird in stratIS-kanal die Zeitdauer bestimmt, innerhalb derer eine Instandhaltung (Reparatur) gegenüber einer Erneuerung wirtschaftlicher ist (optimale Restnutzungsdauer). Bei geringer Schädigung ergibt sich eine lange Restnutzungsdauer, mit zunehmendem Sanierungsaufwand sinkt die Restnutzungsdauer. Eine Haltung, die erneuert werden muss, hat die Restnutzungsdauer Null (oder bei Nutzung der Instandhaltungskosten zur Bewertung eine sehr geringe Restnutzungsdauer). Die Restnutzungsdauer (entsprechend der (festgelegten) Nutzungsdauer abzgl. Alter) stellt damit ebenfalls einen Kennwert zur Beurteilung des Kanalzustandes dar. Sie hat gegenüber den Instandhaltungskosten den Vorteil einer breiteren Streuung (durch andere Skalierung). Eine schnelle Zustandsverschlechterung lässt Reparaturmaßnahmen gegenüber haltungsweisen Maßnahmen früher unwirtschaftlich werden (und reduziert dadurch die zu erwartende Restnutzungsdauer). Im Modellkonzept stratIS-kanal wird die Restnutzungsdauer als Erwartungswert der konkreten Lebenserwartung verwendet. Die Zustandsverschlechterung in Hinblick auf die Restnutzungsdauer wird im Zuge von Alterungs- und Zustandsprognosen analysiert und bestimmt.

Bestimmung der Projektkostenbarwerte der Sanierungsalternativen

Mit den "Leitlinien zur Kostenvergleichsrechnung" (LAWA et al., 2012) sind die Barwert- und Annuitätenberechnung als Methode der dynamischen Investitionsrechnung praxisbezogen erläutert. Die Nutzengleichheit der betrachteten Alternativen stellt eine Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieser Methodik dar.

Die Berücksichtigung der Zahlungszeitpunkte erfolgt nach der Vorstellung, dass eine gleich hohe Zahlung zu einem späteren Zeitpunkt geringer zu bewerten ist; entweder, weil bei erforderlicher Darlehensaufnahme Finanzierungskosten entfallen, oder weil vorhandenes Kapital nicht gebunden wird. Dieser betriebswirtschaftlich übliche Ansatz der Investitionsentscheidung minimiert die gebührenwirksamen Kosten und führt gegenüber statischen Ansätzen der Investitionsentscheidung, welche die Zahlungszeitpunkte nicht bewerten, zu der Tendenz, bei festem Investitionsbudget zahlreichere Projekte mit kürzeren Nutzungsdauern zu realisieren. Dies scheint insbesondere in Anbetracht eines limitierten Budgets zur Sanierung zahlreicher Kanalschäden sinnvoll. Diese Methodik wird von stratIS-kanal umgesetzt.

Bestimmung der Substanz und Abnutzung

In der Praxis wird der Sanierungsumfang (d. h. die Auswahl der für die Sanierung vorgesehenen Schäden) von den Präferenzen, Prioritäten und Möglichkeiten des Kanalnetzbetreibers individuell vorgegeben. Alternativ wird für den Netzbetreiber der für seine konkreten Bedürfnisse, Ziele und Randbedingungen optimale Sanierungsumfang im Rahmen von Strategieüberlegungen bestimmt.

Häufig wird unter Berücksichtigung der Kapazitäten und Ressourcen der Sanierungsumfang für die operative Sanierungstätigkeit eingeschränkt und eine Auswahl der zu sanierenden Schäden getroffen. Die operative Sanierungstätigkeit ist insofern immer netzbetreiberspezifisch. Sie kann in stratIS-kanal für die Zwecke der Sanierungsplanung entsprechend angepasst werden.

Eine objektive (Substanz- oder Abnutzungs-)Bewertung von Haltungen oder eines Kanalnetzes ist jedoch unabhängig von den individuellen Vorgaben eines Kanalnetzbetreibers. Hierzu sind, unabhängig von individuellen strategischen Vorgaben oder sonstigen Erwägungen des Netzbetreibers, alle Schäden heranzuziehen. Zu diesem Zweck wird stratIS-kanal in der Rolle eines objektiven Schadensgutachters eingesetzt, vergleichbar mit einem Kfz-Schadensgutachter, der den Zustand eines geschädigten Autos beurteilt. Dabei müssen alle Schäden berücksichtigt und bewertet werden (wobei stratIS-kanal hierbei Schadensbilder, die nach allgemeiner und vorausschauender Ingenieurpraxis als unbedenklich eingestuft werden, auch als solche berücksichtigt). Eine Einschränkung oder Filterung von Schäden ergibt für die Zwecke einer „gutachterlichen“ Bewertung des Zustands eines Autos / einer Haltung keinen Sinn. Für Aufgaben im Sinne einer Abnutzungs-/Substanzbewertung werden im Modellkonzept stratIS-kanal deshalb sämtliche Schäden herangezogen. Dies entspricht einem ggf. theoretischen Sanierungsumfang bzw. einem in technischer Hinsicht optimalen Sanierungsszenario mit dem Ziel, einen neuwertigen Zustand wiederherzustellen. Für Zwecke der operativen Sanierungsplanung werden zusätzliche Szenarien (z. B. mit einem auf den Netzbetreiber abgestimmten Sanierungsumfang) berechnet.

Ermittlung des relativen Substanzwertes

Der Substanzwert (SW) eines Netzbestandteils kann maximal seinem Wiederbeschaffungswert (WBW) entsprechen. Der Substanzwert wird durch die eingetretene Anlagenalterung bzw. Zustandsverschlechterung reduziert. Beschreibt man die altersbedingte Zustandsveränderung durch den Zusammenhang zwischen Alter und technischer Nutzungsdauer des betreffenden Netzbestandteils, lässt sich dessen Substanzwert näherungsweise gem. Gleichung 7 ausdrücken.

Die Berechnung des rel. Substanzwertes erfolgt pro Objekt in stratIS-kanal in Anlehnung an ein Abschreibungsmodell (linearer Verlauf, optional andere Verläufe (degressiv)) sowie an die Definition in DWA-A 143-14 (DWA, 2017). Dabei werden Einflussgrößen wie Baujahr (Alter) oder Restnutzungsdauer (Abnutzungsvorrat) berücksichtigt.

$$SW_i = WBW_i \cdot \left(1 - \frac{Alter_i}{techn. Nutzungsdauer_i}\right) \quad \text{Gleichung 7}$$

mit: SW_i : Substanzwert des betreffenden Netzbestandteils i

WBW_i : Wiederbeschaffungswert

Der rel. Substanzwert ist ein kontinuierlicher Wert zwischen 0 bis 1. Er beträgt 1 zum Zeitpunkt des mängelfreien Neubaus. Wird für das Objekt eine Erneuerung benötigt, beträgt er 0.

Ermittlung der Abnutzung, rel. Abnutzung sowie Substanzklasse

Für die Ermittlung der Abnutzung im Sinne von *SubKanS* (d. h. u. a. ohne Berücksichtigung des Objektalters) werden die erforderlichen Instandhaltungskosten (d. h. Sanierungskosten) als Maß für die Abnutzung verstanden. Somit ergibt sich die relative Abnutzung als Verhältnis der Instandhaltungskosten zu den Erneuerungskosten auf der Skala von 0 bis 1. Für schadensfreie Haltungen beträgt die rel. Abnutzung 0 bzw. der Abnutzungsvorrat 1. Die Abnutzung einer Haltung, die auf gesamter Länge schwer geschädigt ist, beträgt 1. Der rel. Abnutzungsvorrat berechnet sich aus 1 - rel. Abnutzung. Es ergibt sich ein kontinuierliches Wertespektrum. Ist eine Klassenbildung (z. B. zur Bildung einer Substanzklasse) erforderlich, wird (zur Zeit) die in Tabelle 16 dargestellte Klasseneinteilung herangezogen.

Tabelle 16: Zuordnung relative Substanz zu einer Substanzklasse gemäß Modellverständnis stratIS-kanal

Substanzklasse	Abnutzungsvorrat	Qualitative Beschreibung
Klasse 0	< 0,30	Substanz aufgebraucht, Investition sicher erforderlich
Klasse 1	≥ 0,30 bis < 0,45	Substanz erheblich geschädigt, erheblicher San.-Bedarf, eher investiv
Klasse 2	≥ 0,45 bis < 0,60	Substanz erheblich geschädigt, erheblicher San.-Bedarf, eher Reparatur
Klasse 3	≥ 0,60 bis < 0,90	Substanz geschädigt, deutlicher Reparatur-Bedarf
Klasse 4	≥ 0,90 bis < 1,00	Substanz weitgehend vorhanden, geringer Rep.-Bedarf
Klasse 5	=1	Substanz vollständig erhalten, kein San.-Bedarf

Zusätzlich wird im Modell stratIS-kanal eine Bewertung über den „idealen Substanzwert“ durchgeführt, um die Besonderheiten in der Bewertung von jungen bzw. alten Netzen zu berücksichtigen (Wolf, 2006).

3.2.2.5 •••kokas•

Im Modell •••kokas• werden aus dem durch optische Inspektion bekannten Schadensbild nach technischen Kriterien (verfügbare Verfahren und deren Einsatzgrenzen, Präferenzen des Netzbetreibers) konkrete Sanierungsmaßnahmen und daraus Sanierungskosten abgeleitet sowie mögliche Sanierungsalternativen bestimmt bzw. bewertet.

Entsprechend soll mit dem Modell •••kokas• ein an die operative Ingenieurplanung angelehntes „automatisches“, objektscharfes Sanierungskonzept für Einzelobjekte abgebildet werden (vgl. Bild 16).

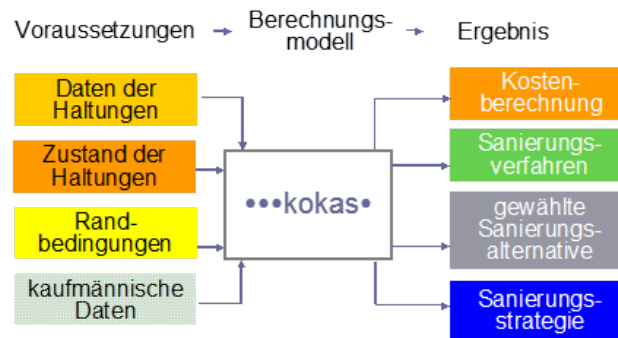


Bild 16: Berechnungsmodell •••kokas• - Eingangsgrößen und Ergebnisse

Klassifizierung der Einzelschäden

Die Klassifizierung der Einzelschäden (bzw. Festlegung der Einzelschadensklasse in Hinblick auf die Sanierungsdringlichkeit) erfolgt gem. DWA-M 149-3 (DWA, 2015a). Dabei wird von den drei schutzzielbezogenen²⁴ Einzelschadensklassen das Minimum als Klasse für die einzelne Feststellung ermittelt und im Weiteren verwendet. Die Einzelschadens- und Zustandsklassen sowie die technischen Randbedingungen für den Einsatz verschiedener Sanierungsverfahren bilden die Grundlage zur Bestimmung des voraussichtlichen Zeitpunktes der Intervention (Zeitpunkt der Erneuerung bzw. wirtschaftliche Restnutzungsdauer der zu sanierenden Haltung).

²⁴ Schutzziele:

- Dichtheit (D)
- Standsicherheit (S)
- Betriebssicherheit (B)

Zuordnung technisch möglicher Sanierungsverfahren

In **•••kokas•** werden für jedes Objekt (Haltung) mehrere Sanierungsalternativen aufgestellt. Zum einen wird jedem Einzelschaden bzw. Streckenschaden in Abhängigkeit von Schadenskode, -ausmaß, Randbedingungen, Material, Kanalart etc. ein Reparaturverfahren zugeordnet. Darüber hinaus werden die Möglichkeiten haltungs[abschnitts]weiser Sanierungen (Inliner, Partliner, Teilerneuerung oder Erneuerung) in Betracht gezogen.

Bestimmung der (Rest)nutzungsdauern und der Projektkostenbarwerte der Sanierungsalternativen

Die Wirtschaftlichkeit einer Sanierungsmaßnahme wird mit einer Kostenvergleichsrechnung (KVR) nach Maßgabe der Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (LAWA et al., 2012) geprüft. Die Kostenvergleichsrechnung ermöglicht den wertmäßigen Vergleich der zu verschiedenen Zeitpunkten anfallenden Kosten; sie wird mit dem Berechnungsmodell **•••kokas•** durchgeführt.

Zur Durchführung der KVR müssen für sämtliche technisch möglichen Sanierungsarten die anfallenden Kosten sowie die jeweiligen Nutzungsdauern bekannt sein. In die Vergleichsrechnung werden auch die Reinvestitionskosten einbezogen, die während der Restnutzungsdauer der zu sanierenden Haltung anfallen (siehe Bild 17). Sanierungsverfahren, bei denen die Einsatzbedingungen, Nutzungsdauer und Kosten der Verfahren näherungsweise übereinstimmen, werden zusammengefasst.

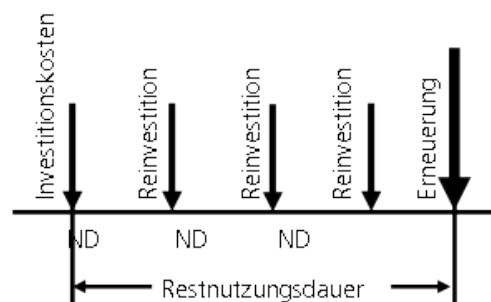


Bild 17: Berechnungsmodell **•••kokas•** - Schematische Darstellung des Investitionsverlaufes

Um den Einfluss von Kostensteigerungen und Zinsen zu berücksichtigen, werden sämtliche Investitions- und Reinvestitionskosten durch Multiplikation mit Diskontierungsfaktoren auf einen Betrachtungszeitpunkt bezogen. Die Summe der über einen Betrachtungszeitraum angefallenen Barwerte entspricht dem Projektkostenbarwert. Der anzusetzende Realzinssatz berücksichtigt den nominalen Marktzins und die Inflationsrate. Ein niedriger Zinssatz begünstigt investitionsintensive Alternativen (z. B. Erneuerungen), ein hoher Zinssatz dagegen Alternativen mit häufigen Reinvestitionen (z. B.

Reparaturen). Die Leitlinien empfehlen, für langlebige wasserwirtschaftliche Maßnahmen einen realen Zinssatz von 3 % p.a. anzusetzen (LAWA et al., 2012).

Die Summe der über den gesamten Betrachtungszeitraum anfallenden Barwerte entspricht dem Projektkostenbarwert (PKBW). Entscheidend für die Höhe des Projektkostenbarwertes und damit für die Entscheidung zugunsten einer Sanierungsalternative ist die wirtschaftliche Restnutzungsdauer einer Haltung. Die wirtschaftliche Restnutzungsdauer wird überschritten, wenn die für die Instandhaltung anfallenden Kosten den Nutzen übersteigen. Das Ende der wirtschaftlichen Restnutzungsdauer ist durch den Zeitpunkt gekennzeichnet, zu dem sich Sanierungs- und Erneuerungsanteil des Projektkostenbarwerts entsprechen. Bei Ermittlung der kostengünstigsten Sanierungsalternative wird berücksichtigt, dass die zeitliche Abfolge der Sanierungsarten in unterschiedlicher Reihenfolge erfolgen kann.

Bei der Ermittlung der wirtschaftlichen Restnutzungsdauer einer Haltung werden alle Schäden berücksichtigt; es handelt sich somit um eine haltungsweise prognostizierte Restnutzungsdauer, die aus Art und Umfang der Schäden sowie entsprechendem Sanierungsaufwand abgeleitet wird. In einem zweiten Schritt werden die Maßnahmen zur Sanierung der sanierungsbedürftigen Schäden ermittelt. Unter Berücksichtigung der zuvor ermittelten wirtschaftlichen Restnutzungsdauer wird die Sanierungsalternative mit dem geringsten PKBW als die wirtschaftlichste Sanierungsalternative ausgewiesen.

Eine mögliche Zustandsverschlechterung mit der Zeit durch „Alterung“ führt zu einer Zunahme der Schädigung in Form von neuen Schäden oder einer Ausdehnung bereits vorhandener Schäden. Dadurch steigen die Instandhaltungskosten (Reparaturkosten) einer Haltung über die Zeit an. Die Zunahme der spezifischen Instandhaltungskosten kann durch eine Kostensteigerungsrate, differenziert nach Haltungstypen, berücksichtigt werden. Diese Kostensteigerung für Instandhaltungsmaßnahmen führt bei geschädigten Haltungen ggf. zu einer Verringerung der wirtschaftlichen Restnutzungsdauer, da sich Reparaturmaßnahmen im Vergleich zu Renovierung bzw. Erneuerung verteuern.

Um dieses Alterungsverhalten abzubilden, werden für charakteristische Typen von Haltungen die ermittelten Instandhaltungskosten über das Baujahr aufgetragen und hieraus der Kostensteigerungsfaktor abgeleitet. Die Haltungen eines charakteristischen Typs weisen dabei ein ähnliches Alterungsverhalten auf.

Festlegung von Sanierungsverfahren

Basierend auf der Kostenvergleichsrechnung ermittelt das Berechnungsmodell **•••kokas•** für jede Haltung die wirtschaftlichste Sanierungsart. Bei der Umsetzung der Maßnahmen ist neben der Wirtschaftlichkeit zudem die Auswirkung der Baumaßnahme auf das städtische Umfeld zu berücksichtigen. Das beinhaltet ökologische Aspekte (Beeinflussung von Natur, Boden und Grundwasser) sowie

sozioökonomische Aspekte (Beeinträchtigung von Wohn- und Lebensqualität, Beeinträchtigung des Verkehrs sowie wirtschaftliche Folgewirkungen).

Dies hat zur Folge, dass im Zuge der Umsetzung teils von der ursprünglich wirtschaftlichsten Sanierungsmaßnahme abgewichen und eine alternative Haltungssanierung vorgezogen wird (Erneuerung statt Reparatur oder Renovierung bzw. Renovierung statt Reparatur). Diesem Umstand trägt das Modell **•••kokas•** Rechnung, indem über einen bei der Kostenvergleichsrechnung angesetzten Nachhaltigkeitsfaktor (NF) der höherwertigen Sanierungsart ein Vorrang eingeräumt wird.

Ermittlung des relativen Substanzwertes

Der relative Substanzwert wird aus dem Verhältnis aus wirtschaftlicher Restnutzungsdauer zu technischer Restnutzungsdauer einer Haltung ermittelt. Ein relativer Substanzwert von 100 % entspricht einer schadensfreien Haltung; 0 % hingegen entspricht einer Haltung, die aus technischen und wirtschaftlichen Gründen ausschließlich mittels Erneuerung zu sanieren ist.

Die Zwischenwerte zwischen 100 % und 0 % bilden den Werteverzehr der Haltung ab. Haltungen, die aus wirtschaftlichen Gründen eine Erneuerung bedürfen (wRND = 0 Jahre), aber auch mittels Reparaturen instandgesetzt werden können, haben einen relativen Substanzwert in Höhe des Verhältnisses zwischen Instandsetzungsaufwand und Wiederbeschaffungswert.

3.2.2.6 RERAU-Methode (Frankreich)

Im Rahmen des französischen RERAU-Programms zur Sanierung städtischer Kanalnetze wurde ein methodischer Ansatz zur Beurteilung des Zustandes und der Substanz von Abwasserkanälen entwickelt (Le Gauffre et al., 2007). Basierend auf dem RERAU-Konzept wurden mehrere Bewertungsinstrumente entwickelt, darunter die von der Firma Altereo im Rahmen des INDIGAU-Forschungsprogramms entwickelte Software²⁵ oder die Software OCTAVE von Veolia Eau. Die Methodik zielt darauf ab, Abwasserkanäle nach der Schwere der einzelnen Schäden und nach der Schadensdichte zu sortieren. Die Schäden werden anhand von Dysfunktionsindikatoren bewertet. Der Beitrag von jedem Schaden zu den Dysfunktionsindikatoren wird anhand von Tabellen bewertet, die im Rahmen des RERAU-Projekts entwickelt wurden (Le Gauffre et al., 2007).

Bei der RERAU-Methode wird der Zustand einer Haltung bzw. eines Schachtes nach dem schwersten Schaden und der Schadensdichte beurteilt. Schäden bekommen eine Zustandsklasse von G1 bis G4,

²⁵ <http://altereo.fr/en/eau/gestion-patrimoniaire-reseaux/indigau/> (zuletzt geprüft am 18.3.2021)

wobei G4 der schlechteste Zustand für die betroffenen Dysfunktionsindikatoren ist. Diese Zustandsklassen beschreiben die Sanierungsdringlichkeit des Schadens (analog zu DWA-M 149-3 (DWA, 2015a), vgl. Kap. 3.2.1.3).

Für jeden Schaden wird zusätzlich eine Schadensnote N_i ermittelt. Diese Schadensnote wird entsprechend der Schwere α und der Ausdehnung L des Schadens berechnet (siehe Gleichung 8).

$$N_i = \alpha \cdot L \quad \text{Gleichung 8}$$

mit: N_i : Schadensnote
 α : Quantifizierung der Schadensschwere
 L : Schadenslänge

Die Schadensnoten werden anhand zweier komplementärer Ansätze aggregiert. Die Berechnung der Schadensdichte für die ganze Haltung erfolgt gemäß der Gleichung 9.

$$\text{Schadensdichte}_{\text{Haltung}} = \frac{\sum N_i}{\text{Haltungslänge}} \quad \text{Gleichung 9}$$

Die Berechnung der Schadensdichte für bestimmte Haltungsstrecken mit Einheitslänge l erfolgt über Gleichung 10.

$$\text{Schadensdichte}_{\text{kritisch}} = \max \frac{(\sum N_i)_l}{l} \quad \text{Gleichung 10}$$

mit : N_i : Schadensnote
 l : Einheitslänge (Festlegung)

Beispielsweise ist die kritische Schadensdichte für eine Haltung mit einer Länge von 30 m und einer Einheitslänge von 10 m der maximale Wert der Schadensdichte auf den drei Haltungsstrecken 0 – 10 m, 10 - 20 m und 20 - 30 m.

Schadensdichte und kritische Schadensdichte werden jeweils gemäß dreier Schwellenwerte in vier Zustandsklassen (G1 bis G4) unterteilt. Die Auswahl der Schwellenwerte basiert auf Expertenvorschlägen (Cherqui et al., 2008).

Die finale Zustandsklasse einer Haltung ergibt sich als schlechteste Zustandsklasse aus

- Zustandsklasse aus der Schadensdichte,
- Zustandsklasse aus der kritischen Schadensdichte und
- Zustandsklasse aus dem schwersten Schaden.

Die RERAU-Methode ermöglicht die Einstufung der Haltungen nach Sanierungsbedarf und -dringlichkeit. Sie bietet jedoch keine methodologische Unterstützung für die Auswahl eines geeigneten Sanierungshauptverfahrens (Reparatur, Renovierung und Erneuerung).

3.2.2.7 NORVAR-Methode (Norwegen)

Die derzeit in Norwegen angewandte Zustandsklassifizierungsmethode basiert auf dem NORVAR-Bericht 150 (NORVAR, 2007). Die Methodik wurde von Rørinspeksjon-Norge, einer Interessengruppe aus Kommunen und Privatunternehmen aus der Abwasserwirtschaft sowie der Norwegian Water and Wastewater BA entwickelt und zielt darauf ab, Abwasserkanäle nach der Schwere der einzelnen Schäden und nach der Schadensdichte zu sortieren. Die Schadensklassifizierung verwendet das norwegische Kodierungssystem.

Der Berechnungsansatz berücksichtigt analog zur RERAU-Methode (siehe Kap. 3.2.2.6) die Schadensschwere und Schadensdichte innerhalb des untersuchten Objektes. Entsprechend der Schwere und Ausdehnung des Schadens wird zu jedem Schaden eine Schadensnote vergeben. Die Zustandsklasse wird basierend auf der Dichte der Schadensnote in der Haltung – analog zur RERAU-Schadensdichte – berechnet. Eine zusätzliche Punktzahl kann anhand der Abweichung des Wasserspiegels entlang der Haltung berechnet werden, um Hinweise auf mögliche hydraulische Schwächen zu geben. Die finale Zustandsklasse wird als Summe aus Zustandsklasse und einer zusätzlichen Punktzahl P_x berechnet. Die Punktzahl P_x ergibt sich aus Schadensbild und Schadensschwere. Dabei wird Schäden wie Rissbildung, Infiltration oder verschobene Verbindung eine höhere Gewichtung zugeordnet, so dass sie mit einer höheren Priorität in die Berechnung einfließen. Für verschiedene Einzelfeststellungen ist die zusätzliche Punktzahl P_x der NORVAR-Methode beispielhaft in Tabelle 17 aufgeführt. Wenn mindestens ein Schaden mit der Schadensstufe 4 bewertet wird, wird die Haltung automatisch in den schlechtesten Zustand eingestuft.

Tabelle 17: Zusätzliche Punktzahl P_x der NORVAR-Methode in Abhängigkeit von Einzelfeststellung und Schadensnote (Auszug aus NORVAR, 2007)

Einzelfeststellung	Schadensnote			
	1	2	3	4
	P_x	P_x	P_x	P_x
Rissbildung	0	2	8	12
Korrosion	0	1	3	9
Materialschäden	0	2	4	6
Verformung	0	1	2	4
Verschobene Verbindung	0	0	5	9
Einragendes Dichtungsmaterial	0	1	2	3
Wurzeln	0	1	5	9
Infiltration	0	1	6	9
Ablagerungen	0	0	1	2
Anhaftende Stoffe	0	1	2	3
Hindernis	0	1	3	9
Einragender Anschluss	0	1	3	9

Ähnlich wie bei RERAU ermöglicht die NORVAR-Methode die Einstufung der Kanalhaltungen nach Sanierungsbedarf und Dringlichkeit der Sanierung, bietet jedoch keine methodologische Unterstützung bei der Auswahl eines geeigneten Sanierungshauptverfahrens (Reparatur, Renovierung und Erneuerung).

3.2.2.8 Manual of Sewer Condition Classification (Großbritannien)

Das vom Water Research Center herausgegebene Handbuch „Manual of Sewer Condition Classification“ (MSCC) wurde in Großbritannien entwickelt, um den Sanierungsbedarf von Abwasserkanälen zu ermitteln (WRc, 2013). Die Methodik bewertet den betrieblichen und baulichen Zustand von Abwasserkanälen hinsichtlich der Schwere der einzelnen Schäden und der Schadensdichte. Alle Schäden werden danach in folgende zwei Kategorien unterteilt:

- Standsicherheit und
- Betriebssicherheit.

Voraussetzung für die Anwendung der Methodik ist eine Inspektion und Kodierung aller Schäden innerhalb des zu beurteilenden Objektes.

Beim MSCC-Ansatz wird für jeden Schaden eine strukturelle und betriebliche Schadenspunktzahl berechnet. Analog zur Schadensbeurteilung bei der NORVAR-Methode wird jedem Schaden eine Gewichtung zugeordnet. Zusammen mit der Schadenslänge wird so eine Schadenspunktzahl berechnet.

Um Standsicherheit und Betriebssicherheit einer Haltung zu bestimmen, werden folgende Größen ermittelt:

- Der „Gesamtwert“, welcher die Summe aller Schadenspunktzahlen im Objekt repräsentiert,
- der „Spitzenwert“, welcher die höchste Schadenspunktzahl darstellt und
- der „Mittelwert“, welcher der gemittelten Schadenspunktzahl des Objektes entspricht.

Die Zustandsklasse wird anschließend über diese drei Werte ermittelt: eine hohe Zustandsklasse (CG 4 und CG 5) repräsentiert dabei eine Haltung in schlechtem Zustand mit hoher Ausfallwahrscheinlichkeit, während eine niedrige Zustandsklasse (CG1 und CG2) für eine Haltung in gutem Zustand mit niedriger Ausfallwahrscheinlichkeit vergeben wird.

Auch hier wird wie bei der RERAU- und der NORVAR-Methode die Einstufung der Kanalhaltungen nach Sanierungsbedarf und Dringlichkeit der Sanierung ermöglicht, allerdings bleiben die Klassifizierung der baulichen Substanz sowie die methodologische Unterstützung bei der Auswahl eines geeigneten Sanierungshauptverfahrens (Reparatur, Renovierung und Erneuerung) außen vor.

3.2.2.9 Gegenüberstellung

Nachfolgend werden die in Deutschland gebräuchlichen Modelle zur Substanzklassifizierung von Abwasserkanälen und Schächten

- Modell gem. Leitfaden zur strategischen Sanierungsplanung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden (DWA-Themenband),
- STATUS_{Kanal},
- Bietigheimer Modell,
- stratIS-kanal und
- •••kokas•

gegenübergestellt (siehe auch Kap. 3.2.2.1 bis 3.2.2.5).

Abnutzungsverständnis

Aus den Modellbeschreibungen geht zunächst hervor, dass den Modellen ein unterschiedliches Verständnis von „Substanz“ bzw. dazu korrespondierend von „Abnutzung“ und „Abnutzungsvorrat“ (vgl. Bild 1) zu Grunde liegt: in einigen Modellen wird die Abbildung einer technischen (Rest)Nutzungsdauer fokussiert, in anderen die einer wirtschaftlichen (Rest)Nutzungsdauer sowie konkreter Sanierungskosten und Sanierungsentscheidungen für die Systemelemente. Zudem erfolgt auch bei vordergründig gleichem Substanzverständnis die Berechnung der (Rest)Nutzungsdauer bzw. des Abnutzungsvorrates höchst unterschiedlich (vgl. Bild 18) bzw. ergeben sich bereits aus der unterschiedlichen Wichtung von Faktoren bzw. Herangehensweisen andere Skalierungen innerhalb eines formal gleichen Wertebereichs.

Alle Modelle bauen zunächst auf standardisiert erfassten Stamm- und Zustandsdaten der Haltungen und Schächte auf (z. B. DWA-M 149-2 (DWA, 2013b)). In der Regel wird die Klassifizierung des Einzelzustands gem. DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) übernommen. Je Modellansatz werden neben diesen technischen Daten auch kaufmännische Daten (wie Restnutzungsdauern, Abschreibungszeiträume etc.) zur Substanzklassifizierung sowie zur Zuordnung des Sanierungshauptverfahrens genutzt.

Der Modellansatz STATUS_{Kanal} und das Bietigheimer Modell bilden tendenziell eine (ingenieurs-)technische Substanzbeurteilung ab. Der Zustand der Haltung sowie die Einschätzung der Schadensschwere und -verteilung sind maßgebend für die Substanzbeurteilung. Die Modelle gem. DWA-Themenband sowie •••kokas• und stratIS-kanal bilden tendenziell eher eine ökonomische (und nachrangig (ingenieurs-)technische) Substanzbeurteilung ab. Neben den technischen Daten werden dort buchhalterische Informationen, wie Nutzungsdauern und Kosten sowie konkrete Sanierungsentscheidungen in der Substanzklassifizierung stärker berücksichtigt.

Prozess	Anbieter	STATUS _{Kanal}	Bietigheimer Modell	DWA Leitfaden	stratiS-kanal	•••kokas•••
	Einzelshaden					
↓	Schadenskodierung					
↓	Schadensklassifizierung					
↓	Substanzklassifizierung	STATUS (ℝ N)				
	Substanzklasse / Abnutzungsvorrat	Substanz [%]	Substanzklasse N (ℝ)	Substanz (ℝ)	<ul style="list-style-type: none"> rel. Substanzwert (0-1) [-] rel. Abnutzung (0-1) [-] Substanzklasse (0-5) 	<ul style="list-style-type: none"> Substanz [%]
↓	Sanierungsart (REP/REN/ERN) Betrieb/Invest		(ingenieurs)technische Zuordnung	(ingenieurs)technische Zuordnung	(ingenieurs)technische-ökonomische Zuordnung	

Bild 18: Prozess der Substanzklassifizierung bei den verschiedenen Modellanbietern in Deutschland (rot: spezifisch festzulegende Parameter; grün: Kennwerte bzw. Berechnungsergebnisse; ℝ bzw. N: reelle bzw. natürliche Zahl)

Datenbasis

Tabelle 18: Für den Modellvergleich gegenübergestellte Ansätze zur Substanzklassifizierung

Modell	DWA-Themenband	STATUS _{KANAL}	Bietigheimer Modell	strat | S-kanal	••• kokas•
Stammdaten					
Material	-	+	+	O	O
Baujahr	O	O	-	O	+
Nennweite	O	+	-	+	+
Tiefenlage	-	O	-	O	+
Abwasserart (MW, SW, RW)	-	O	-	O	+
Profil	-	+	-	+	O
Länge	+	+	+	+	+
Zustandsdaten					
Zustandsklasse	-	-	+	O	O
Datum Zustandserfassung	-	-	-	O	O
Kodierung	+	+	+	+	+
Schadensklassen	+	O	+	O	O
Dichtheitsprüfung	-	-	O	O	O
Hydraulik	O	+	+	O	O
Kaufmännische Daten					
Einheits- bzw. Baupreise	-	-	-	O	+
Wiederbeschaffungswert	-	-	-	-	-
Abschreibungszeitraum	-	-	-	-	-
Weitere Informationen					
Baugrundverhältnisse	-	O	-	O	O
Lage im Verkehrsraum	-	O	-	O	O
Grundwasserstand	-	O	-	O	O
Sanierungshistorie	-	O	-	O	O
Schutzgüter	-	O	-	O	O

Legende: erforderliche (+), nicht erforderliche (-) und optional (O) verwertbare Informationen

Die für die Berechnung der Abnutzung bzw. Substanzklasse sowie zur Zuordnung der Sanierungshauptverfahren spezifisch verwerteten Informationen unterscheiden sich je nach Berechnungsansatz. Die für die Abnutzungsermittlung und die Zuordnung des Sanierungshauptverfahrens je nach

Modell erforderlichen, nicht erforderlichen und optional verwerteten Informationen sind in Tabelle 18 zusammengestellt.

Grundverständnis

Das den Modellen jeweils zu Grunde liegende Verständnis von Abnutzung und Substanzklasse ist in Tabelle 19 skizziert.

Tabelle 19: Grundverständnis Abnutzung und Substanzklasse

Modell	Grundverständnis Abnutzung und Substanzklasse
DWA-Themenband T 4	Die Abnutzung ergibt sich aus der Schwere (und Verteilung) aller in einem Objekt vorhandenen Schäden. Die Bestimmung der Einflusslängen und die Gewichtung der Einzelschadensklassen erfolgt vor dem Hintergrund von Sanierungserwägungen.
STATUS_{KANAL}	Die Abnutzung ergibt sich aus der Schwere und Verteilung aller in einem Objekt vorhandenen Schäden. Die Festlegung der Einzelschadensklassen erfolgt nicht vor dem Hintergrund von Sanierungserwägungen. Einflusslängen (Sanierungslängen) werden nicht bestimmt und nicht verwertet.
Bietigheimer Modell	Die Abnutzung ergibt sich durch Länge (und Verteilung) von Substanzschäden. Dies sind die Schäden, die nach einer Reparatur (soweit technisch/ökonomisch sinnvoll) noch verbleiben.
stratIS-kanal	Die Abnutzung leitet sich aus dem monetär bewerteten konkreten Sanierungsaufwand zur Wiederherstellung eines mängelfreien Zustandes unter Berücksichtigung der Erneuerungskosten ab. Grundidee ist die konkrete, objektscharfe Sanierungskonzeption, analog zu einer ingenieurtechnischen Planung. Schadensüberlappungen und räumliche Verteilung von Schäden im Objekt werden dabei berücksichtigt.
•••kokas•	Die Abnutzung bildet die Sanierungsentscheidung (z. B. Reparatur) ab. Nach der Sanierung (Reparatur) kann das Objekt weiterhin nachrangige Schäden aufweisen.

Sensitivität

Um zu beurteilen, ob diese unterschiedlichen Verständnisse der Abnutzung zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, wird im Folgenden anhand einer exemplarisch ausgewählten Kanalhaltung (*H0000082 bzw. Haltung 82*) die jeweils ermittelte Abnutzung und die Reaktion des Modells auf Änderungen im Schadensbild dargestellt. Bild 19 zeigt das Schadensprotokoll der untersichten *Haltung 82*. Die grafische Darstellung der Klassen des Einzelschadens (in Bild 19 als „Schadensklasse“ bezeichnet und mit SK abgekürzt) gibt einen Überblick über Position, längenmäßige Ausprägung und Sanierungspriorität der einzelnen Feststellungen.

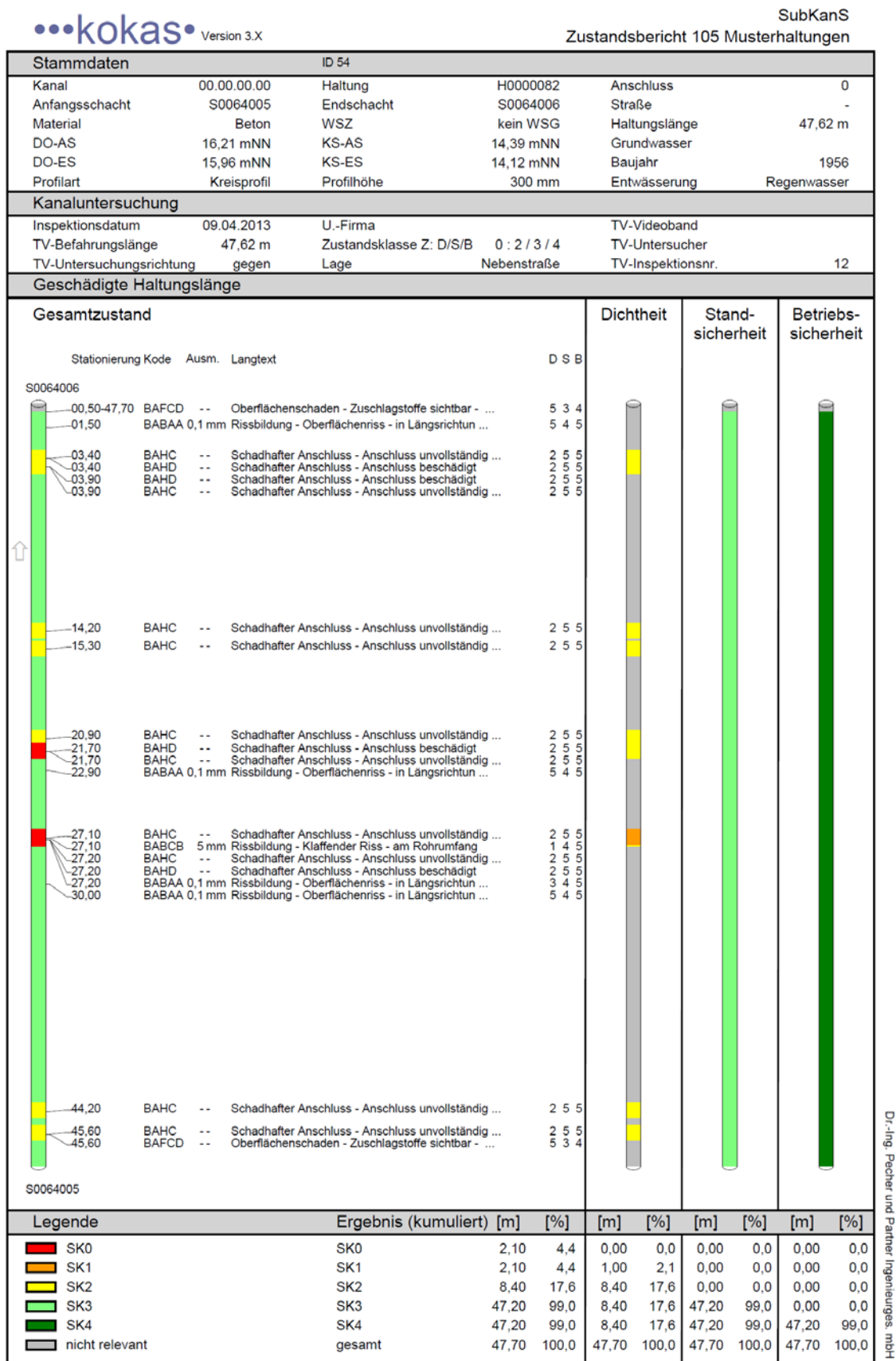


Bild 19: Inspektionsprotokoll Haltung 82 (H0000082) (© Pecher & Partner, Berlin)

Die durch o. g. Modelle für Haltung 82 ausgewiesenen Abnutzungen sind in Tabelle 20 dargestellt.

Tabelle 20: Abnutzungsermittlung der Modellansätze für Haltung 82

Szenario	Modell	Abnutzung	Sanierungsempfehlung
 H0000082 ²⁶	DWA-Themenband	14 %	Renovierung
	STATUS _{KANAL}	77 %	Reparatur
	Bietigheimer Modell	51 %	Reparatur
	stratIS-kanal	7 %	Monitoring
	•••kokas•	-	Reparatur

Nach aktuellem Verständnis ergeben sich die Unterschiede aus den in Tabelle 19 zusammengefassten unterschiedlichen Grundverständnissen; in der Konsequenz reagieren die Modellansätze auf Variation des Schadensbildes unterschiedlich. Dieser Sachverhalt wird durch die in Tabelle 21 bis Tabelle 25 dargestellten Szenarien A bis E diskutiert. Der im jeweiligen Szenario variierte Einzelschaden ist durch die Fußnoten 26 bis 31 beschrieben.

Tabelle 21: Sensitivität der Modellansätze (Szenario A)

Szenario	Modell	Modellreaktion
 A ²⁷	DWA-Themenband	Abnutzung (leicht) niedriger als bei Ausgangsszenario
	STATUS _{KANAL}	Abnutzung (leicht) niedriger als bei Ausgangsszenario
	Bietigheimer Modell	Abnutzung bleibt gegenüber Ausgangsszenario konstant, da der Zustand nach Reparatur identisch ist
	stratIS-kanal	Abnutzung (leicht) niedriger als bei Ausgangsszenario, da eine Reparatur weniger auszuführen ist
	•••kokas•	Abnutzung (leicht) niedriger als bei Ausgangsszenario, da eine Reparatur weniger auszuführen ist

²⁶ Ausgangsszenario: verschiedene Punktschäden der Einzelschadensklasse 2 sowie über die gesamte Haltungslänge ein nachrangiger Streckenschaden der Einzelschadensklasse 3

²⁷ Wegfall eines Punktschadens

Tabelle 22: Sensitivität der Modellansätze (Szenario B)

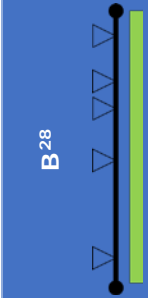
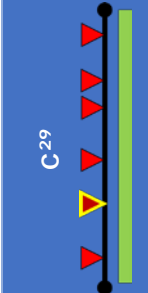
Szenario	Modell	Modellreaktion
	DWA-Themenband	Abnutzung (deutlich) niedriger als bei Ausgangsszenario (keine Sanierung)
	STATUS _{KANAL}	Abnutzung (deutlich) niedriger als bei Ausgangsszenario
	Bietigheimer Modell	Abnutzung (deutlich) niedriger als bei Ausgangsszenario (keine Sanierung)
	stratIS-kanal	Abnutzung = 0 %, da keine Reparatur (und auch sonst keine Maßnahme) auszuführen ist
	•••kokas•	Abnutzung = 0 %, da keine Reparatur (und auch sonst keine Maßnahme) auszuführen ist

Tabelle 23: Sensitivität der Modellansätze (Szenario C)

Szenario	Modell	Modellreaktion
	DWA-Themenband	Abnutzung (leicht) höher als bei Ausgangsszenario
	STATUS _{KANAL}	Abnutzung (leicht) höher als bei Ausgangsszenario
	Bietigheimer Modell	Abnutzung wie im Ausgangsszenario, da der Zustand nach Reparatur identisch ist, (umfangreichere) Reparatur erforderlich
	stratIS-kanal	Variante I (Reparatur weiterhin techn.-ökonom. sinnvoll): Abnutzung (leicht) höher als bei Ausgangsszenario, da lediglich eine weitere Reparatur auszuführen ist Variante II (Reparatur nicht techn.-ökonom. sinnvoll): Abnutzung deutlich höher als bei Ausgangsszenario, da investive Maßnahme (Ren. / Ern.) auszuführen ist
	•••kokas•	Variante I (Reparatur weiterhin techn.-ökonom. sinnvoll): Abnutzung (leicht) höher als bei Ausgangsszenario, da lediglich eine weitere Reparatur auszuführen ist Variante II (Reparatur nicht techn.-ökonom. sinnvoll): Abnutzung deutlich höher als bei Ausgangsszenario, da investive Maßnahme (Ren. / Ern.) auszuführen ist

²⁸ Wegfall sämtlicher Punktschäden

²⁹ Zusatz eines schweren Punktschadens

Tabelle 24: Sensitivität der Modellansätze (Szenario D)



Szenario	Modell	Modellreaktion
	DWA-Themenband	Abnutzung (leicht) niedriger als bei Ausgangsszenario, da der Streckenschaden nur nachrangig ins Gewicht fällt
	STATUS _{KANAL}	Abnutzung niedriger als bei Ausgangsszenario
	Bietigheimer Modell	Abnutzung wie im Ausgangsszenario, da der Zustand nach Reparatur identisch ist, Reparatur (wie im Ausgangsszenario) erforderlich
	stratIS-kanal	Abnutzung identisch zum Ausgangsszenario, da Reparaturaufwand identisch bleibt
	•••kokas•	Abnutzung identisch zum Ausgangsszenario, da Reparaturaufwand identisch bleibt

Tabelle 25: Sensitivität der Modellansätze (Szenario E)

Szenario	Modell	Modellreaktion
	DWA-Themenband	Abnutzung deutlich (um etwa Faktor 2) höher als bei Ausgangsszenario
	STATUS _{KANAL}	Abnutzung höher (um etwa Faktor 1,2) als bei Ausgangsszenario
	Bietigheimer Modell	(Reparatur nicht techn.-ökonom. sinnvoll): Abnutzung deutlich höher als bei Ausgangsszenario, da Haltung auf gesamter Länge saniert wird (Inliner / Ern.)
	stratIS-kanal	Abnutzung wie im Ausgangsszenario, da die Reparaturbereitschaft nach wie vor ausreicht, die Schäden der Klassen 0 und 1 zu beheben, während die Schäden der Klassen 2-4 unrepariert bleiben. Maßnahme: Reparatur (wie im Ausgangsszenario)
	•••kokas•	Reparatur nicht techn.-ökonom. sinnvoll: Abnutzung deutlich höher als bei Ausgangsszenario, da investive Maßnahme (Ren. / Ern.) auszuführen ist

³⁰ Wegfall des Streckenschadens

³¹ Verschlechterung des Streckenschadens (Einzelschadensklasse 2 statt vorher 3)

3.3 Straßen

3.3.1 Einführung

Die Regelwerke für die Straßenerhaltung werden durch die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) erstellt, wobei vor allem die Empfehlung für das Erhaltungsmanagement von Innerortsstraßen (EEMI) (FGSV, 2012) und Arbeitspapier Nr. 9 zur Systematik der Straßenerhaltung (FGSV, 2015) zugrunde zu legen sind. In Letztgenanntem wird durch die Reihe K die Systematik auf kommunale Belange angepasst, wobei Abschnitt K 2 die Zustandserfassung und Abschnitt K 3 die Zustandsbewertung enthält (FGSV, 2015).

Die Zustandsbewertung für Straßen erfolgt nach den „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen“ (ZTV-ZEB-StB) (FGSV, 2018). Die messtechnische Zustandserfassung und -bewertung wird danach in folgende vier Teilprojekte (TP) unterteilt:

- TP1: Ebenheit des Straßenkörpers
- TP2: Griffigkeit der Oberfläche
- TP3: Substanzmerkmale der Oberfläche
- TP4: Bewertung und standardisierte Auswertung

In den Teilprojekten 1 bis 3 werden sämtliche Zustandsgrößen des Straßenkörpers messtechnisch erfasst (Zustandserfassung bzw. -untersuchung). In Teilprojekt 4 werden die erfassten Zustandsgrößen nach einem festgelegten Algorithmus standardisiert ausgewertet (Zustandsbewertung bzw. -beurteilung). Zudem dienen die erfassten Zustandsgrößen als Grundlage für die Erhaltungsplanung.

Im Rahmen der Untersuchung und Beurteilung wird die Straße in gerasterte Bewertungsabschnitte unterteilt. Die Erfassung der Schäden erfolgt über eine visuelle Inspektion (TV-Befahrung) und die Beurteilung über eine Schadensanalyse.

Bei der Zustandserfassung werden sowohl Gebrauchsmerkmale (also bspw. Griffigkeit des Fahrbahnbelags, TP1 und 2) als auch Substanzmerkmale (strukturelle Schäden, TP 3) aufgenommen. Bei den Substanzmerkmalen (Risse, Aufgelegte Flickstellen und Sonstige Oberflächenschäden) wird jeweils die betroffene Fläche als prozentualer Wert vom Straßenabschnitt ermittelt. Für die darauf aufbauende Zustandsbewertung werden drei Prozessschritte unterschieden:

- Normierung
- Verknüpfung der Zustandswerte zu den Teilzielwerten
- Verknüpfung von Teilzielwerten zum Gesamtwert

Im ersten Schritt werden zur Bildung einer Normierungsfunktion drei Stützpunkte entsprechende Zustandsausprägungen zugewiesen (vgl. auch Bild 20). Im zweiten Schritt erfolgt die Verknüpfung

zu den Teilzielwerten Gebrauchs- und Substanzwert (TWSUB). Der dritte Schritt ist für die in *SubKanS* aufgeworfene Fragestellungen nicht relevant, da der Substanzwert als Teilzielwert bereits im Ergebnis des zweiten Prozessschrittes gebildet ist.

3.3.2 Zustandserfassung

Die Untersuchung der Straße erfolgt auf Basis von film- oder videotechnischen Aufzeichnungen der Fahrbahnoberfläche. Dabei werden Längen, Flächenanteile und Anzahl von Oberflächenschäden untersucht. Das Untersuchungsverfahren gewährleistet, dass Rissbreiten ab 1,0 mm sicher festgelegt werden. Die genauen Auswerteregeln der Untersuchung sind in (FGSV, 2018) im Anhang 7 beschrieben.

3.3.3 Zustands- und Substanzbeurteilung

Die in Kapitel 3.3.1 eingeführten Teilprojekte 1 bis 3 bestehen aus Merkmalsgruppen. Jeder Merkmalsgruppe sind verschiedene Zustandsmerkmale zugeordnet, die über gruppenspezifische Zustandsindikatoren erfasst werden. Tabelle 26 zeigt die einzelnen Merkmalsgruppen mit den zugeordneten Zustandsmerkmalen sowie den zugeordneten Zustandsindikatoren und dem Kurzzeichen der entsprechenden Zustandsgröße.

Tabelle 26: Bewertungsrelevante Zustandsgrößen für Straßen, nach (FGSV, 2018)

Teilprojekt	Merkmalsgruppe	Zustandsmerkmal	Zustandsindikator	Zustandsgröße (ZG)
TP1	Ebenheit im Längsprofil	Allgemeine Unebenheit	Unebenheitsmaß, spektrale Dichte äquidistanter Fahrbahnhöhen [cm ³]	AUN
			Längsebenheitswirkindex ³² [-]	LWI
	Ebenheit im Querprofil	Spurrinnen	Maximum aus den Mittelwerten der rechten und linken Spurrinntentiefe [mm]	MSPT
			Maximum aus den Mittelwerten der rechten und linken fiktiven Wassertiefe [mm]	MSPH
TP2	Rauheit	Griffigkeit	Seitenreibungsbeiwert (temperatur- und geschwindigkeitskorrigiert auf 40, 60 oder 80 km/h, Mittelwert) [-]	GRI_40 GRI_60 GRI_80
TP3	Substanzmerkmale (Oberfläche), Asphalt	Netzrisse, Risshäufungen und Einzelrisse	Netzrisse, Risshäufungen und Einzelrisse [%]	RISS
		Flickstellen	Flickstellen, betroffener Flächenanteil [%]	FLI
	Substanzmerkmale (Oberfläche), Beton	Längs- und Querrisse	Längs- und Querrisse, mittlere Länge [m]	LQRL
			Längs- und Querrisse, betroffener Plattenanteil [%]	LQRP
	Eckabbrüche	Eckabbrüche, mittlere Anzahl [-]	EABF	
		Eckabbrüche, betroffener Plattenanteil [%]	EABP	
	Kantenschäden	Kantenschäden, mittlere Länge [m]	KASL	
		Kantenschäden, betroffener Plattenanteil [%]	KASP	

³² Geht derzeit nicht in die Berechnung der Teilwerte und des Gesamtwertes ein.

Die nach Tabelle 26 zu messenden Zustandsgrößen werden grundsätzlich für festzulegende Auswerteabschnitte (Basislänge von 100 m; Auswerteabschnitte abweichender Länge werden darüber hinaus nach exakt definierten Kriterien festgelegt) gebildet.

Sämtliche abschnittsweise ermittelten Zustandsgrößen (ZG) werden im Rahmen der Zustandsbewertung (TP4) über definierte Normierungsfunktionen in Zustandswerte (ZW) überführt. Die Zustandswerte (ZW) werden aufbauend auf den in Tabelle 26 aufgeführten Kurzzeichen benannt. So wird bspw. der Zustandswert (ZW) für erfasste Risse (RISS) mit dem Kurzzeichen ZWRISS benannt. Die Zustandswerte liegen nach der Normierung in einem Wertebereich vor, der in einem Notensystem von 1,0 „sehr gut“ bis 5,0 „sehr schlecht“ definiert ist.

Bild 20 zeigt exemplarisch den Verlauf einer Normierungsfunktion. Diese Normierungsfunktion ist separat für jeden einzelnen Zustandswert (ZW) definiert.

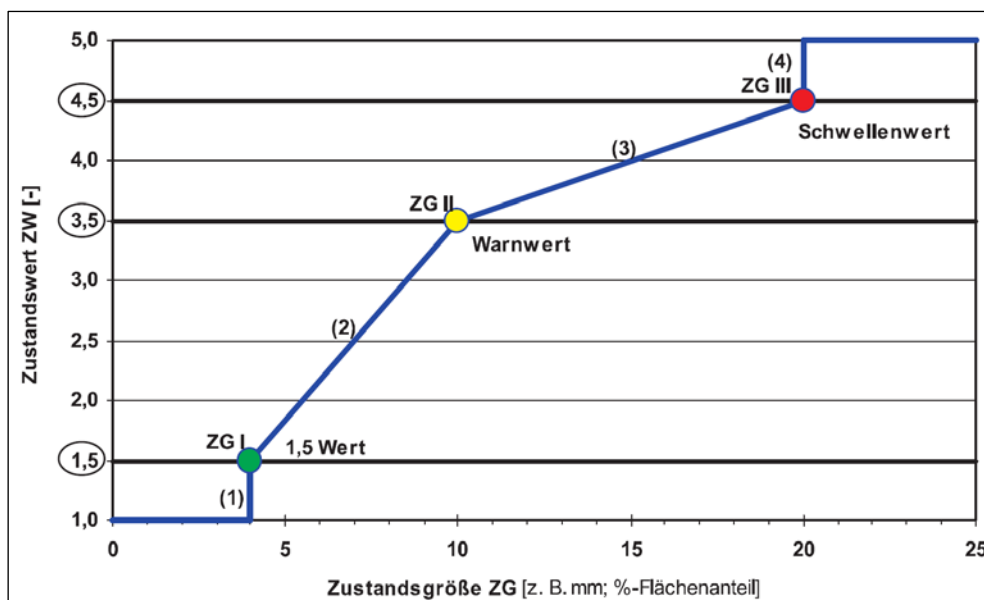


Bild 20: Exemplarischer Verlauf einer Normierungsfunktion (FGSV, 2018)

In Bild 20 ist zu erkennen, dass die Normierungsfunktion im FGSV-Regelwerk durch drei maßgebliche Stützpunkte gekennzeichnet ist:

- Der 1,5-Wert bildet den Grenzwert für die Zustandsbewertung: „sehr gut“. Zustandsgrößen, die zu einer Bewertung $ZW < 1,5$ führen, erhalten grundsätzlich den Zustandswert $ZW = 1,0$.
- Der Zustandswert $ZW = 3,5$ wird als sog. „Warnwert“ bezeichnet. Das Erreichen des Warnwertes erfordert eine intensive Beobachtung, die Analyse der Ursachen und ggf. die Planung geeigneter Maßnahmen
- Der Zustandswert $ZW = 4,5$ wird als sog. Schwellenwert bezeichnet. Während die Normierungsfunktionen im Bereich $1,5 \leq ZW \leq 4,5$ polygonhaft durch die drei Stützpunkte

verlaufen, führt eine Bewertung oberhalb des Schwellenwertes ($ZW > 4,5$) grundsätzlich zu einer Zustandsbewertung: „sehr schlecht“ mit $ZW = 5,0$. In diesem Fall ist das Einleiten von baulichen oder verkehrsbeschränkenden Maßnahmen zu prüfen.

Mit den abschließend normierten Zustandswerten (ZW) wird der Zustand der einzelnen Auswerteabschnitte nach einem festgelegten Berechnungsschema bewertet (vgl. Bild 21).

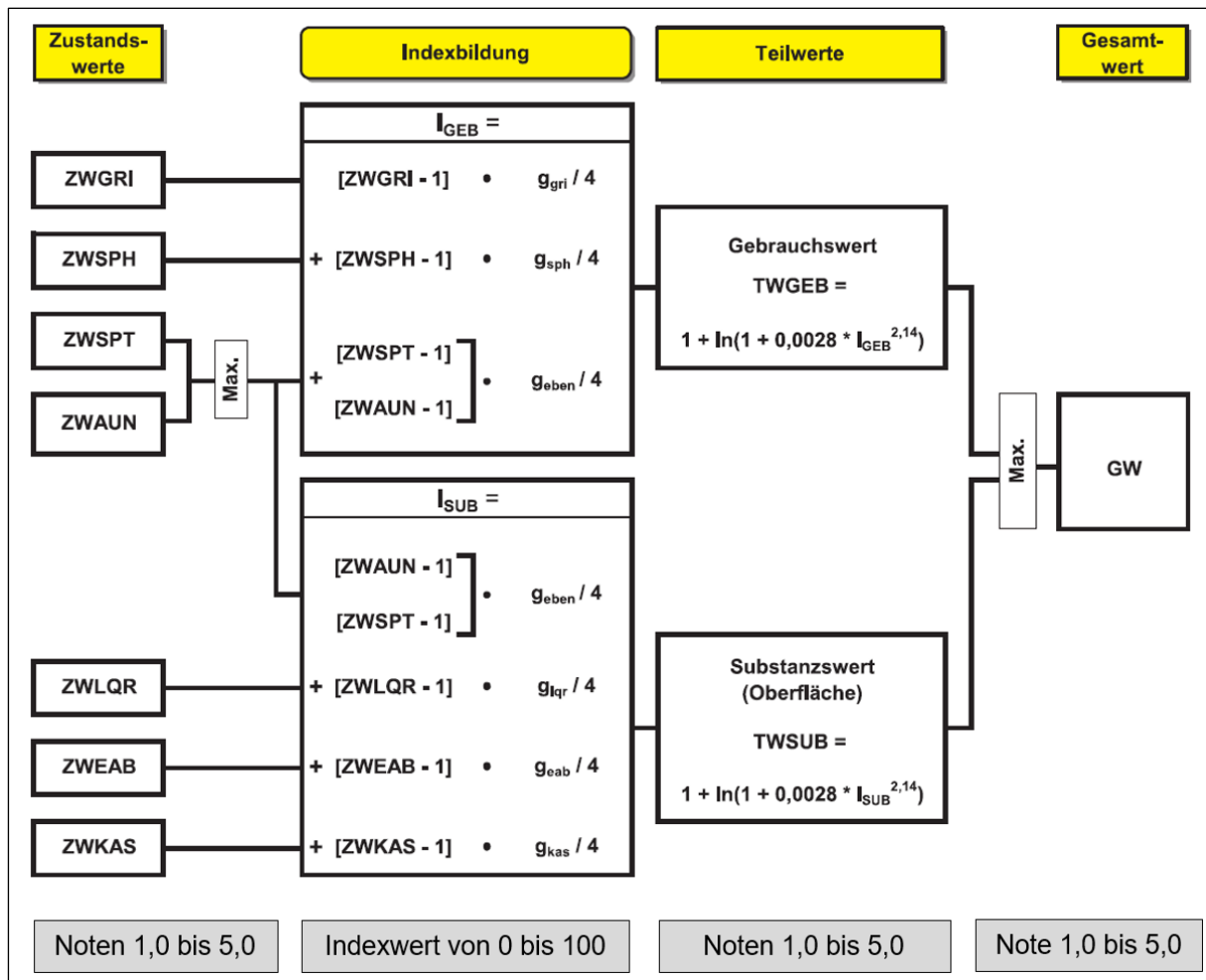


Bild 21: Schema für die Zustandsbewertung von Straßen mit Betondecken, nach (FGSV, 2018)

Aus den Zustandswerten (ZW) werden nach Bild 21 zunächst zwei gewichtete Indexwerte für den Gebrauchszustand I_{GEB} sowie für die Substanz I_{SUB} gebildet. In die Substanzbewertung und -klassifizierung von Straßen mit Betondecken fließen nach FGSV-Regelwerk die Parameter Spurrinnentiefe (SPT), allgemeine Unebenheit (AUN), Längs- und Querrisse (LQR), Eckabbrüche (EAB) sowie Kantenschäden (KAS) ein. Für die Substanzbewertung und -klassifizierung von Straßen mit Asphaltdecken werden die Parameter Spurrinnentiefe (SPT), allgemeine Unebenheit (AUN), Rissbildung (RISS) und Flächenanteil mit Flickstellen (FLI) verwendet. Somit erfolgt grundsätzlich eine materialabhängige Substanzbewertung und -klassifizierung von Straßen. Neben zum Teil unterschiedlichen Ein-

gangsgößen in der Substanzbewertung von Asphalt- bzw. Betondecken erfolgt zudem eine unterschiedliche Gewichtung der Zustandswerte (ZW). So werden bspw. die unebenheitsbeschreibenden Zustandswerte (ZWAUN und ZWSPT) von Beton- und Asphaltdecken zwar auf die gleiche Art und Weise ermittelt. Auf die Substanzbewertung von Betondecken haben ZWAUN und ZWSPT jedoch eine größere Auswirkung als auf die Substanzbewertung von Asphaltdecken (FGSV, 2018).

Neben den einzelnen Zustandswerten (ZW) fließen Gewichtungsfaktoren g_i für die jeweils relevanten Zustandswerte in die Indexwerte I_{GEB} und I_{SUB} ein. Die Summe der indexspezifischen Gewichtungsfaktoren g_i beträgt $\sum g_i = 100$, sodass die ermittelten Indexwerte I_{GEB} bzw. I_{SUB} einen Wertebereich zwischen 0 und 100 aufweisen.

Über eine Logarithmusfunktion werden aus den Indexwerten I_{GEB} und I_{SUB} die Teilwerte (TW) für den „Gebrauchswert“ (TWGEB) bzw. den „Substanzwert“ (TWSUB) gebildet. Die Logarithmusfunktion wurde derart gestaltet, dass die Teilwerte TWGEB und TWSUB wiederum im Notensystem von 1,0 bis 5,0 vorliegen.

Dabei gilt eine sog. Durchschlagsregel. Erreicht oder überschreitet ein Zustandswert (ZW) den Warnwert, wird der entsprechende teilwertrelevante Zustandswert (ZW) als Teilwert (TW) angesetzt. Überschreiten mehrere teilwertrelevante Zustandswerte den Warnwert, wird der schlechteste Zustandswert (ZW) als Teilwert (TW) angesetzt. Somit schlägt eine schlechte Bewertung oberhalb des Warnwertes auf TWGEB bzw. TWSUB durch und kann nicht durch ggf. bessere teilwertrelevante Zustandswerte (ZW) ausgeglichen werden.

Im letzten Schritt wird der sog. „Gesamtwert“ (GW) des betreffenden Auswertabschnitts gebildet, der als der jeweils schlechtere Wert aus Gebrauchs- bzw. Substanzwert definiert ist. Neben der Ermittlung eines Gebrauchswertes ist somit die Ermittlung eines Substanzwertes bereits integraler Bestandteil der Zustandserfassung und -bewertung von Straßen.

Ergänzend sieht das FGSV-Regelwerk eine 8-stufige Zustandsklassifizierung für die ermittelten Einzelwerte (ZW, TWGEB, TWSUB, GW) vor, die u. a. der einheitlichen Farbdarstellung auf zustandsbeschreibenden Karten dient. Die Zustandsklasse ZK 1 wird dabei für einen sehr guten Zustand (Note 1,0) und die Zustandsklasse ZK 8 für einen sehr schlechten Zustand (Note 5,0) vergeben. Dazwischenliegende Klassengrenzen werden jeweils in Schritten von halben Notenwerten auf der zu Grunde liegenden Notenskala definiert.

3.3.4 Fazit

Die standardisierte Ermittlung und materialabhängige Klassifizierung der baulichen Substanz ist integraler Bestandteil der Zustandserfassung und -bewertung von Straßen.

Die Schaffung einer standardisierten und auf der in DWA-M 149-2 (DWA, 2006b) normierten Zustandserfassung aufbauenden Substanzklassifizierung für Kanalhaltungen und Schächte, die durch die DWA analog zur Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) in ein technisches Regelwerk für die Abwasserbranche umgesetzt werden kann, ist Aufgabe von *SubKanS*. Die Vorgehensweise bei der Substanzbeurteilung und –klassifizierung von Straßen kann dabei als wichtige Informationsquelle dienen, da Untersuchung und Bewertung der Schäden im Straßenwesen vergleichbar mit dem Vorgehen bei den Entwässerungssystemen sind. Das in ZTV-ZEB-StB (FGSV, 2018) für Straßen beschriebene Vorgehen wurde durch den DWA-Themenband (vgl. Kap. 3.2.1) über ein angepasstes Normierungssystem mit entsprechender Gewichtung von kanalspezifischen Schadensmerkmalen bzw. -ausprägungen für das Kanalnetz adaptiert. Grundlegende Parameter, mit denen der Zustand und die bauliche Substanz von Straßen bewertet wird, werden mit kanalspezifischen Messverfahren auch bei der Zustandserfassung und –beurteilung von Kanälen erfasst. So erfolgt im Rahmen der optischen Inspektion von Abwasserkanälen bspw. eine systematische Erfassung bzw. Vermessung von Quer- und Längsrissen, von aufgetretener Scherbenbildung (Abbrüchen) oder von Deformationen (Unebenheiten).

3.4 Verkehrswasserbauwerke

3.4.1 Einführung

An Verkehrswasserbauwerken, die unter die Unterhaltungslast der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) fallen, erfolgt die Bauwerksprüfung und Bauwerksüberwachung auf Grundlage der VV-WSV 2101 (WSV, 2010). In den Geltungsbereich der VV-WSV 2101 fallen dabei ausschließlich Bauwerke mit einem entsprechenden Gefährdungspotential (Kloé und Bödefeld, 2012), wie bspw. Schleusen, Schiffshebewerke und Wehranlagen.

3.4.2 Methoden der Zustandserfassung

Innerhalb der WSV werden Schäden an den Bauwerken einheitlich mit dem Programmsystem WSVPruf erfasst und anhand standardisierter Schadensbegriffe kategorisiert. Während grundsätzliche Verfahrensabläufe für die Inspektion im BAW-Merkblatt „Bauwerksinspektion MBI“ geregelt sind (BAW, 2010), erfolgt die Schadensbewertung nach dem BAW-Merkblatt „Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV)“ (BAW, 2018).

Nach MSV (BAW, 2018) wird der Begriff „Schaden“ definiert als „die Überschreitung des Toleranzbereiches für die Abweichung zwischen dem Ist- und dem Soll-Zustand eines Bauteils zum Zeitpunkt der Bauwerksinspektion“. Die Schäden werden ausschließlich in Bezug auf das betroffene Bauteil und

weder in Bezug auf die Gesamtanlage noch in Bezug auf das Schadensausmaß bewertet. Als Bauteil wird dabei die kleinste Instandsetzungseinheit verstanden.

3.4.3 Methoden der Substanzbeurteilung

Einzel Schäden werden nach MSV (BAW, 2018) mit ganzzahligen Schulnoten im Bereich zwischen 1 und 4 bewertet. Demnach existieren vier Schadensklassen. Schadensklasse 1 wird für Schäden verwendet, die weder die Tragfähigkeit noch die Gebrauchstauglichkeit beeinträchtigen oder eine Zustandsverschlechterung nach sich ziehen werden. Typische Beispiele sind u. a. kleinere abgeschlossene Setzungen oder Korrosion an Bewehrungsabstandshaltern. Ist von einem Schadensentwicklungsprozess auszugehen, werden die Schadensklassen 2 bis 4 verwendet, wobei der Entwicklungsprozess mit Schadensklasse 2 beginnt und mit Schadensklasse 4 endet (vgl. Bild 22).

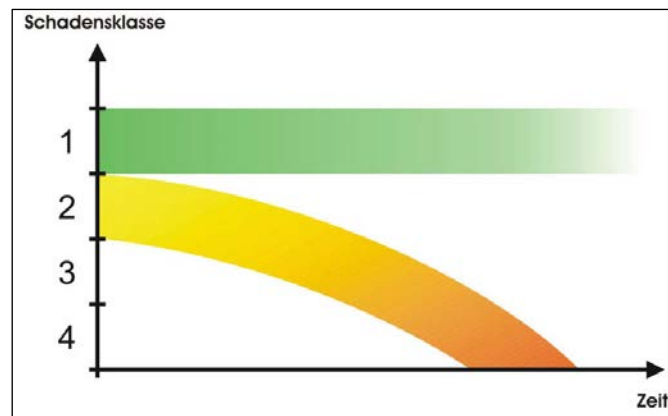


Bild 22: Zusammenhang zwischen Schadensprozess und Schadensklasse nach MSV (BAW, 2018)

In Schadensklasse 2 werden Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit nicht oder nur geringfügig beeinträchtigt. Zudem wird der vorgesehene Prüfzyklus als ausreichend betrachtet. In Schadensklasse 3 ist die Tragfähigkeit bzw. die Gebrauchstauglichkeit zwar beeinträchtigt, aber noch gegeben. Weiterhin ist zu prüfen, ob der vorgesehene Prüfzyklus noch ausreichend ist. In Schadensklasse 4 liegt ein Schaden vor, der eine akute Gefährdung für den Menschen darstellt oder die Nutzung des Bauteils unmöglich macht. Tragfähigkeit und/oder Gebrauchstauglichkeit sind nicht mehr gegeben, sodass sofortige Maßnahmen erforderlich sind, um Gefahr für Leib und Leben auszuschließen.

Das MSV (BAW, 2018) ist strukturell als Schadenskatalog aufgebaut. Es enthält zahlreiche beispielhafte Schadensbilder mit einer zugeordneten Schadensklasse. Zudem sind zahlreiche Fließschemata zur einheitlichen bauteilbezogenen Zuordnung der entsprechenden Schadensklasse enthalten. Das MSV (BAW, 2018) unterteilt dabei in die Kategorien Massivbau, Kunststoff und Elastomer, Stahl[wasser]bau, Holzbau, Deckwerksbau und Korrosionsschutz.

Aus den bauteilbezogen ermittelten Schadensklassen ermittelt das Programmsystem WSVPruf abschließende Prüf- und Teilnoten für Konstruktion, Stahlbau, Ausrüstung, Korrosionsschutz und Sonstiges (BAW, 2010).

Die mit dem Programmsystem WSVPruf erfassten Daten stellen die Grundlage für das Erhaltungsmagementsystem der WSV (EMS-WSV) dar. Im EMS-WSV werden die ermittelten Zustandsdaten bzw. die ermittelten Teilnoten mit Hilfe von statistischen Verfahren in die Zukunft prognostiziert. Dabei kommen sog. Kohortenüberlebensmodelle und Markov-Ketten zum Einsatz (Kühni et al., 2008), um die einzelnen Bauwerke zu vergleichen und die zu erwartende Restnutzungsdauer abzuschätzen. Zudem wird darauf aufbauend ein weiteres Programmmodul innerhalb der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) entwickelt, um Instandsetzungsmaßnahmen und -kosten abzuschätzen und einzelne Maßnahmen risikobasiert priorisieren zu können.

3.4.4 Fazit

Die Zustandsbeurteilung im Verkehrswasserbau ist auf einen Bewertungskatalog zurückzuführen und enthält Beispielschäden, die einer Schadensklasse zugeordnet werden. Die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit sind von entscheidender Bedeutung und beeinflussen maßgebend die Sanierungsentscheidung. Eine schadensorientierte Beurteilung anhand spezifischer Schadenscharakteristika, wie sie bei Haltungen und Schächten erfolgt, wird in diesem Zusammenhang nicht vorgenommen. Das Verfahren zielt darüber hinaus nicht auf eine Substanzbewertung im Sinne von *SubKanS* ab. Vielmehr liegt der Fokus auf einer Identifikation von Prioritäten bei Instandhaltung bzw. Instandsetzung im Sinne der Zustandsklassifizierung von Kanalisationen (vgl. Kap. 3.2.1), sodass der Ansatz im Weiteren nicht verfolgt wird.

3.5 Wohn- und Geschäftsgebäude

3.5.1 Einführung

Die Verordnung über die Grundsätze für die Ermittlung der Verkehrswerte von Grundstücken (Immobilienwertermittlungsverordnung bzw. ImmoWertV) vom 19. Mai 2010 (ImmoWertV, 2010) trat am 1. Juli 2010 in Kraft und löste die bis dahin geltende Wertermittlungsverordnung aus dem Jahr 1988 ab.

Die Verordnung findet überall dort Anwendung, wo der Verkehrswert (Marktwert) von Immobilien (Grundstücke und die darauf befindliche Gebäude) zu ermitteln ist. So berücksichtigt die ImmoWertV unter anderem die energetischen Eigenschaften als Gebäudemerkmale oder auch die Wertrelevanz städtebaulicher Umstände, wie sie etwa in Stadtumbaugebieten vorliegen. Sie regelt den Umgang

mit künftigen Entwicklungen, weil diese für den Verkehrswert von entscheidender Bedeutung sind, fordert insoweit jedoch, dass diese solide und nachvollziehbar ermittelt werden. (ImmoWertV, 2010)

Folgende Methoden zur Bestimmung des Verkehrswertes werden durch die ImmoWertV genormt:

- das Vergleichswertverfahren nach § 15 und § 16 ImmoWertV,
- das Ertragswertverfahren nach § 17 bis § 20 ImmoWertV und
- das Sachwertverfahren nach § 21 bis § 23 ImmoWertV.

Die Anwendbarkeit dieser Verfahren in Abhängigkeit verschiedener Randbedingungen und Fragestellung ist in Tabelle 27 skizziert.

Tabelle 27: Wertermittlungsverfahren gem. ImmoWertV (nach Maibaum, 2009)

	Vergleichswertverfahren	Ertragswertverfahren	Sachwertverfahren
Berechnungsansatz	Preisvergleichsrechnung	Renditeberechnung	Substanzwertberechnung
Fragestellung	Was kosten vergleichbare Grundstücke?	Welcher Barwert ergibt sich aus Miete, Restnutzungsdauer und Zinssatz?	Was kosten Grundstück und Gebäudesubstanz?
Anwendungsbereich	<ul style="list-style-type: none"> • unbebaute Grundstücke • Wohnungs- und Teileigentum 	<ul style="list-style-type: none"> • Mehrfamilienhaus • Büro, Geschäftshaus • Einzelhandel • Industrie • Hotel • Teileigentum 	<ul style="list-style-type: none"> • Einfamilienhaus • bebaute Feriengrundstücke • Eigengenutzte Eigentumswohnungen

Es wird deutlich, dass lediglich das Sachwertverfahren Berührungspunkte zur Zielsetzung von *SubKanS* aufweist.

Beim Sachwertverfahren erfolgt die Ermittlung des Verkehrswertes in Abhängigkeit von Standardsätzen für den Bodenwert und den Herstellungswert der baulichen Anlagen. Darüber hinaus werden Wertminderungen berücksichtigt (vgl. Bild 23).

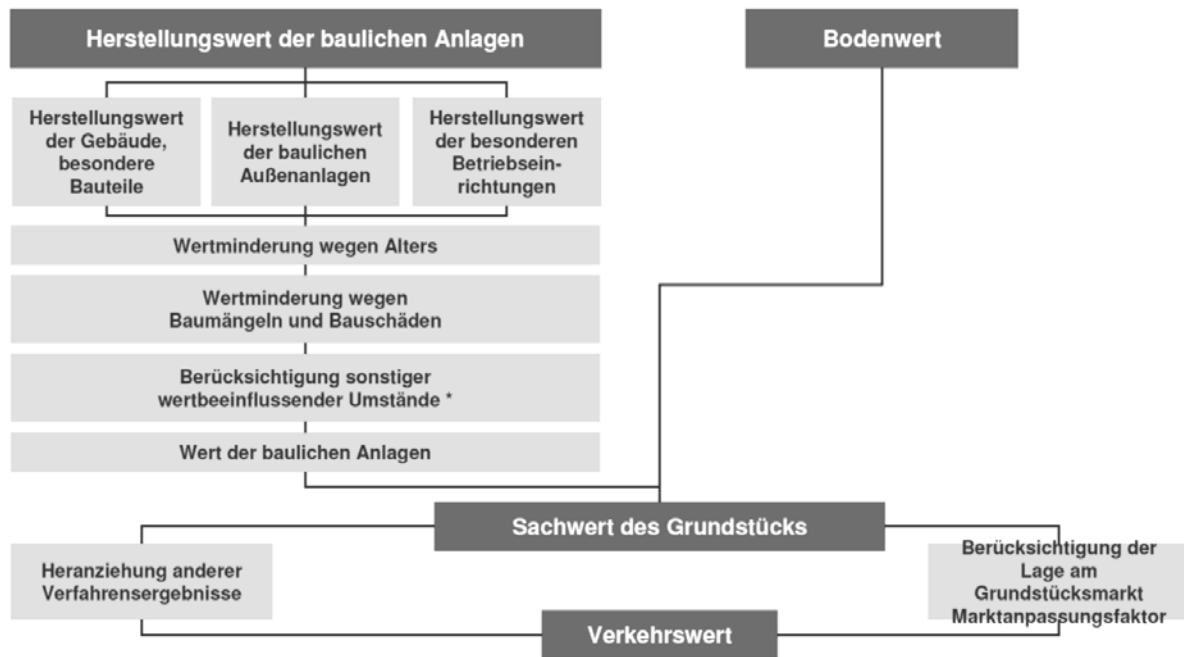


Bild 23: Schematischer Ablauf des Sachwertverfahrens (Maibaum, 2009)

In der Praxis der Verkehrswertermittlung ist der so kalkulierte Herstellungswert gutachterlich u. a. aufgrund des Alters sowie aufgrund von Baumängeln und Bauschäden ggf. zu mindern. Um diesen (subjektiven) gutachterlichen Entscheidungsprozess zu objektivieren, wurde das ERAB-Verfahren³³ zur Ermittlung des Abnutzungsvorrates einzelner Baustoffe (z. B. unterschiedlicher Anstriche) entwickelt (Schönfelder, 2012). Durch Wichtung und Zusammenführung dieser Einzelbetrachtungen kann der Abnutzungsvorrat der gesamten Immobilie ermittelt werden (vgl. Bild 24).

³³ ERAB-Verfahren: Verfahren zur **E**rmittlung des **A**bnutzungsvorrats von Baustoffen. Das Verfahren wurde an der TU Dortmund im Rahmen einer Dissertation entwickelt (Schönfelder, 2010). Wesentliches Merkmal des ERAB-Verfahrens liegt darin, dass anhand mehrerer objektiv bestimmbarer Messgrößen bzw. Kennzahlen der Abnutzungsvorrat von Bauelementen bzw. Baustoffen bestimmt wird.

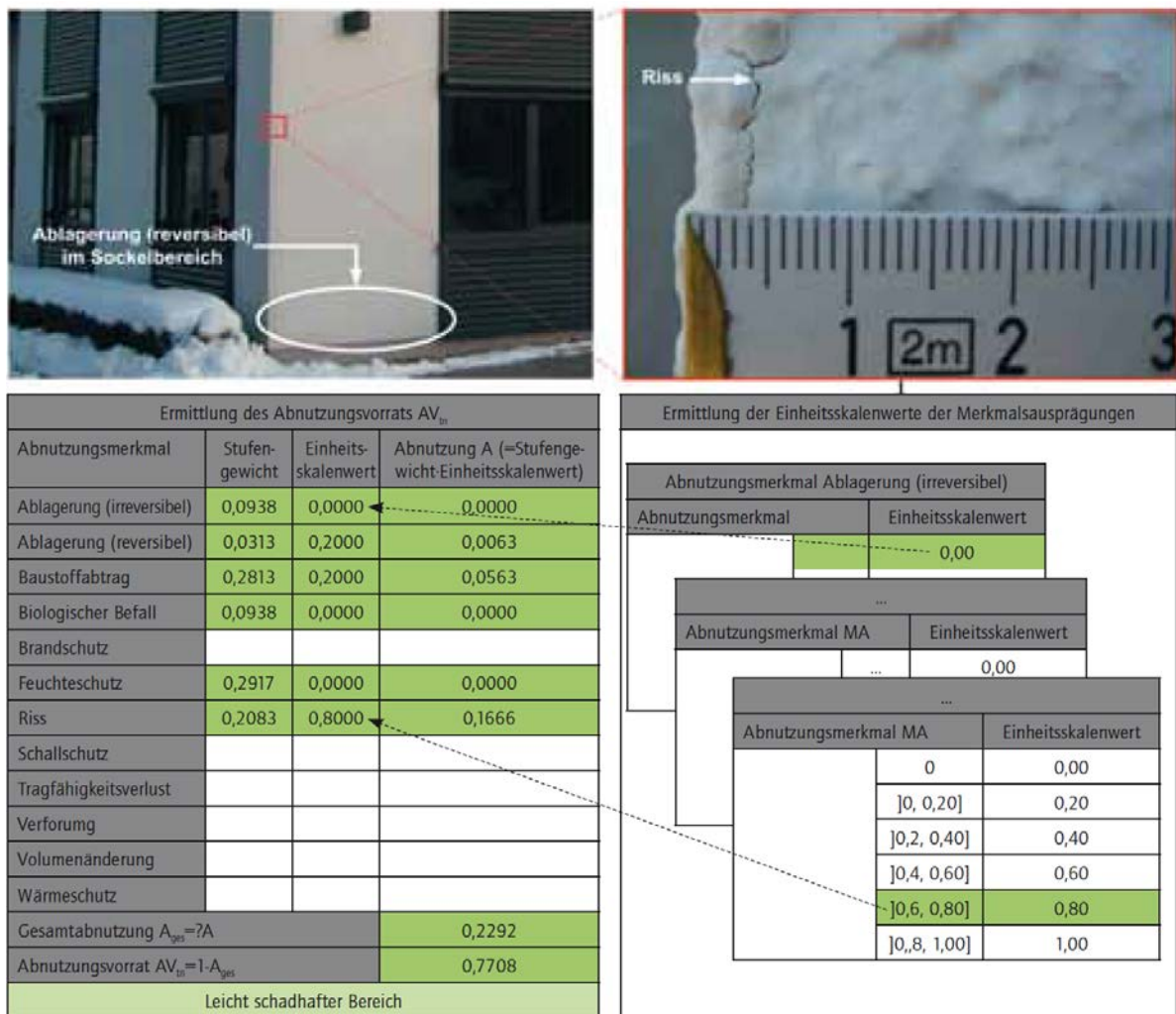


Bild 24: Ermittlung des Abnutzungsvorrats am Beispiel des Baustoffs Anstrich (Schönfelder, 2010; Schönfelder, 2011)

3.5.2 Methoden der Zustandserfassung

Die Zustandserfassung erfolgt durch Begehung bzw. gutachterliche Schadensbeurteilung. Hierfür ist im ERAB-Verfahren für jedes Bauteil und jede Schadensart (Merkmal) eine Skala zur Überführung der Merkmalsausprägung in Einheitsskalenwerte hinterlegt (vgl. Bild 25).

Abnutzungsmerkmal Ablagerung (reversibel)			
Merkmalsausprägung MA [%]		Einheitsskalenwert	
$MA = \frac{W1}{W2} \cdot 100\%$ W1 = Schadensfläche W2 = Gesamtfläche		0	0,00
		]0, 1]	0,20
		]1, 5,5]	0,40
		]5,5 19,2]	0,60
		]19,2 43,8]	0,80
		]43,8, 100]	1,00

Bild 25: Wertezuordnung zur Einheitsskala des Abnutzungsmerkmals reversibler Ablagerungen (Schönfelder, 2010; Schönfelder, 2011)

3.5.3 Methoden der Substanzbeurteilung

Der Sachwert einer Immobilie wird aus den Herstellungskosten unter Berücksichtigung der Alterswertminderung (bzw. Abnutzung) zuzüglich Bodenwert ermittelt. Die Herstellungskosten sind über die gewöhnlichen Herstellungskosten je Flächen-, Raum- oder sonstiger Bezugseinheit (Normalherstellungskosten) zu ermitteln. Die Normalherstellungskosten sind dabei über Baupreisindexreihen an die Preisverhältnisse am Wertermittlungstichtag anzupassen (ImmoWertV, 2010). Das nachfolgende Bild 26 zeigt beispielhaft eine entsprechende Formel zur Ermittlung des Sachwertes von (Wohn-)Immobilien.

Sachwert (Wohnen) = Bruttogrundfläche · Normalherstellungskosten · Anpassung Baupreisindex · Alterswertminderung + Bodenwert	
$Sachwert = BGF \cdot NHK \cdot \frac{I_x}{I_0} \cdot \frac{RND}{GND} + BW$	BGF Bruttogrundfläche NHK Normalherstellungskosten I _x Baupreisindexzahl zum Wertermittlungstichtag I ₀ Baupreisindex zum Bezugsstichtag der Herstellungskosten RND Restnutzungsdauer GND Gesamtnutzungsdauer BW Bodenwert

Bild 26: Beispiel zum Sachwertverfahren nach ImmoWertV (Marschke, Schmidt, 2006)

Über den in Bild 26 dargestellten Zusammenhang hinaus sieht die Sachwertrichtlinie eine Anpassung des Sachwertes an die Wertverhältnisse auf dem örtlichen Grundstücksmarkt vor (Sachwertfaktoren). Zudem sind besondere objektspezifische Grundstücksmerkmale (u. a. auch Nutzrechte) sowie bauliche Außenanlagen bzw. sonstige Anlagen gesondert zu berücksichtigen.

Die entsprechende Festlegung der Gesamtnutzungsdauer kann erneut je nach Ansatz danach unterschieden werden, ob eine monetäre (buchhalterische) Betrachtung der Immobilie erfolgt, oder ob auch technische Kriterien die Alterswertminderung (Abnutzung) beeinflussen.

Bei Immobilien erfolgt die Festlegung der Restnutzungsdauer zunächst unter rein buchhalterischen Gesichtspunkten nach festgelegten Tabellenwerten der Sachwertrichtlinie (SW-RL, 2012). Darüber hinaus werden Modernisierungen nach qualitativen baulich/technischen Kriterien der Sachwertrichtlinie (Modernisierungsgrad) berücksichtigt. In Abhängigkeit des Gebäudealters und des Modernisierungsgrades werden nach entsprechend durchgeführten Modernisierungen modifizierte Restnutzungsdauern ermittelt. So kann bspw. ein umfassend saniertes Gebäude mit einer üblichen Gesamtnutzungsdauer von 80 Jahren gemäß Sachwertrichtlinie auch in einem Alter von 80 Jahren im Extremfall noch eine modifizierte Restnutzungsdauer von 56 Jahren aufweisen.

Die Herangehensweise gemäß Sachwertrichtlinie baut zusammenfassend auf betriebsgewöhnlichen Nutzungsdauern und Alter des Gebäudes bzw. der Gebäudeelemente auf. Der konkrete Zustand bzw. Abnutzungsvorrat sowie deren Einfluss auf Gesamt- bzw. Restnutzungsdauer wird nicht erfasst und berücksichtigt.

Eine Methodik zur Ermittlung des Abnutzungsvorrats von Wohn- und Geschäftsgebäuden wurde mit dem ERAB-Verfahren entwickelt (siehe auch Kap. 3.5.1). Das zu Grunde liegende Bewertungssystem umfasst dabei zwölf verschiedene Abnutzungsmerkmale, die auf Grundlage einer Nutzwertanalyse unterschiedliche Wichtungsfaktoren innehaben. Die Abnutzungsmerkmale selbst werden beim ERAB-Verfahren auf einer Einheitsskala zwischen 0,0 und 1,0 bewertet. Bild 27 zeigt exemplarisch ein gewichtetes Bewertungssystem nach dem ERAB-Verfahren für den Baustoff „Anstrich“.

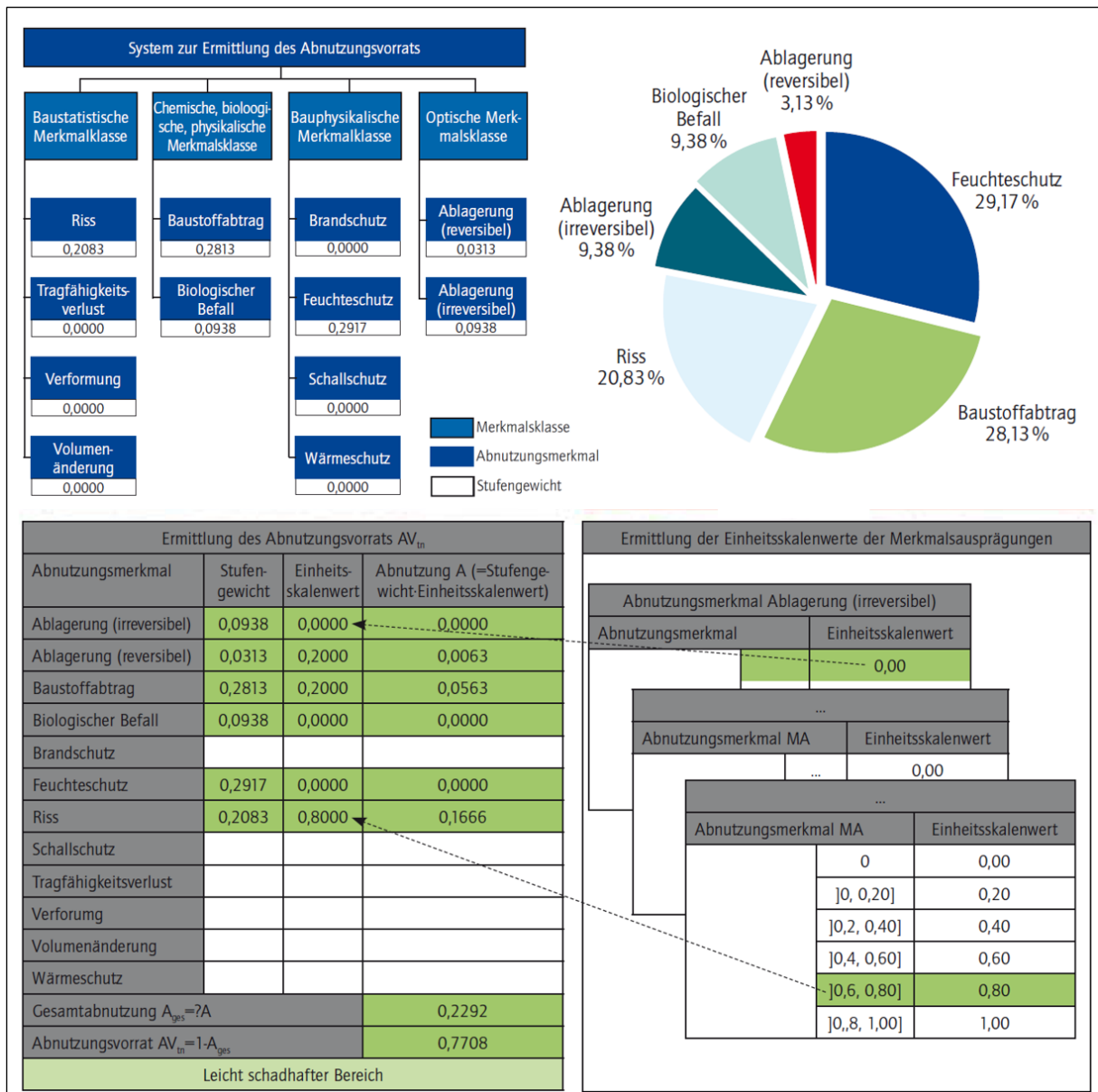


Bild 27: Beispiel für ein gewichtetes Bewertungssystem nach dem ERAB-Verfahren für den Baustoff „Anstrich“ (Schönfelder, 2010; Schönfelder, 2011)

In Bild 27 ist zu erkennen, dass die einzelnen Abnutzungsmerkmale in vier verschiedene Merkmalklassen eingeteilt wurden. Anhand des Kreisdiagramms und der dargestellten Stufengewichte (Wichtungsfaktoren) wird zudem deutlich, dass sich die einzelnen Stufengewichte in Summe zu 100 % addieren. Jedem einzelnen Schadensbild oder jeder Funktionseinschränkung wird demnach ein spezifisches Gewicht bzw. ein spezifischer Anteil am Abnutzungsvorrat zugeordnet. So wird nach Bild 27 bspw. das Schadensbild Ablagerung (reversibel) mit 3,13 % gegenüber dem Schadensbild Riss mit 20,83 % gewichtet (Schönfelder, 2010; Schönfelder, 2011).

3.5.4 Verwertbarkeit für den zu entwickelnden Standard

Die im Hochbau angewandten Untersuchungs- und Beurteilungsmethoden unterscheiden sich von der Methodik, die bei den Entwässerungssystemen angewandt werden. Analog zu Verkehrswasserbauwerken (vgl. Kap. 3.4) ist die Beurteilung von Immobilien nicht auf Schadenscharakteristika gegründet. Vielmehr ist über den wirtschaftlichen Aspekt ein Vergleich zu erbringen, der über die Sanierung entscheidet. Die stringente Schadensbeurteilung wie bei Entwässerungssystemen ist hier nicht vorhanden. Für die Entwicklung einer standardisierten Substanzklassifizierung können die wirtschaftlichen Aspekte als ergänzende Informationen nach der Bewertung der baulichen Substanz für die Entwicklung einer Sanierungsstrategie zusätzlich hinzugezogen werden.

Es ist festzustellen, dass die Sachwertermittlung einer Immobilie auch unter Zuhilfenahme des Objektivierungsansatzes über das ERAB-Verfahren mit hohem personellen Aufwand des Gutachters verbunden ist. Der ERAB-Ansatz könnte auf die ingenieurmäßige Sanierungsplanung von Sonderbauwerken der Siedlungsentwässerung adaptiert werden, allerdings kann er in dieser Form nicht für die (Algorithmen basierte) Substanzklassifizierung von Haltungen und Schächten verwendet werden.

3.6 Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen gem. DIN 1076

3.6.1 Einführung

Die DIN 1076 (DIN, 1999) regelt die *„Prüfung und Überwachung von Ingenieurbauwerken³⁴ im Zuge von Straßen und Wegen hinsichtlich ihrer Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit.*

Die regelmäßige Prüfung und Überwachung hat den Zweck, etwa eingetretene Mängel und Schäden rechtzeitig zu erkennen, zu bewerten und die zuständige Stelle dadurch in die Lage zu versetzen, Maßnahmen zu ergreifen, bevor größerer Schaden eintritt oder die Verkehrssicherheit beeinträchtigt wird. Die Beseitigung der Mängel und Schäden selbst ist nicht Gegenstand dieser Norm.“

³⁴ Ingenieurbauwerke gem. DIN 1076 (DIN, 1999) sind:

- Brücken
- Verkehrszeichenbrücken
- Tunnel
- Trogbauwerke
- Stützbauwerke
- Lärmschutzbauwerke
- Sonstige Ingenieurbauwerke, für die ein Einzelstandsicherheitsnachweis erforderlich ist, wie z. B. Rohr- und Bandstraßenbrücken, Regenrückhaltebecken aus Stahlbeton, Schachtbauwerke

Bauwerke, die keine Ingenieurbauwerke im Sinne dieser Norm sind, sind insbesondere Durchlässe mit einer Öffnung oder einer lichten Weite von weniger als 2,00, Entwässerungsanlagen oder Stützbauwerke mit weniger als 1,50 m sichtbarer Höhe.

Alle Ingenieurbauwerke (siehe auch Fußnote 34) sind in regelmäßigen Abständen unter besonderer Berücksichtigung der bei früheren Prüfungen gemachten Feststellungen zu prüfen. Dabei wird unterschieden zwischen

- Hauptprüfung,
- einfacher Prüfung,
- Prüfung aus besonderem Anlass (Sonderprüfung) und
- Prüfung nach besonderen Vorschriften.

Prüfungszyklen und Prüfungsinhalte (bspw. Prüfung der Tragfähigkeit, der Beschilderungen oder der Gründungen) sind in DIN 1076 (DIN, 1999) festgelegt. Eine Festlegung für Dokumentation und Zustandsbeurteilung erfolgt nicht. Hier gelten die ergänzenden Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten, insbes. die „Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 (RI-EBW-PRÜF)“ (BASt, 2017). Eine weitere Standardisierung von Zustandserfassung und -beurteilung stellen die „Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken“ der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt, 1999) dar (vgl. auch BMVI, 2013).

3.6.2 Methoden der Zustandserfassung

Gemäß DIN 1076 (DIN, 1999), Abschn. 5.2 gilt: *„Die erste Hauptprüfung ist vor der Abnahme der Bauleistung, die zweite Hauptprüfung vor Ablauf der Verjährungsfrist für die Gewährleistung durchzuführen.*

Danach sind die Ingenieurbauwerke jedes sechste Jahr einer Hauptprüfung zu unterziehen.

Bei den Hauptprüfungen sind alle, auch die schwer zugänglichen Bauwerksteile, gegebenenfalls unter Zuhilfenahme von Besichtigungseinrichtungen, Rüstungen und ähnlichem, handnah zu prüfen. Abdeckungen von Bauwerksteilen (z. B. Schutzhauben bei Seilen, Lagermanschetten, Schutzhüllen, Schachtabdeckungen und ähnliches) sind zu öffnen. Die einzelnen Bauwerksteile sind, soweit nötig, vor dieser Prüfung sorgfältig zu reinigen, um auch versteckte Mängel/Schäden auffinden zu können.

...

Im Prüfbericht sind die Mängel/Schäden zu kennzeichnen, die bei der folgenden Einfachen Prüfung oder in engeren Zeiträumen erneut zu prüfen sind. Dies gilt insbesondere für solche Mängel/Schäden, die in absehbarer Zeit einzeln oder in ihrer Summe die Standsicherheit, die Verkehrssicherheit oder die Dauerhaftigkeit beeinträchtigen können.“

Die Einfache Prüfung ist, soweit vertretbar, ohne Verwendung von Besichtigungsgeräten oder –einrichtungen als intensive, erweiterte Sichtprüfung durchzuführen. In diese Prüfung sind auch Funktionsteile (z. B. Lager, Gelenke, Übergangskonstruktionen) sowie Verankerungen von Bauteilen (z. B.

Berührungsschutz, Lärmschutzwände, Leitungen) einzubeziehen. Soweit notwendig, sind Gründungen auf Auskolkungen zu prüfen.

Darüber hinaus sind alle Ingenieurbauwerke i. d. R. regelmäßig einmal jährlich ohne größere Hilfsmittel wie Besichtigungsfahrzeuge, Rüstung usw., aber unter Benutzung von am Bauwerk vorhandenen Besichtigungseinrichtungen, von begehbaren Hohlräumen des Bauwerks, von der Verkehrsebene und dem Geländeniveau, soweit zugänglich, auf offensichtliche Mängel oder Schäden hin zu besichtigen. Dabei sind insbesondere folgende Feststellungen zu protokollieren:

- außergewöhnliche Veränderungen am Bauwerk,
- erhebliche Mängel/Schäden an und Fehlen von Verkehrszeichen, Schutzeinrichtungen und Absturzsicherungen, erhebliche Mängel/Schäden und Verunreinigungen an Entwässerungseinrichtungen und Übergangskonstruktionen,
- erhebliche Mängel/Schäden an Belägen,
- erhebliche Anprallschäden und Betonabplatzungen, auffallende Risse,
- augenscheinliche Verformungen und Verschiebungen des Bauwerkes,
- Mängel/Schäden an Böschungen,
- Auskolkungen und Anlandungen in Gewässern

Für die Beschreibung der Schäden und Mängel sind gem. RI-EBW-PRÜF (BASt, 2017) mindestens folgende Angaben erforderlich:

- Hauptbauteil
(z. B. Querträger, Widerlager, Tunnelportal, Lärmschutzwandelement, Stützwand)

und/oder

- Konstruktionsteil
(z. B. Gründung, Vorspannung, Lager, Geländer)

und/oder

- Bauteilergänzung
(z. B. Beton, Stahl, Obergurt, Bewehrung, Fugen, Verbindungen, Betonersatz, Beschichtung)
- Schaden
(z. B. schadhaft, behindert, gerissen, verstopft oder Riss 0,2 mm breit)
- Menge allgemein
(z. B. flächendeckend, bereichsweise, vereinzelt)
- Schadensbewertung
- Zuordnung zu einem Schadensbeispiel

Entsprechend der DIN 1076 (DIN, 1999) sind bei der Hauptprüfung die Schäden zu kennzeichnen, die zuzüglich zu dem bei der Einfachen Prüfung (EP) üblichen Prüfumfang zu prüfen sind.

Folgende Angaben können die Schadensbeschreibung ergänzen:

- Menge mit Dimension
grobe mengenmäßige Angabe der Ausbreitung des Schadens (z. B. xxx m Länge, xxx cm Durchmesser, xxx °C).
- Ortsangabe Feld, Pfeiler, Block, Segment
(z. B. gesamter Überbau, 4. Feld, Widerlager vorne)
- Ortsangabe längs / quer / hoch
(z. B. vorne, xxx m vom Feldanfang, 2. Wechselbereich)
- Schadensveränderung
(z. B. Instandsetzung schadhaft)
- Bemerkungen
(z. B. erforderlich ist: Gutachten)
- Selbst formulierte Textergänzungen
- In digitaler Form abgespeicherte Schadensbilder
- In digitaler Form abgespeicherte Schadensskizzen³⁵.

3.6.3 Methoden der Substanzbeurteilung

Im Verlauf der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 (DIN, 1999) ist für jeden erfassten Einzelschaden eine getrennte Schadensbewertung nach den Kriterien „Standsicherheit (S)“ „Verkehrssicherheit (V)“ und „Dauerhaftigkeit (D)“ durchzuführen (vgl. Bild 28). Es wird deutlich, dass die Schadensbewertung in Hinblick auf Sanierungsdringlichkeit erfolgt und damit große Analogie zu DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) aufweist (vgl. auch Kap. 3.2.1).

³⁵ Die zusätzliche Schadensbeschreibung mittels Schadensskizzen nach Ort, Art und Ausmaß (Anlage 7 der RI-EBW-PRÜF) hat sich lt. RI-EBW-PRÜF (BAST, 2017) als sehr nützlich erwiesen und wird zur Anwendung empfohlen. Bei großen Ingenieurbauwerken und umfangreichem Schadensbild sind Skizzen in der Regel notwendig.

Schadensbewertung „Standsicherheit“ (S)	
Bewertung	Beschreibung
0	Der Mangel/Schaden hat keinen Einfluss auf die Standsicherheit des Bauteils/Bauwerks .
1	Der Mangel/Schaden beeinträchtigt die Standsicherheit des Bauteils , hat jedoch keinen Einfluss auf die Standsicherheit des Bauwerks . Einzelne geringfügige Abweichungen in Bauteilzustand, Baustoffqualität oder Bauteilabmessungen und geringfügige Abweichungen hinsichtlich der planmäßigen Beanspruchung liegen noch deutlich im Rahmen der zulässigen Toleranzen . Schadensbeseitigung im Rahmen der Bauwerksunterhaltung .
2	Der Mangel/Schaden beeinträchtigt die Standsicherheit des Bauteils , hat jedoch nur geringen Einfluss auf die Standsicherheit des Bauwerks . Die Abweichungen in Bauteilzustand, Baustoffqualität oder Bauteilabmessungen oder hinsichtlich der planmäßigen Beanspruchung aus der Bauwerksnutzung haben die Toleranzgrenzen erreicht bzw. in Einzelfällen überschritten . Schadensbeseitigung mittelfristig erforderlich.
3	Der Mangel/Schaden beeinträchtigt die Standsicherheit des Bauteils und des Bauwerks . Die Abweichungen in Bauteilzustand, Baustoffqualität oder Bauteilabmessungen oder hinsichtlich der planmäßigen Beanspruchung aus der Bauwerksnutzung übersteigen die zulässigen Toleranzen . Erforderliche Nutzungseinschränkungen sind nicht vorhanden oder unwirksam. Eine Nutzungseinschränkung ist gegebenenfalls umgehend vorzunehmen. Schadensbeseitigung kurzfristig erforderlich.
4	Die Standsicherheit des Bauteils und des Bauwerks ist nicht mehr gegeben . Erforderliche Nutzungseinschränkungen sind nicht vorhanden oder unwirksam. Sofortige Maßnahmen sind während der Bauwerksprüfung erforderlich. Eine Nutzungseinschränkung ist umgehend vorzunehmen. Die Instandsetzung oder Erneuerung ist einzuleiten .

Bild 28: Beispielhafte Schadensbewertung für das Kriterium „Standsicherheit“ (S) gem. RI-EBW-PRÜF (BASt, 2017)

Die Zustandsnoten werden gem. RI-EBW-PRÜF (BASt, 2017) unter Berücksichtigung der Schadensauswirkung auf die „Standsicherheit“, „Verkehrssicherheit“ und „Dauerhaftigkeit“ der Konstruktion berechnet und sechs Zustandsnotenbereichen zugeordnet (vgl. Beispiel Bild 29). Auch hier erfolgt in Analogie zu DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) eine Beurteilung der Bauwerke in Hinblick auf die Sanierungspriorität.

Notenbereich	Beschreibung
3,0-3,4	<p>nicht ausreichender Zustand</p> <p>Die Standsicherheit und/oder Verkehrssicherheit des Bauwerks sind beeinträchtigt. Die Dauerhaftigkeit des Bauwerks kann nicht mehr gegeben sein. Eine Schadensausbreitung oder Folgeschädigung kann kurzfristig dazu führen, dass die Standsicherheit und/oder Verkehrssicherheit nicht mehr gegeben sind.</p> <p>Laufende Unterhaltung erforderlich. Umgehende Instandsetzung erforderlich.</p> <p>Maßnahmen zur Schadensbeseitigung oder Warnhinweise zur Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit oder Nutzungseinschränkungen sind umgehend erforderlich.</p>
3,5-4,0	<p>ungenügender Zustand</p> <p>Die Standsicherheit und/oder Verkehrssicherheit des Bauwerks sind erheblich beeinträchtigt oder nicht mehr gegeben. Die Dauerhaftigkeit des Bauwerks kann nicht mehr gegeben sein. Eine Schadensausbreitung oder Folgeschädigung kann kurzfristig dazu führen, dass die Standsicherheit und/oder Verkehrssicherheit nicht mehr gegeben sind oder dass sich ein irreparabler Bauwerksverfall einstellt.</p> <p>Laufende Unterhaltung erforderlich. Umgehende Instandsetzung bzw. Erneuerung erforderlich.</p> <p>Maßnahmen zur Schadensbeseitigung oder Warnhinweise zur Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit oder Nutzungseinschränkungen sind sofort erforderlich.</p>

Bild 29: Zustandsnoten für Ingenieurbauwerke (Beispiel nicht ausreichender bzw. ungenügender Zustand) gem. RI-EBW-PRÜF (BAST, 2017)

Gem. RI-EBW-PRÜF wird darüber hinaus für Bauteilgruppen und (Teil-)Bauwerke eine „Substanzkennzahl“ ermittelt. Sie entspricht der Zustandsnotenbewertung nach Abschnitt 2.8 bzw. 2.9 der RI-EBW-PRÜF ohne Berücksichtigung der Verkehrssicherheitsbewertung ($V = 0$) und kann der Bilanzierung des Anlagevermögens dienen. (BAST, 2017)

3.6.4 Verwertbarkeit für den zu entwickelnden Standard

Aus o. g. Ausführung wird deutlich, dass die Beurteilung von Ingenieurbauwerken im Zuge von Straßen und Wegen gem. DIN 1076 (DIN, 1999) in Analogie zu DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) und damit in Hinblick auf eine Sanierungspriorisierung erfolgt. Auch die in RI-EBW-PRÜF (BAST, 2017) eingeführte „Substanzkennzahl“ drückt letztlich eine Sanierungspriorität für die Kriterien Standsicherheit und Dauerhaftigkeit aus. Die Substanzkennzahl deckt sich somit nicht mit dem Projektverständnis von baulicher Substanz (vgl. Glossar) und ist in Bezug auf die Entwicklung des *SubKanS*-Standards nicht verwendbar.

3.7 Fazit

Ziel dieser Recherche war die Aufarbeitung verschiedener Bewertungsmethoden zur Beurteilung von baulicher Substanz und Abnutzung sowie die Ableitung von Hinweisen für die Entwicklung des *SubKanS*-Ansatzes. Dabei ist zunächst festzuhalten, dass sowohl die bestehenden Modelle zur Beurteilung der Substanz von Kanalhaltungen (vgl. Kap. 3.2.2) als auch die Substanzbeurteilung für andere Infrastrukturobjekte (vgl. Kap. 3.3 - 3.6) einem uneinheitlichem Substanzverständnis folgen. Insbesondere ist klar zu trennen zwischen Substanzwert im Sinne einer Vermögensbewertung und der Substanz gem. Projektverständnis im Sinne einer technischen Abnutzung (vgl. Bild 1, S. 6).

Die Recherche hat ergeben, dass Methoden zur baulichen Substanzklassifizierung von Abwasserkanälen und Schächten außerhalb Deutschlands nicht existieren (vgl. Kap. 3.2.2.6 bis 3.2.2.8). Die in Deutschland entwickelten Substanzklassifizierungsmodelle weisen nicht zuletzt aufgrund der unterschiedlichen Substanzverständnisse erhebliche Unterschiede hinsichtlich Methodik und konkreter Substanzbeurteilung auf (vgl. Kap. 3.2.2.1 bis 3.2.2.5 und insbesondere die „Modellreaktionen“ in Kap. 3.2.2.9). Allerdings können aus den Modellen, denen ein Substanzverständnis entsprechend *SubKanS* zu Grunde liegt, Hinweise für die Entwicklung des *SubKanS*-Ansatzes gewonnen werden.

Wesentlich für die Verwertbarkeit von Ansätzen, die nicht für Kanalisationen entwickelt wurden, ist, dass - neben dem bereits angesprochenen projektgemäßen Substanzverständnis – die Zustandserfassung und -beurteilung der Objekte nach Methoden erfolgt, die mit den Standards in der Siedlungsentwässerung vergleichbar sind. D. h. eine Verwertbarkeit setzt i. d. R. eine optische Zustandserfassung, insbesondere aber eine standardisierte Zustandsbeschreibung sowie eine standardisierte Bewertung von Einzelschäden voraus (vgl. Kap. 3.2.1). Diese Voraussetzungen sind bei den Versorgungsinfrastrukturen (bspw. Gas- oder Stromnetze) i. d. R. nicht gegeben (vgl. Tabelle 4, S. 29).

In anderen Bereichen des Tiefbaus und im Hochbau bestehen dagegen größere Analogien zur Untersuchung und Beurteilung von infrastrukturellen Bauwerken von Entwässerungssystemen:

Bei der Straßeninstandhaltung wird die Zustands- bzw. Substanzbeurteilung nach dem gleichen Prinzip durchgeführt, wie bei Entwässerungssystemen. Die Schadenscharakteristika werden anhand einer standardisierten optischen Inspektion festgehalten und für die Beurteilung der Straßenoberfläche herangezogen; dabei werden Schadensart, -dichte und -verteilung berücksichtigt. Über ein angepasstes Normierungssystem mit entsprechender Gewichtung kanalspezifischer Schadensmerkmale bzw. -ausprägungen wurde ein entsprechender Substanzbewertungs- und -klassifizierungsansatz durch das Modell gem. Leitfaden zur strategischen Sanierungsplanung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden (vgl. Kap. 3.2.2.1 bzw. (DWA, 2012)) bereits für das Kanalnetz adaptiert.

Für den Verkehrswasserbau (vgl. Kap. 3.4) liegt bislang lediglich eine Zustandsklassifizierung im Sinne einer Sanierungspriorität vor. Ansätze, mit denen bauwerksbezogenen Instandsetzungsmaßnahmen und -kosten abzuschätzen sind und aus denen ein Substanzwert abgeleitet werden könnte,

werden derzeit innerhalb der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) entwickelt. Sie sind weder veröffentlicht noch ist zu erwarten, dass der Beurteilung ein projektgemäßes Substanzverständnis zu Grunde liegt.

Die Sachwertermittlung von Immobilien (vgl. Kap. 3.5) entspricht bei Einbindung des ERAB-Verfahrens (Schönfelder, 2010) von der Grundidee und der Methodik dem *SubKanS*-Verständnis. Das ERAB-Verfahren wurde allerdings für komplexe Gebäudestrukturen mit unterschiedlichsten Bauteilen entwickelt. Funktionale Einschränkungen (bspw. reduzierte Standsicherheit) werden ebenso betrachtet wie optische Mängel (Ausblühungen usw.). Zudem bedarf es eines hohen personellen Aufwandes. Der ERAB-Ansatz könnte auf die ingenieurmäßige Sanierungsplanung von Sonderbauwerken der Siedlungsentwässerung adaptiert werden, allerdings kann er in dieser Form nicht für die (Algorithmen basierte) Substanzklassifizierung von Haltungen und Schächten verwendet werden.

Die Beurteilung von Ingenieurbauwerken im Zuge von Straßen und Wegen erfolgt gem. DIN 1076 (DIN, 1999) in Hinblick auf eine Sanierungspriorisierung (vgl. Kap. 3.6.4). Auch die in RI-EBW-PRÜF (BAST, 2017) eingeführte „Substanzkennzahl“ drückt letztlich eine Sanierungspriorität für die Kriterien „Standsicherheit“ und „Dauerhaftigkeit“ aus. Diese Substanzkennzahl deckt sich somit nicht mit dem Projektverständnis von baulicher Substanz und ist in Bezug auf die Entwicklung des *SubKanS*-Standards nicht verwendbar.

4 Anforderungen an die Substanzklassifizierung von Abwasserkanälen und Schächten

4.1 Zielsetzung

Die standardisierte Ermittlung der Abnutzung bzw. die Substanzklassifizierung von Abwasserkanälen und Schächten und damit von (Teil-)Netzen soll Netzbetreiber in die Lage versetzen, im Sinne der DIN EN 752 (DIN EN, 2017) das eigene Kanalmanagement zu überprüfen. Gegenwärtige und zukünftige³⁶ Handlungsnotwendigkeiten sowie (mögliche) Handlungserfolge³⁷ sollen identifizierbar und quantifizierbar werden. Auf diesem Wege soll eine ergänzende Entscheidungsgrundlage für das Infrastrukturmanagement sowie die Sanierungsplanung zur Verfügung gestellt werden. Hierfür muss die Abnutzung bzw. Substanz(klasse) logisch mit technischer Gesamtnutzungsdauer bzw. technischer Restnutzungsdauer verknüpft sein (vgl. auch Bild 1, S. 6).

Auf Netzebene soll die Substanzklassifizierung den Netzbetreiber bei der Entwicklung bzw. Anpassung einer Sanierungsstrategie unterstützen, indem ein ggf. vorhandener Investitionsstau bzw. Werteverzehr identifiziert und quantifiziert werden kann. Die standardisierte Ermittlung von Abnutzung und damit technischer Restnutzungsdauer soll zudem eine standardisierte Ermittlung des (kaufmännischen) Substanzwertes nach DWA-A 143-14 (DWA, 2017) und damit Entwicklung und vor allem Vergleich von substanzwertbezogenen Strategieansätzen erlauben. Die Substanzklassifizierung kann damit auch zur Sichtbarmachung des Handlungsbedarfs von Maßnahmen im Kanalnetz und der dafür erforderlichen finanziellen und personellen Ressourcen vor Politik und Bürgern dienen. Die Etablierung eines solchen Standards soll zudem den Einstieg in Benchmarkprozesse durch eine Einordnung des eigenen Handelns im Vergleich mit dem Handeln anderer Betreiber ermöglichen. Ebenfalls soll sie das Netzmonitoring als Wirkkontrolle einer durch den Netzbetreiber verfolgten Strategie über die Zeit unterstützen. Die Abnutzung bzw. standardisierte Substanz(klasse) kann als zusätzliches Element in die DWA-Umfrage zum Zustand der Kanalisation in Deutschland (vgl. Berger et al., 2020) eingebunden und derart Handlungsnotwendigkeiten auch auf Bundesebene quantifizieren.

Auf Objektebene (Haltung) soll die Substanzklasse die Sanierungsbedarfsplanung nach DWA-A 143-1 (DWA, 2015a) unterstützen. Aus der Substanzklasse sollen erste Rückschlüsse auf erforderliche Unterhalts- oder investive Maßnahmen gezogen werden können. Damit sollen Haltungen identifiziert werden, die mit großer Sicherheit investiv saniert werden müssen oder umgekehrt noch lange Rest-

³⁶ Die Abnutzung entsteht durch Gebrauch über die Zeit und ist daher prognostizierbar. Das Alter des Bauwerks fließt in die durch Prognose abgebildete Abnutzungsentwicklung ein; für die Bestimmung der Abnutzung ist das Alter nicht unmittelbar relevant.

³⁷ Beispielsweise in Form einer Bestimmung des Sanierungserfolges von Reparaturen (Restschäden im reparierten Objekt, zugehörige Abnutzung bzw. Substanzklasse).

nutzungsdauern erwarten lassen. Dies kann Grundlage zur Abstimmung mit anderen Spartenbetreibern sein. Ebenfalls ist eine erste Abschätzung und Abstimmung mit kaufmännischen Belangen (verbleibende Restnutzungsdauer, drohender Abschreibungsverlust, Überprüfen der betriebsgewöhnlichen Nutzungsdauer) möglich. Aufwand und Nutzen von Sanierungen werden durch den Vergleich zwischen Substanz vor Sanierung und Substanz nach erfolgter Sanierung bewertbar.

Die Prognose der zukünftigen Netzentwicklung ist nicht Zielsetzung von *SubKanS*.

4.2 Konsequenzen

Die Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden ist in Deutschland über die Regelwerksreihe DWA-M 149 Teile 1 bis 3 geregelt (vgl. Kap. 3.2.1) (DWA, 2018, 2013b, 2015a). Darüber hinaus existieren Regelwerke und Normen zur Entwicklung von Sanierungsstrategien (insbes. DWA-A 143-14 (DWA, 2017)) und zum Kanalmanagement (insbes. DIN EN 752 (DIN EN, 2017)) (vgl. auch Kap. 2.2).

Zur Förderung der Akzeptanz ist die Anbindung der Methodik der Substanzklassifizierung von Abwasserkanälen und Schächten an bestehende Regelwerke sinnvoll und notwendig. Für den zu entwickelnden Standard bedeutet dies im Einzelnen:

- Die Ermittlung der Abnutzung soll unter Verwendung des Kodiersystem gem. DWA-M 149-2 (DWA, 2013b) erfolgen.
- Substanz/Abnutzung/Abnutzungsvorrat/etc. sind „objektive Größen“ und sollen nicht von betreiberspezifischen Erwägungen (z. B. Reparaturbereitschaft) oder lokalen Randbedingungen (z. B. spez. Baukosten) abhängen; derart kann und soll die Substanzklasse als Benchmark genutzt werden (vgl. Bild 30).
- Aus Abnutzung bzw. Substanzklasse soll eine Sanierungsempfehlung bzw. -tendenz ableitbar sein. Diese Empfehlung / Tendenz kann und soll keine abschließende Sanierungsentscheidung sein. Ebenfalls sollen voraussichtliche Sanierungskosten abgeschätzt werden können.

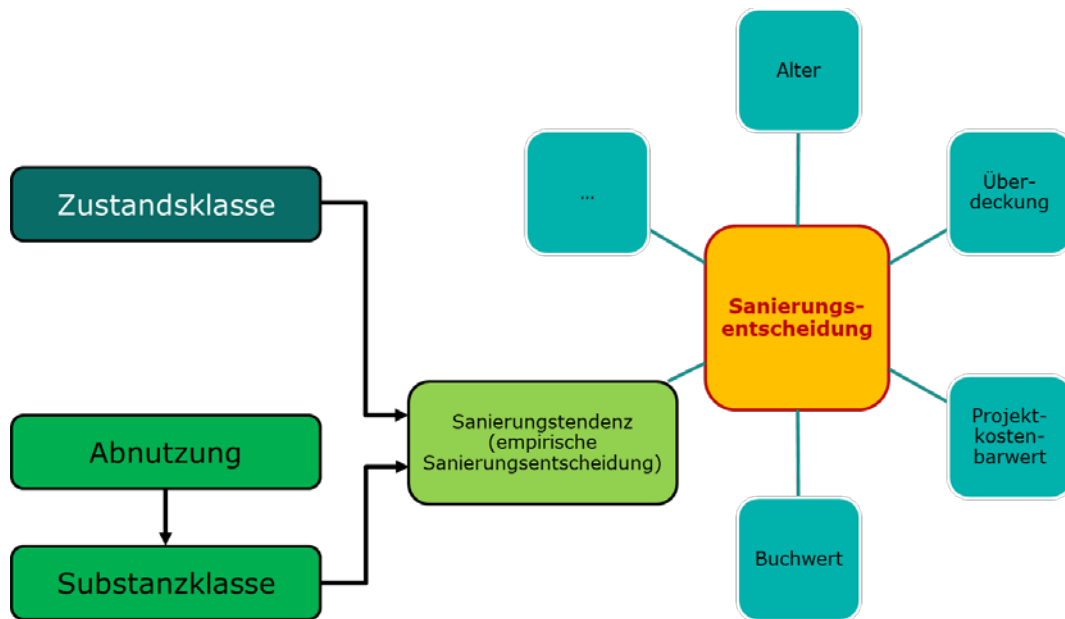


Bild 30: Gesamtprozess der Substanzklassifizierung (Trennung von Abnutzung und Sanierungsempfehlung)



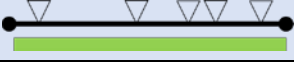

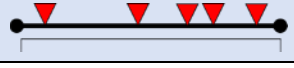

Darüber hinaus wurden – basierend auf den Ergebnissen sowohl der Recherche (vgl. insbes. Kap. 3.2.2) als auch von Experteninterviews, die mit einer erweiterten Fachöffentlichkeit in drei Expertenrunden geführt wurden (siehe Anlagen 9 – 11 sowie Anlage 13) - folgende Anforderungen an einen Standard für die Substanzklassifizierung festgelegt (Axiome):

- Die Abnutzung von Abwasserkanälen und Schächten bezeichnet eine Einschränkung der Funktionsfähigkeit (Dichtheit, Standsicherheit und Betrieb) der gesamten Betrachtungseinheit (nicht die beispielsweise in DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) beschriebene Dringlichkeit, mit der eine Sanierung zu erfolgen hat). Die Abnutzung ergibt sich entsprechend aus der Summe aller die Funktion beeinträchtigenden Indikationen. Analog zu DWA-M 149-1 (DWA, 2018) umfasst Funktionsfähigkeit im hier verwendeten Sinne zwar betriebliche, nicht aber hydraulische Funktionseinschränkungen im Sinne einer Unterdimensionierung. Die Substanzklasse korrespondiert mit der Abnutzung.
- Die Abnutzung eines schadensfreien Objektes (Abwasserkanal oder Schacht) beträgt 0 %.
- Die Abnutzung eines Objektes, welches auf gesamter Länge die Zustandsklasse 0 (z. B. Streckenschaden ZK 0 über gesamte Haltungslänge) aufweist, beträgt definitionsgemäß 100 %.
- Die Abnutzung definiert sich nicht über eine Sanierungsentscheidung; vielmehr soll die Sanierungsentscheidung u. a. aus der Abnutzung abgeleitet werden können. In der Konsequenz sollen auch Zwischenergebnisse im Berechnungsalgorithmus nicht über Sanierungserwägungen definiert werden.

- Ein Schadensbild wird oftmals durch mehrere Feststellungen (Kodes) beschrieben. Mehrfache Feststellungen, die auf ein einzelnes Schadensbild zurückzuführen sind, werden zu einem Schaden zusammengeführt. Mehrfache Feststellungen an einem Ort, die nicht auf demselben Schaden beruhen, werden nicht zu einem Schaden zusammengeführt.
- Die Abnutzung ergibt sich aus Schwere und Ausdehnung aller in einer Haltung vorhandenen Schäden.
- Ein vorrangiger Streckenschaden (z. B. Zustandsklasse 2) überdeckt einen nachrangigen Punktschaden (z. B. SK 3) auf dieser Strecke nicht, beide sind zu berücksichtigen.

In der Konsequenz soll der zu entwickelnde Modellansatz gem. der zusammenfassenden Ausführungen in Tabelle 28 reagieren. Das darin dargestellte Ausgangsszenario H0000082 sowie die fünf alternativen Szenarien A bis E wurden bereits durch Tabelle 20 bis Tabelle 25 (S. 83 ff) eingeführt.

Tabelle 28: Anforderung an den *SubKanS*-Ansatz (Modellreaktion)

Szenario	Modellreaktion
<p>H0000082³⁸</p> 	Abnutzung ergibt sich aus der Summe aller Schäden
<p>A³⁹</p> 	Abnutzung (leicht) niedriger als bei Ausgangsszenario
<p>B⁴⁰</p> 	Abnutzung (deutlich) niedriger als bei Ausgangsszenario, aber > 0
<p>C⁴¹</p> 	Abnutzung (leicht) höher als bei Ausgangsszenario
<p>D⁴²</p> 	Abnutzung niedriger als bei Ausgangsszenario
<p>E⁴³</p> 	Abnutzung höher als bei Ausgangsszenario

³⁸ Ausgangsszenario: verschiedene Punktschäden der Einzelschadensklasse 2 sowie über die gesamte Haltungslänge ein nachrangiger Streckenschaden der Einzelschadensklasse 3

³⁹ Wegfall eines Punktschadens

⁴⁰ Wegfall sämtlicher Punktschäden

⁴¹ Zusatz eines schweren Punktschadens

⁴² Wegfall des Streckenschadens

⁴³ Verschlechterung des Streckenschadens (Einzelschadensklasse 2 statt vorher 3)

5 Methodik zur Quantifizierung der Abnutzung von Abwasserkanälen

5.1 Einführung

Die in *SubKanS* entwickelte Prozesskette zur Quantifizierung der Abnutzung von Abwasserkanälen umfasst die folgenden Schritte:

1. Vorverarbeitung der Feststellungen (Schadenskodes)
2. Vorverarbeitung der Schadensbilder (Schadensüberlagerung)
3. Schadensgewichtung
4. Ermittlung der Abnutzung

Der Gesamtprozess zur Ermittlung der Abnutzung im *SubKanS*-Modellansatz wurde in verschiedenen Expertenrunden mit der Fachwelt diskutiert (siehe Anlagen 9 - 11) und weiterentwickelt. Die Methodik wird in den nachfolgenden Kapiteln erörtert.

Die Parametrisierung des *SubKanS*-Ansatzes erfolgte anhand statistischer Untersuchungen. Datenbasis, Methodik und Kalibrierung sind Gegenstand der Kapitel 6 und 7.

5.2 Vorverarbeitung der Feststellungen - Klassifizierung der Einzelzustände

5.2.1 Definition und begriffliche Klärung der Einzelschadensklassifizierung

Die Klassifizierung der Einzelzustände folgt grundsätzlich der Methodik gem. DWA-M 149-2 (DWA, 2013b) und DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) (vgl. Kap. 3.2.1).

Sämtliche Einzelschäden mit Codes zur Struktur und zum Betrieb der Rohrleitung führen zu einer Einschränkung der Funktion und somit zum Abbau des Abnutzungsvorrates. Die von den jeweiligen Schäden hervorgerufenen Funktionseinschränkungen betreffen dabei die jeweiligen, ihnen zugeordneten und von ihnen entsprechend der Bewertung beeinflussten Schutzziele Standsicherheit, Betriebssicherheit und Dichtheit. Alle Schäden können nur durch eine bauliche Sanierungsmaßnahme behoben werden. Als bauliche Maßnahme zählen in diesem Kontext alle Maßnahmen, die zur Behebung des Funktionsverlustes eingesetzt werden und über eine Reinigung hinausgehen.

Jeder Einzelschaden stellt eine Funktionsbeeinträchtigung und damit auch eine Substanzbeeinträchtigung dar. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Inspektion fachgerecht und regelwerkskonform

ausgeführt wurde und mit einer vorhergehenden Reinigung des Kanals ggf. vorhandene leichte betriebliche Einschränkungen, die keiner Sanierungsmaßnahme bedürfen, bereits beseitigt wurden. Auch bei der Inspektion festgestellte verfestigte Ablagerungen verursachen aus diesem Grund einen Handlungsbedarf und sind somit substanzrelevant.

5.2.2 Bestandsaufnahme von Rohrleitungen

Mit dem zweiten Buchstaben "C" eines Hauptkodes werden gem. DWA-M 149-2 (DWA, 2013b) bei der Inspektion Feststellungen zur Bestandsaufnahme aufgenommen. Reparaturstellen "BCB" haben für die Ermittlung des Handlungsbedarfs keine Bedeutung. Dementsprechend wird Reparaturstellen im Merkblatt DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) keine Klassifizierung zugeordnet.

Bei der Bewertung der Substanz einer Haltung hingegen weisen Reparaturen auf eine bereits erfolgte Abnutzung hin. Dies gilt auch für mit Hammer und Meißel erzeugte Anschlüsse "BCA EA", bei denen eine vollständige Funktionserfüllung in Zweifel gezogen werden kann.

Aus diesem Grund werden entsprechende Bestandsaufnahmen, die auf Reparaturstellen hinweisen, ebenfalls hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die drei Schutzziele und die Funktionsbeeinträchtigung untersucht. Gleiches gilt für Bestandskodes, welche auf Bauweisen hinweisen, die nicht dem heutigen Stand der Technik entsprechen.

5.2.3 Bauliche / Betriebliche Einzelschadensklasse

Nach Merkblatt DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) werden Einzelschäden in der Regel nach Schadensart und Schadensausmaß klassifiziert; bei einigen Schäden (z. B. Riss) werden auch die Nennweite und die Werkstoffart berücksichtigt. Die Klassifizierung erfolgt nach Zustandsklassen je Schutzziel, wobei die Zustandsklassen das Ausmaß bzw. die Schwere des festgestellten Mangels in Bezug auf das jeweilige Schutzziel beschreiben. Die Bewertung mit Zustandsklassen führt schließlich zu einer Priorisierung des Handlungsbedarfs.

Mit zunehmender Schwere des durch einen Einzelschaden verursachten Mangels nimmt die Dringlichkeit des Handlungsbedarfs zu. Einzelschäden mit gleicher Zustandsklasse wird die gleiche Dringlichkeit zugeordnet.

Der Einzelschaden hat bezüglich der Bewertung der Haltung eine eigenständige Bedeutung. In der Praxis werden von vielen Betreibern Einzelschäden hoher Dringlichkeit unabhängig von den sonstigen Schäden einer Haltung behoben, so z. B. bei erforderlichen Sofortmaßnahmen. In aller Regel dominiert der höchste Einzelschaden die prioritätsbezogene bauliche / betriebliche Zustandsklasse der Haltung.

In *SubKanS* wurde auf Grundlage des Merkblattes DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) ein Einzelschadens-katalog für Haltungen erstellt (siehe Anlage 2). Die Klassifizierung der Einzelzustände (bzw. der einzelnen Feststellungen) in Schadensklassen folgt dabei grundsätzlich der Einordnung gemäß DWA-M 149-2 (DWA, 2013b) sowie DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) in Zustandsklassen, wobei in begründeten Einzelfällen von der Klassifizierung abgewichen wurde. Beispiele sind:

- Reparaturstellen wird gemäß DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) keine Klassifizierung zugeordnet. Bei der Bewertung der baulichen Substanz einer Haltung hingegen weisen Reparaturen auf eine bereits erfolgte Abnutzung hin. Aus diesem Grund werden Feststellungen, die auf Reparaturstellen hinweisen, in die Einzelschadensklasse 4 (D/B) eingestuft. Dies gilt auch für mit Hammer und Meißel erzeugte Anschlüsse „BCA EA“, bei denen die vollständige Funktionserfüllung in Zweifel gezogen werden kann, sowie für Bestandskodes, welche auf Bauweisen hinweisen, die nicht dem heutigen Stand der Technik entsprechen.
- Bei den Feststellungen „Infiltration - Schwitzen“ (BBF A) und „Anhaftende Stoffe“ (BBB) wird die Einzelschadensklasse 4 (D/S/B) angesetzt.
- Schäden, die gem. DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) einer Einzelfallbetrachtung unterliegen, werden in Anlehnung an die Baufachliche Richtlinien Abwasser (BFR, 2019) klassifiziert.

5.3 Festlegung von Schadensart und Schadensausprägung, Schadensüberlagerung

5.3.1 Vorbemerkungen

Sowohl Punkt- als auch Streckenschäden werden oftmals über verschiedene Feststellungen (Kodes) beschrieben.

Ziel des *SubKanS*-Modellansatzes zur Abnutzungsermittlung ist, dass alle Schäden mit ihrer jeweiligen Schadensschwere berücksichtigt werden. Dabei gilt es zu vermeiden, dass den Schadensbildern, die über mehrere Feststellungen erfasst werden, allein aus diesem Grund tendenziell eine höhere Relevanz in Hinblick auf die Substanzbeeinträchtigung zugeordnet wird als jenen Schadensbildern, die durch nur eine Feststellung vollumfänglich beschrieben sind. Auch ist insbesondere für sich überlagernde Streckenschäden festzulegen, ob mehrere Feststellungen zu einem (z. B. Längsriss oben und unten) oder zu verschiedenen Schadensbildern (z. B. Längsriss und verfestigte Ablagerungen) gehören. Daher werden in diesem zweiten Schritt die einzelnen Feststellungen sachgerecht zu Schadensbildern wie folgt zusammengeführt:

Allen Feststellungen wird eine *Schadensart* und eine *Schadensausprägung* zugeordnet.

5.3.2 Zuordnung von Schadensart und Schadensausprägung

Jedem Schadenscode gem. DWA-M 149-2 (DWA, 2013b) bzw. DIN EN 13508-2 (DIN EN, 2011) wird in *SubKanS* genau eine Schadensart und eine Schadensausprägung zugeordnet (vgl. Tabelle 29). Eine vollständige Zuordnung zu den katalogisierten Feststellungen der DIN EN 13508-2 (DIN EN, 2011) findet sich in Anlage 4. Der *SubKanS*-Ansatz unterscheidet wie folgt:

- **Schadensart**
 - Punktschaden *PktS*
 - Umfangschaden *UmfS*
 - Streckenschaden *StrS*

- **Schadensausprägung**
 - durchdringender (wanddurchdringender und damit korrespondierender) Schaden *DdS*
 - Oberflächenschaden *OfS*
 - Schaden ohne Bezug zur baulichen Struktur *SoB*

Tabelle 29: Beispiele für die Zuordnung von Schadenscodes aus DIN EN 13508-2 (DIN EN, 2011) in Schadensart und Schadensausprägung nach *SubKanS*

Schadensart	Schadensausprägung		
	durchdringender Schaden	Oberflächenschaden	Schaden ohne Bezug zur baulichen Struktur
Streckenschaden	BAA A/B ...	BAF A ...	BAK B ...
Punktschaden	BAD A ...	BAK A ...	BAH A ...
Umfangschaden	BAI ...	BAB A B ...	BAL E...

Die einzelnen Feststellungen (Schäden) werden in *SubKanS* nach folgender Methodik zu Schadensbildern zusammengeführt:

- **durchdringende (wanddurchdringende und damit korrespondierende) Schäden**
 - **Punktschäden**

Alle Feststellungen mit identischer Position werden innerhalb der Schadensart *Punktschaden* und der Schadensausprägung *(wand)durchdringende (und damit korrespondierende) Schäden* zu einem Schaden zusammengefasst. Die auf das Schutzziel j bezogene Schadensklasse für das Schadensbild i $SK_{S, i, j}$ ergibt sich aus dem Minimum der jeweiligen schutzzielbezogenen Klassen der Einzelschäden/der einzelnen Feststellungen ($\text{Min } SK_{F, i, D} / \text{Min } SK_{F, i, S} / \text{Min } SK_{F, i, B} / \text{Min } SK_{F, i, G}$).
 - **Umfangschäden**

Alle Feststellungen mit identischer Position werden innerhalb der Schadensart *Umfangschaden* und der Schadensausprägung *(wand)durchdringende (und damit korrespondierende) Schäden* zu einem Schaden zusammengefasst. Die auf das Schutzziel j bezogene Schadensklasse für das Schadensbild i $SK_{S, i, j}$ ergibt sich aus dem Minimum der jeweiligen schutzzielbezogenen Klassen der Einzelschäden/der einzelnen Feststellungen ($\text{Min } SK_{F, i, D} / \text{Min } SK_{F, i, S} / \text{Min } SK_{F, i, B} / \text{Min } SK_{F, i, G}$).
 - **Streckenschäden**

Alle Feststellungen mit sich überschneidender Position werden innerhalb der Schadensart *Streckenschaden* und der Schadensausprägung *(wand)durchdringende (und damit korrespondierende) Schäden* zu einem Schaden zusammengefasst. Die auf das Schutzziel j bezogene Schadensklasse für das Schadensbild i $SK_{S, i, j}$ ergibt sich aus dem Minimum der jeweiligen schutzzielbezogenen Klassen der Einzelschäden/der einzelnen Feststellungen ($\text{Min } SK_{F, i, D} / \text{Min } SK_{F, i, S} / \text{Min } SK_{F, i, B} / \text{Min } SK_{F, i, G}$).

- **Oberflächenschäden**
 - **Punktschäden**

Alle Feststellungen mit identischer Position werden innerhalb der Schadensart *Punktschaden* und der Schadensausprägung *Oberflächenschaden* zu einem Schaden zusammengefasst. Die auf das Schutzziel j bezogene Schadensklasse für das Schadensbild i $SK_{S, i, j}$ ergibt sich aus dem Minimum der jeweiligen schutzzielbezogenen Klassen der Einzelschäden/der einzelnen Feststellungen ($\text{Min } SK_{F, i, D} / \text{Min } SK_{F, i, S} / \text{Min } SK_{F, i, B} / \text{Min } SK_{F, i, G}$).
 - **Umfangschäden**

Alle Feststellungen mit identischer Position werden innerhalb der Schadensart *Umfangschaden* und der Schadensausprägung *Oberflächenschaden* zu einem Schaden zusammengefasst. Die auf das Schutzziel j bezogene Schadensklasse für das Schadensbild i $SK_{S, i, j}$ ergibt sich aus dem Minimum der jeweiligen schutzzielbezogenen Klassen der

Einzelschäden/der einzelnen Feststellungen (Min $SK_{F,i,D}$ / Min $SK_{F,i,S}$ / Min $SK_{F,i,B}$ / Min $SK_{F,i,G}$).

- **Streckenschäden**

Alle Feststellungen mit sich überschneidender Position werden innerhalb der Schadensart *Streckenschaden* und der Schadensausprägung *Oberflächenschaden* zu einem Schaden zusammengefasst. Die auf das Schutzziel j bezogene Schadensklasse für das Schadensbild i $SK_{S,i,j}$ ergibt sich aus dem Minimum der jeweiligen schutzzielbezogenen Klassen der Einzelschäden/der einzelnen Feststellungen (Min $SK_{F,i,D}$ / Min $SK_{F,i,S}$ / Min $SK_{F,i,B}$ / Min $SK_{F,i,G}$).

- **Schäden ohne Bezug zur baulichen Struktur**

Jede Feststellung wird als einzelnes Schadensbild betrachtet. Die auf das Schutzziel j bezogene Schadensklasse für das Schadensbild i $SK_{S,i,j}$ ergibt sich aus der schutzzielbezogenen Klasse des entsprechenden Einzelschadens/der einzelnen Feststellung $SK_{F,i,j}$.

5.4 Berechnung des Schadensgewichts

Die Berechnung des Schadensgewichtes SG^{44} erfolgt über

- die Schadenslänge des Schadens i SL_i ,
- das Startgewicht des Schadens i StG_i und
- das Klassengewicht des Schadens i KG_i .

Das Schadensgewicht des Schadens i $SG_{i,j}$ errechnet sich wie durch Gleichung 11 beschrieben.

$$SG_{i,j} = SL_i \cdot StG_i \cdot KG_{i,j} \quad \text{Gleichung 11}$$

5.5 Ermittlung der Abnutzung

Die Abnutzung (ABN) entspricht der relativen, auf die Objektlänge OL bezogenen Bruttoschadenslänge BSL_{rel} . Sie errechnet sich für die Schutzziele j (D/S/B/G) gem. Gleichung 12.

$$ABN_{rel} = BSL_{rel,j} = \frac{BSL_{abs,j}}{OL} \leq 1 \quad \text{Gleichung 12}$$

⁴⁴ Die Parametrisierung von Schadenslänge, Startgewicht und Klassengewicht erfolgt im Rahmen der nachfolgend beschriebenen Untersuchungen (vgl. Kap. 7, hierbei insbesondere Ergebnisse aus Kap. 7.5.4).

Dabei ergibt sich die absolute Bruttoschadenslänge $BSL_{abs,j}$ für die Schutzziele j aus den Summen der Schadensgewichte $SG_{i,j}$ (vgl. Gleichung 13).

$$ABN_{abs} = BSL_{abs,j} = \sum_i SG_{i,j}$$

Gleichung 13

6 Datenbasis Abwasserkanäle

6.1 Einführung

Für die Untersuchungen zur Kalibrierung des entwickelten *SubKanS*-Ansatzes wurde eine Datenbasis mit Stamm- und Zustandsdaten von Kanalhaltungen zusammengestellt. Um möglichst viele Schadensfälle (unterschiedliche Schadensbilder mit verschiedenen Randbedingungen) abzubilden und damit für die Entwicklung des Algorithmus zur Abnutzungsermittlung viele unterschiedliche Schadensbilder als Grundlage nutzen zu können, wurde eine einerseits umfangreiche und andererseits für die modelltechnische Auswertung überschaubare Datenmenge angestrebt.

Dazu wurden verschiedene Kommunen angeschrieben, dass sie *SubKanS* durch Datenlieferungen unterstützen. Die zusammengetragenen Daten verschiedener Kanalnetzbetreiber wurden zuerst aufbereitet (vgl. Kap. 6.2) und anschließend in eine gemeinsame Datenbank (vgl. Kap. 6.3) überführt. Der aufgebaute Haltingsdatensatz besteht aus plausibilisierten und anonymisierten Stamm- und Inspektionsdaten von Kanalnetzbetreibern mehrerer deutscher Großstädte. Er wird im Rahmen von *SubKanS* eingesetzt, um

- i) die iterative Modellentwicklung zu unterstützen, indem Überlegungen zum Modellaufbau bezüglich ihrer Relevanz auf Netzebene untersucht werden,
- ii) den Rahmen für die zu kalibrierenden Modellparameter abzustecken (hier nur ein Teil des Datensatzes) und
- iii) das Modell zu validieren sowie die Robustheit des Modells zu untersuchen.

Dafür ist es erforderlich, dass der Datensatz auf der einen Seite die Realität in Kanalnetzen gut widerspiegelt und auf der anderen Seite möglichst viele Haltungseigenschaften und Schadenskombinationen beinhaltet. Das heißt, dass auch selten vorkommende Stammdaten und Schadenskombinationen in ausreichender Anzahl vorhanden sein müssen.

Der abschließend für die Modellentwicklung, -kalibrierung und -validierung zusammengestellte Datensatz wird in Kapitel 6.4 deskriptiv in Hinblick auf Repräsentativität und Heterogenität analysiert. Die Repräsentativität wurde durch den Vergleich mit zwei durchgeführten Umfragen der DWA zum Zustand der Kanalisation aus den Jahren 2015 (Berger et al., 2016) und 2020 (Berger et al., 2020) überprüft. Obwohl die Umfragen nicht das gesamte Kanalnetz in Deutschland widerspiegeln, sind sie für Deutschland die umfassendsten Quellen und liefern mit 339 bzw. 423 beteiligten Kanalnetzbetreibern eine gute Einschätzung der Repräsentativität. Die Heterogenität des Datensatzes wurde für Stamm- und Zustandsdaten, sowie für daraus abgeleitete weitere Schadenseigenschaften, die als Eingangsgröße in das entwickelte Substanzmodell eingehen, getrennt untersucht.

6.2 Datenanonymisierung und Datenaufbereitung

Vor Überführung der zusammengetragenen Kanalnetzinformationen in eine gemeinsame Datenbank waren die folgende Aufbereitungsschritte nötig, um die über verschiedene Kanalnetzbetreiber erhaltenen Stamm- und Zustandsdaten zu vereinheitlichen, zu anonymisieren, zu plausibilisieren und ggf. zu ergänzen bzw. zu korrigieren:

- **Datenanonymisierung**

Ein Zugeständnis an die Kanalnetzbetreiber, Daten für *SubKanS* zur Verfügung zu stellen, war eine Anonymisierung der überlassenen Daten. Dies sollte eine Rückverfolgung und eventuelle Zuordnung zu den Betreibern bei der Bearbeitung verhindern. Die Anonymisierung erfolgte durch eine neutrale Stelle der FH Aachen. Dabei wurden alle Betreiber bezogenen Informationen wie Haltungsname, Straßename, Ortsteil u. ä. gelöscht bzw. durch neutrale Angaben ersetzt.

- **Datenaufbereitung**

Die eigentliche Datenaufbereitung fand stufenweise statt. Hierzu wurden mehrere Routinen programmiert, um die einzelnen Stufen der Aufbereitung nachvollziehbar und wiederverwendbar zu machen. Die Datenaufbereitung wurde iterativ mit den *SubKanS*-Konsortialpartnern durchgeführt, da die unterschiedlichen Substanzmodelle der im Projekt beteiligten Modellanbieter unterschiedliche Anforderungen an die Qualität stellen. Als wichtigste Anpassungen sind zu nennen:

- **Anpassung der Referenztabellen**

Das XML-Format nach DWA-M 150 (DWA, 2010a) zum Austausch von Kanalstammdaten nutzt Referenztabellen, in denen wiederkehrende Attribute wie Kanalart, Material, Kanalnutzung u. ä. in LookUp-Tabellen gespeichert werden und im eigentlichen Datensatz nur der Schlüssel zur Referenz abgelegt ist. Diese Daten sind in der Regel betreiberspezifisch und wurden für den *SubKanS*-Projektdatensatz einheitlich angepasst.

- **Ersatz nicht vorhandener Daten**

Nicht alle Werte konnten im Projektdatensatz aus den Referenztabellen wiederhergestellt werden. Um eine einheitliche Interpretation der Daten durch die Modelle zu gewährleisten, wurden notwendige Daten mit entsprechenden Annahmen versehen (z. B. Lage im Verkehrsraum, Lage im Wasserschutzgebiet, u. ä.).

- **Anpassung von DWA-M 149-2 2006 (DWA, 2006b) auf 2013 (DWA, 2013b)**

Die vorliegenden Betreiberdaten wurden nach unterschiedlichen Normständen kodiert. Hier musste eine Vereinheitlichung geschaffen werden. Im Detail wurden insbesondere die Schadenskürzel BAK und BAL angepasst und auf den Normstand 2013

aktualisiert, sodass eine einheitliche Bearbeitung und Interpretation möglich wurde. Zusätzlich wurde beim Schadenscode BAB eine Harmonisierung zwischen der Quantifizierung und der Charakterisierung durchgeführt. Quantifizierung und Charakterisierung beschreiben an dieser Stelle den gleichen Sachverhalt und müssen entsprechend korrespondieren. In Einzelfällen war dies nicht gegeben, sodass die Quantifizierung als führende Größe angenommen und die Charakterisierung entsprechend angepasst wurde.

- **Anwendung der Einzelzustandsklassifizierung nach DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) und nach *SubKanS***

DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) sieht die Vergabe von Einzelschadensklassen für jeden Schaden gemäß des Schadenscodes, der Quantifizierung und der Charakterisierung vor. Die Einzelschadensklassifizierung erfolgte nach Normvorgabe für den gesamten Datensatz. Anschließend wurden die in *SubKanS* beschlossenen (substanzbezogenen) Adaptionen der Einzelschadensklassen (vgl. Kap. 5.2.3) für den Gesamtdatenbestand durchgeführt.

- **Formale und logische Datenplausibilisierung**

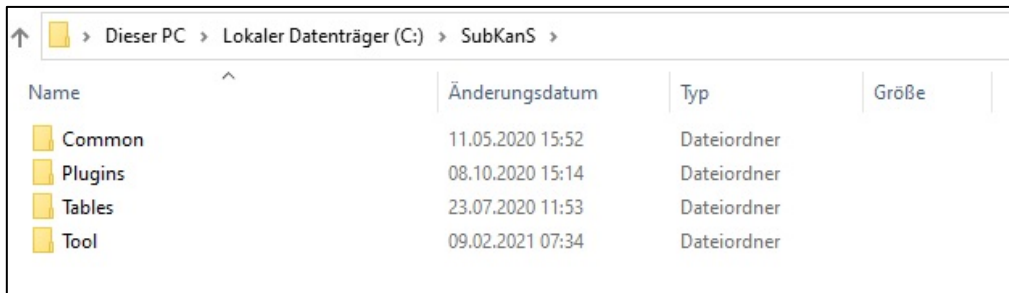
Kanalstamm- und -inspektionsdaten können auf unterschiedliche Weise inhomogen sein. Zum einen kann die formale bzw. syntaktische Form der Daten fehlerhaft sein. Dies führt dazu, dass Modelle die Daten ggf. nicht einlesen können. Zum anderen können logische Fehler in den Daten vorliegen. Dies ist der Fall, wenn z. B. ein Schadensbild nicht zu den Stammdaten passt. Deshalb wurde eine Prüfmatrix mit insgesamt ca. 180 Abfragen erstellt, die die Gesamtdaten auf formale und logische Plausibilität prüfen. Wurde eine Prüfung nicht erfüllt, wurde das im entsprechenden Datensatz mit einem Fehlercode vermerkt. Der entsprechende Datensatz wurde bewusst nicht gelöscht, damit eine spätere Auswertung der in *SubKanS* entwickelten Systematik auch auf fehlerhafte Daten ermöglicht wird (siehe auch Kap. 8).

6.3 Datenbankaufbau

Für die Datenhaltung der Stammdaten inklusive der Inspektionsbefunde wurde eine SQLite-Datenbank verwendet. Diese ist passwortgeschützt und kann über ein in *SubKanS* aufgebautes Datenbank-Tool bearbeitet und ausgelesen werden.

Das Datenbank-Tool wurde mittels Windows Presentation Foundation (WPF) unter dem .NET-Framework entwickelt. Tool, Datenbank und entsprechende Konfigurationsdateien können mittels Copy & Paste an einen selbst gewählten Ablageort verschoben werden. Dabei ist sicherzustellen, dass der Anwender am Ablageort entsprechende Schreib- und Lesezugriffe besitzt.

Der übergeordnete Ordner zum Tool besitzt die in Bild 31 dargestellte Ordnerstruktur.

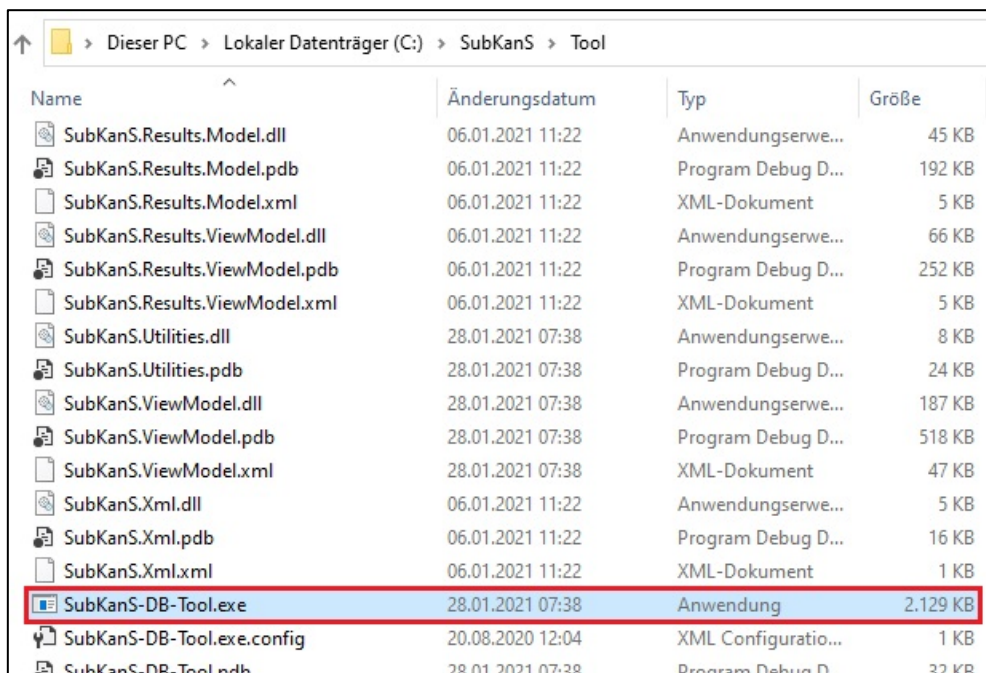


Name	Änderungsdatum	Typ	Größe
Common	11.05.2020 15:52	Dateiordner	
Plugins	08.10.2020 15:14	Dateiordner	
Tables	23.07.2020 11:53	Dateiordner	
Tool	09.02.2021 07:34	Dateiordner	

Bild 31: Datenbank-Tool: Ordnerstruktur

Im „Common“-Ordner befinden sich die Konfigurationsdateien für das Tool. Im „Plugin“-Ordner sind die verschiedenen Funktionalitäten für diverse Import-/Export- und Filterfunktionen enthalten. Der Ordner „Tables“ enthält die Langtext-Definition der Kürzel für die Einträge (nach DWA-M 150 (DWA, 2010a)).

Das Tool kann mit Doppelklick der „SubKanS-DB-Tool.exe“ im Unterordner „Tool“ gestartet werden (vgl. Bild 32).



Name	Änderungsdatum	Typ	Größe
SubKanS.Results.Model.dll	06.01.2021 11:22	Anwendungserwe...	45 KB
SubKanS.Results.Model.pdb	06.01.2021 11:22	Program Debug D...	192 KB
SubKanS.Results.Model.xml	06.01.2021 11:22	XML-Dokument	5 KB
SubKanS.Results.ViewModel.dll	06.01.2021 11:22	Anwendungserwe...	66 KB
SubKanS.Results.ViewModel.pdb	06.01.2021 11:22	Program Debug D...	252 KB
SubKanS.Results.ViewModel.xml	06.01.2021 11:22	XML-Dokument	5 KB
SubKanS.Utilities.dll	28.01.2021 07:38	Anwendungserwe...	8 KB
SubKanS.Utilities.pdb	28.01.2021 07:38	Program Debug D...	24 KB
SubKanS.ViewModel.dll	28.01.2021 07:38	Anwendungserwe...	187 KB
SubKanS.ViewModel.pdb	28.01.2021 07:38	Program Debug D...	518 KB
SubKanS.ViewModel.xml	28.01.2021 07:38	XML-Dokument	47 KB
SubKanS.Xml.dll	06.01.2021 11:22	Anwendungserwe...	5 KB
SubKanS.Xml.pdb	06.01.2021 11:22	Program Debug D...	16 KB
SubKanS.Xml.xml	06.01.2021 11:22	XML-Dokument	1 KB
SubKanS-DB-Tool.exe	28.01.2021 07:38	Anwendung	2.129 KB
SubKanS-DB-Tool.exe.config	20.08.2020 12:04	XML Configuratio...	1 KB
SubKanS-DB-Tool.pdb	28.01.2021 07:38	Program Debug D...	32 KB

Bild 32: Datenbank-Tool: Aufruf

Beim Start des Datenbank-Tools erscheint ein Login-Fenster, und unter Angabe des registrierten Benutzernamens und dem entsprechenden Passwort erhält der Anwender Zugang (Bild 33).

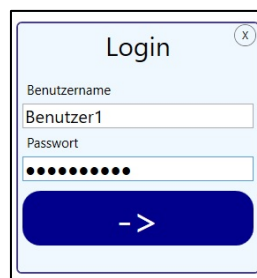


Bild 33: Datenbank-Tool: Login-Fenster

Beim erstmaligen Start der Anwendung erscheint das in Bild 34 dargestellte Fenster mit den Reitern „Daten“, „Import“ und „Benutzer-Management“. Der Import von Daten und die Verwaltung von Benutzerrechten obliegt nur Anwendern mit Admin-Zugriffsrechten.

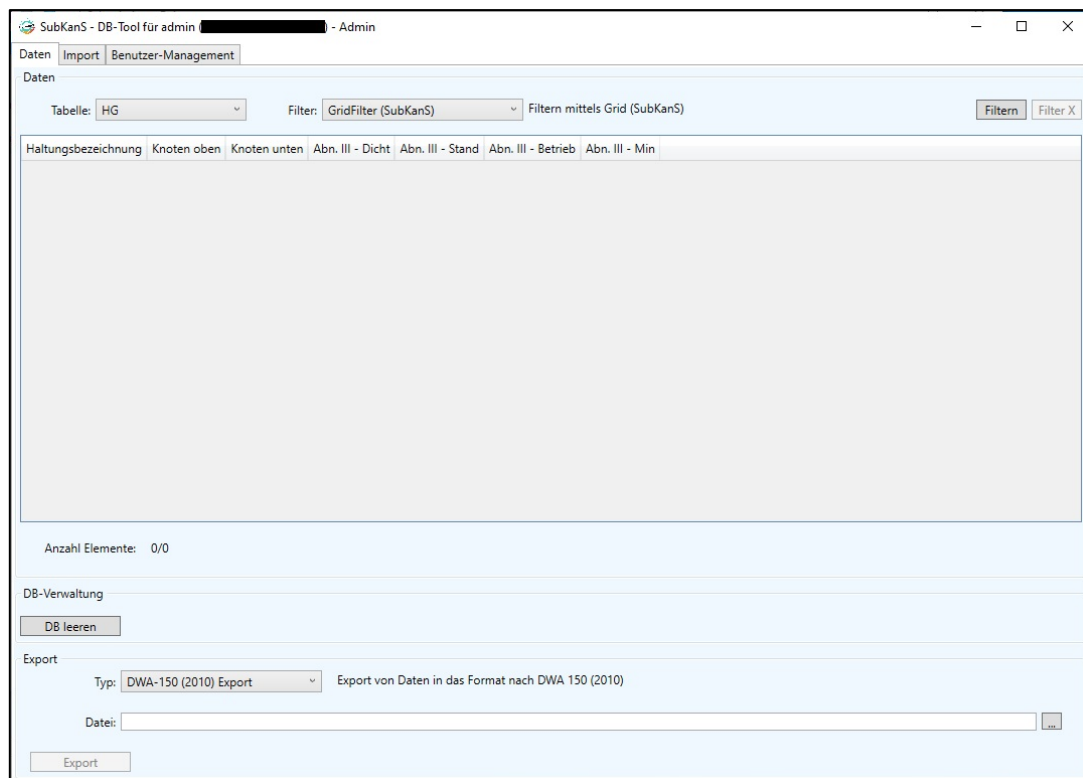


Bild 34: Datenbank-Tool: Ansicht nach Start ohne eingeleseene Daten

Über den Reiter „Import“ können die Stamm- sowie Zustandsdaten der Haltungen importiert werden (Bild 35). Es besteht die Möglichkeit, Daten sowohl aus einem csv-Format als auch aus einem xml-Format nach DWA-M 150 (DWA, 2010a) einzulesen. Nach Auswahl der Importdatei werden zur Information die eingelesebenen Stammdaten angezeigt. Mit Klicken des „Import“-Buttons wird die Auswahl bestätigt, und die Haltungsdaten werden in der Datenbank abgespeichert.

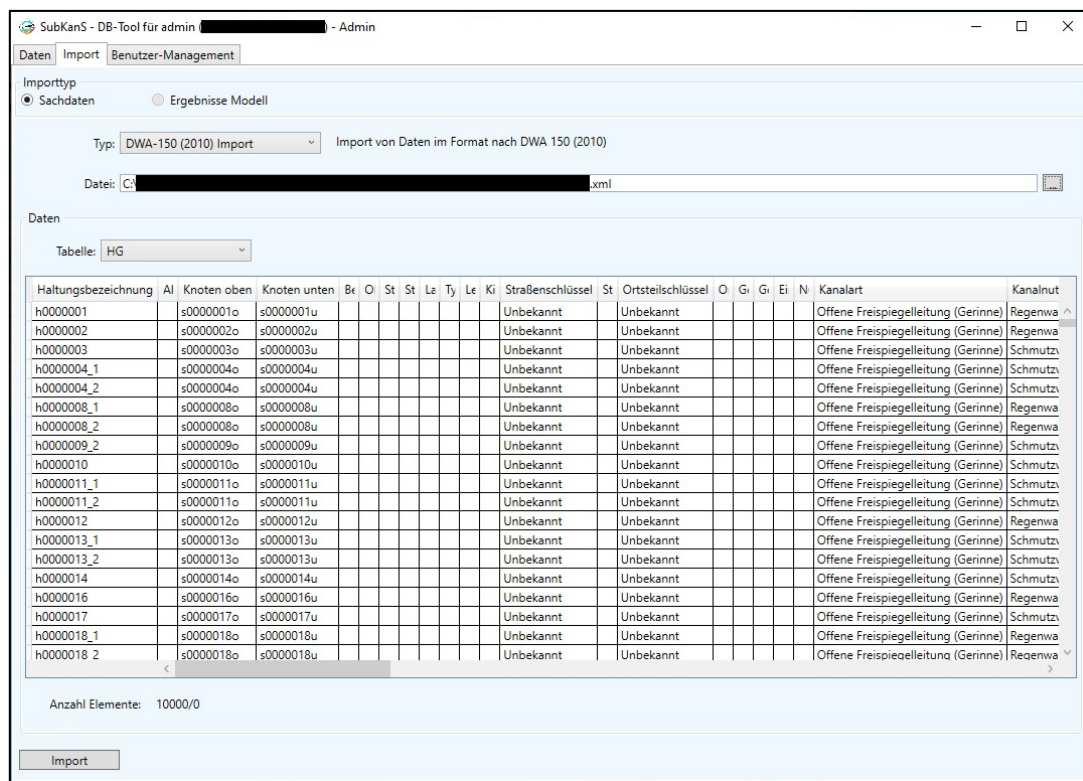


Bild 35: Datenbank-Tool: Import-Funktionen

Bei vorhandenen Daten erscheint in der Gesamtansicht des Datenbank-Tools ein weiterer Reiter „Berechnungen“ für die Berechnung der Abnutzung.

In folgendem Bild 36 ist das Datenbank-Tool mit den Stammdaten der Haltungen für den Projektdatensatz dargestellt. Das Kürzel „HG“ in der Auswahl steht hierbei für „Haltungen“ und ist perspektivisch erweiterbar für weitere Ausgaben.

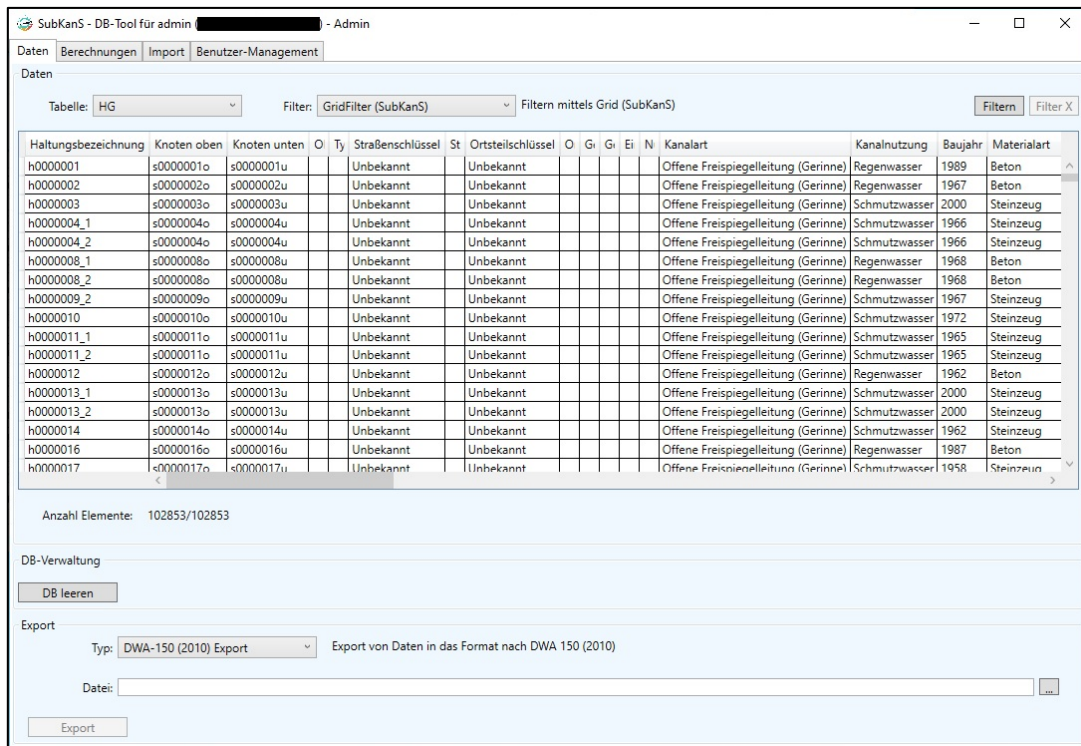


Bild 36: Datenbank-Tool: Ansicht Stammdaten

Das Datenbank-Tool ermöglicht für weitere Analysen bzw. Exportfunktionalitäten eine Vorauswahl von Objekten mittels verschiedener Filteroptionen. Diese können über Auswahl des Filters und Klicken von „Filter“ verwendet werden. Alle bisherigen Filter können mit dem Button „Filter X“ bei Bedarf wieder zurückgesetzt werden. Im Folgenden werden die verschiedenen Funktionalitäten näher beschrieben.

- **GridFilter (SubKans)**

Der GridFilter ermöglicht aus den Stammdaten ein Gruppieren und Sortieren nach den jeweiligen Eigenschaften der Haltungen. Über eine Auswahl anzuzeigender Haltungen durch das Setzen von Filtern kann eine gewünschte spezifische Auswahl der zu verwendenden Objekte erzeugt werden. Über „Filter anwenden“ wird die Auswahl bestätigt und im Tool als Datensatz angezeigt. Bei ausgewähltem Filter „GridFilter (SubKans)“ erscheint der in Bild 37 dargestellte Dialog.

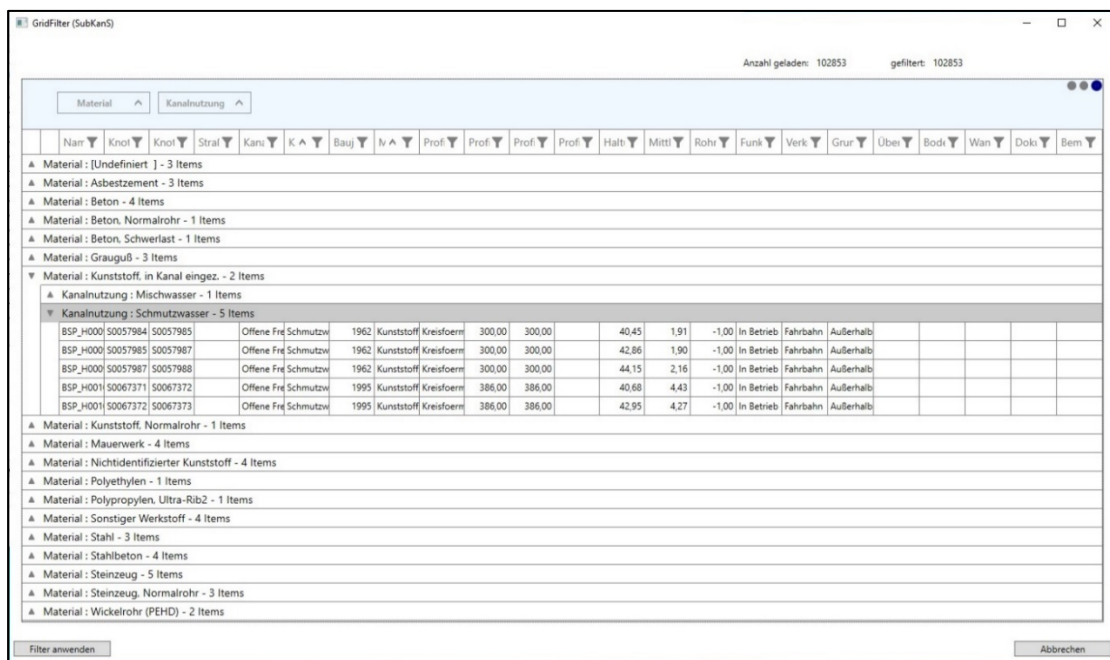


Bild 37: Datenbank-Tool: Filteroption „GridFilter“

- **Zufällige Auswahl (SubKans)**

Im Dialog „Zufällige Auswahl (SubKans)“ (Bild 38) kann die Anzahl der zu untersuchenden Objekte manuell festgelegt werden. Dabei wird die festgelegte Anzahl aus der Gesamtheit der Haltungen zufällig gezogen.

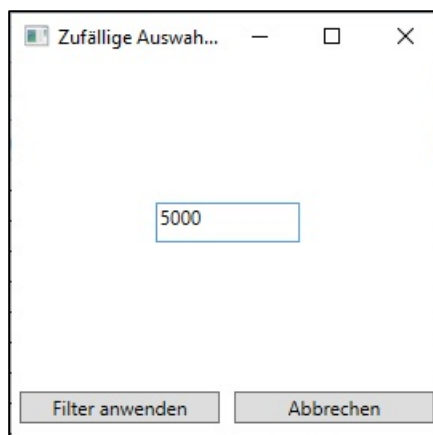


Bild 38: Datenbank-Tool: Filteroption „Zufällige Auswahl (SubKans)“

- **Export SubKans**

Für den Export an die Modellanbieter (Bild 39) werden nur plausibilisierte Haltungen mit mehr als zwei Inspektionsbefunden verwendet (Mindestangabe: Inspektionsanfang, Inspektionsende und minimal ein weiterer Befund). Dies sichert zum einen die Konsistenz der Daten. Zum anderen werden dadurch nur Haltungen übergeben, die eine Abnutzungs- und Substanzbewertung durch die Modellanbieter zulassen (keine „schadensfreien“ Haltungen).

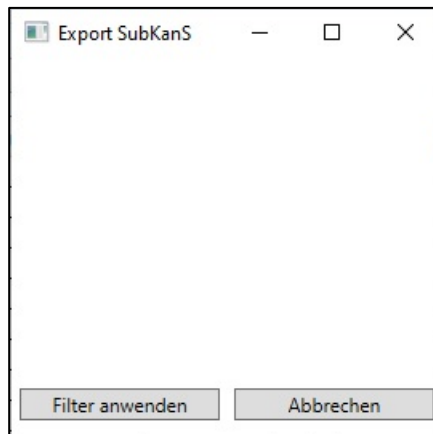


Bild 39: Datenbank-Tool: Export *SubKanS*

Exemplarisch ist in Bild 40 das Ergebnis des Datenbank-Tools für eine zufällige Auswahl von 50.000 Haltungen dargestellt.

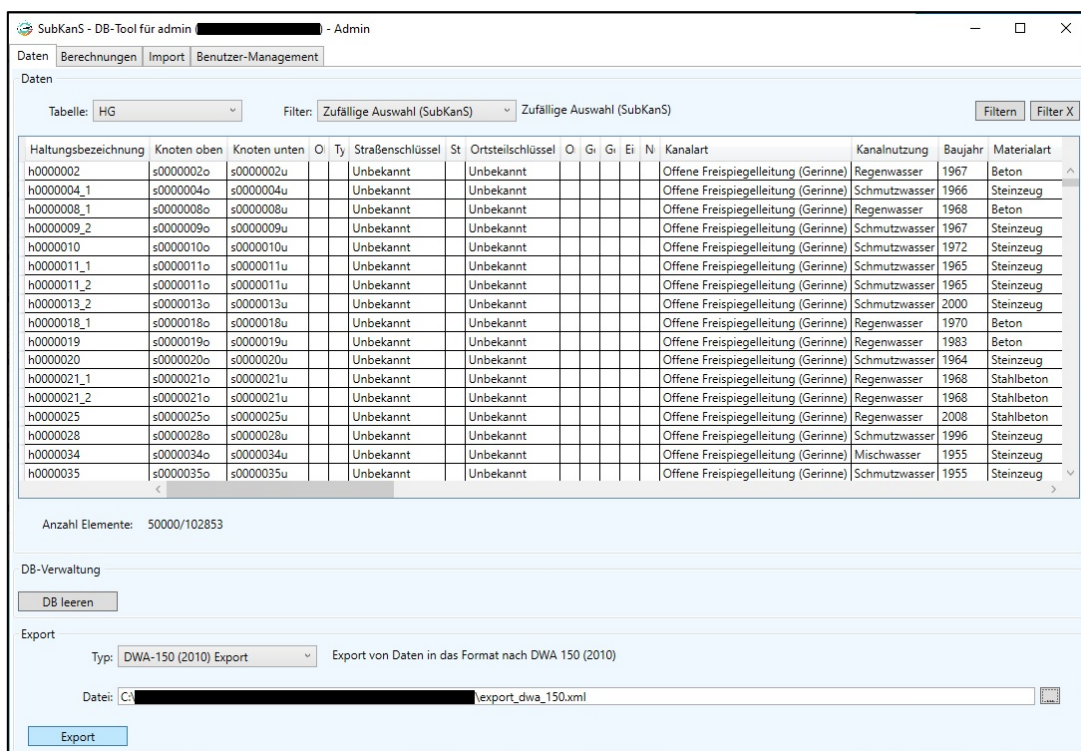


Bild 40: Datenbank-Tool: Ansicht Stammdaten und Export-Funktionalität

Über den Export können die gewählten Daten im csv-Format oder im xml-Format nach DWA-M 150 (DWA, 2010a) für weitere externe Analysen ausgegeben werden.

Die Berechnung der Abnutzung nach dem *SubKanS*-Algorithmus ist über den Reiter „Berechnungen“ möglich (siehe Bild 41).

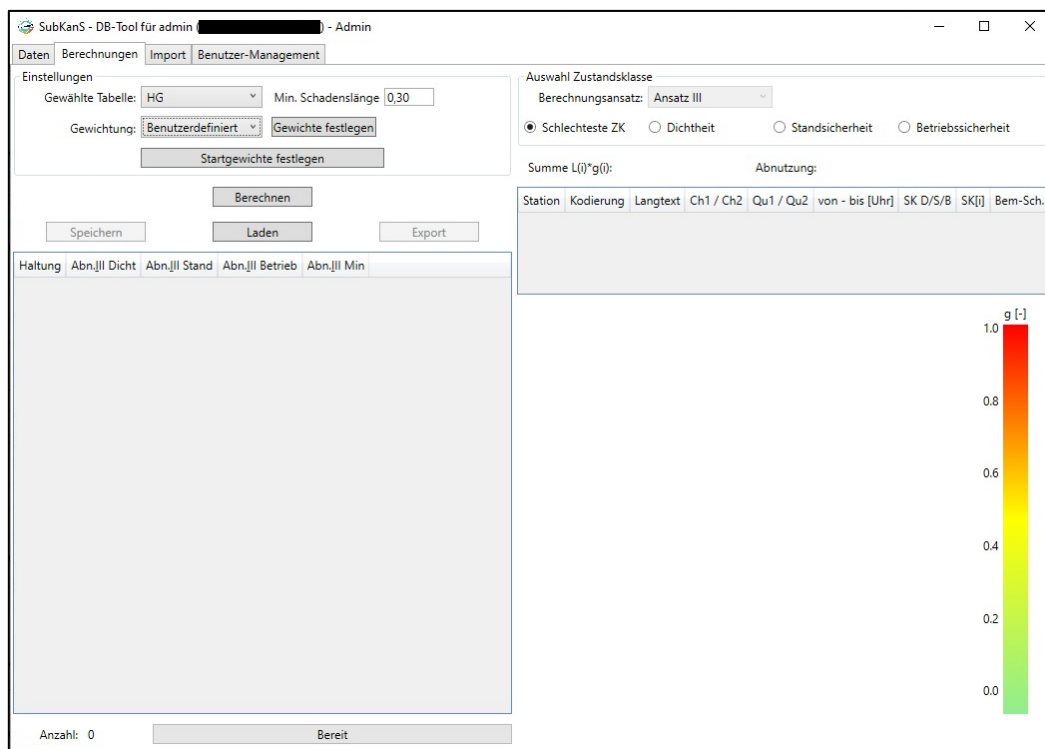


Bild 41: Datenbank-Tool: Ansicht Berechnungen

Im Bereich „Einstellungen“ können die Gewichtungen der verschiedenen Schadensklassen festgelegt werden. Einige Gewichtungen wurden fest hinterlegt (siehe Tabelle 30). Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Klassengewichte und Startgewichte manuell einzugeben.

Tabelle 30: Vorgaben Klassengewicht KG

Schadensklasse	Linear	Exp_Halbiert	Exp_DWA
0	1	1	1
1	0,8	0,5	1
2	0,6	0,25	0,3
3	0,4	0,125	0,09
4	0,2	0,0625	0,027
5	0	0	0

6.4 Deskriptive Analyse des Projektdatensatzes

6.4.1 Repräsentativität des Projektdatensatzes

Der zusammengestellte Haltungsdatensatz besteht nach Anonymisierung und Plausibilisierung aus 100.532 Haltungen, die sich über eine Gesamtlänge von 3.989 km erstrecken. In Tabelle 31 sind das durchschnittliche Baujahr, das Durchschnittsalter und die Haltungslänge sowie die Anzahl der Haltungen pro Zustandsklasse aufgelistet. Abzüglich der schadensfreien Haltungen (ZK5) stehen 79.966 Haltungen für die Bewertung des entwickelten Modells zur Verfügung.

Tabelle 31: Übersicht über Haltungsanzahl und -länge pro Zustandsklasse im Projektdatensatz mit Angabe des durchschnittlichen Baujahrs und Alters (arithmetisches Mittel)

Zustands- klasse ⁴⁵	Anzahl Haltungen	Gesamtlänge [km]	Durchschnitt Baujahr	Durchschnitt Alter ⁴⁶
Gesamt	100.532	3.989	1973	38
5	20.566	854	1990	20,4
4	11.608	421	1975	38,4
3	17.513	651	1974	37,5
2	26.196	1.053	1966	45,2
1	21.358	875	1965	44,4
0	3.291	135	1962	46,9

Die Altersverteilung und die Verteilung des Materials wurden mit der DWA-Umfrage aus dem Jahr 2020 (Berger et al., 2020) verglichen (Bild 42). Die Zusammensetzung der Haltungen im Projektdatensatz spiegelt die Umfrageergebnisse gut wider. Besonders gut passen sie zu der DWA-Rubrik „KAGemeinden > 250.000 EW“. Da die Haltungen des Datensatzes hauptsächlich aus Großstädten stammen, ist dieses Ergebnis erwartungsgemäß.

⁴⁵ Zustandsklasse ZK gem. DWA-M 149-3 (DWA, 2015a)

⁴⁶ Alter zum Zeitpunkt der Inspektion

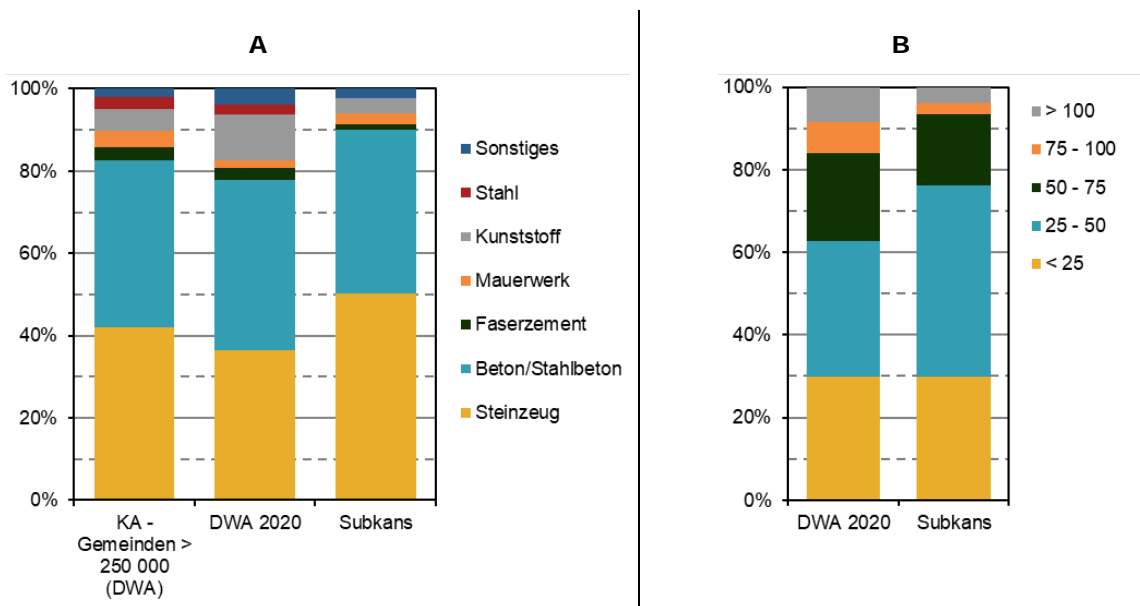


Bild 42: Verteilung von Materialart (A) und Haltungsalter (B) im Projektdatensatz und in der DWA-Umfrage (Berger et al., 2020)

Bei den im Datensatz vorhandenen Haltungen handelt es sich zu 42 % um eine Regenwasser-, zu 40 % um eine Schmutzwasser- und zu 18 % um eine Mischwassernutzung. Haltungen mit Mischwassernutzung sind in dem Projektdatensatz etwas unterrepräsentiert. Sie machen nach (Berger et al., 2020) in Deutschland mit 42 % den größten Anteil aus, gefolgt von Schmutzwasserkanälen mit 36 % und Regenwasserkanälen mit 22 %.

Die Haltungen des Datensatzes sind zwischen 0,4 m und 300 m lang, wobei sich die meisten Haltungen im Bereich zwischen 30 m und 60 m bewegen (Bild 43). Der Durchschnitt im Projektdatensatz liegt mit 39,7 m sehr nahe am gesamtdeutschen Durchschnitt von 39,1 m (Berger et al., 2020).

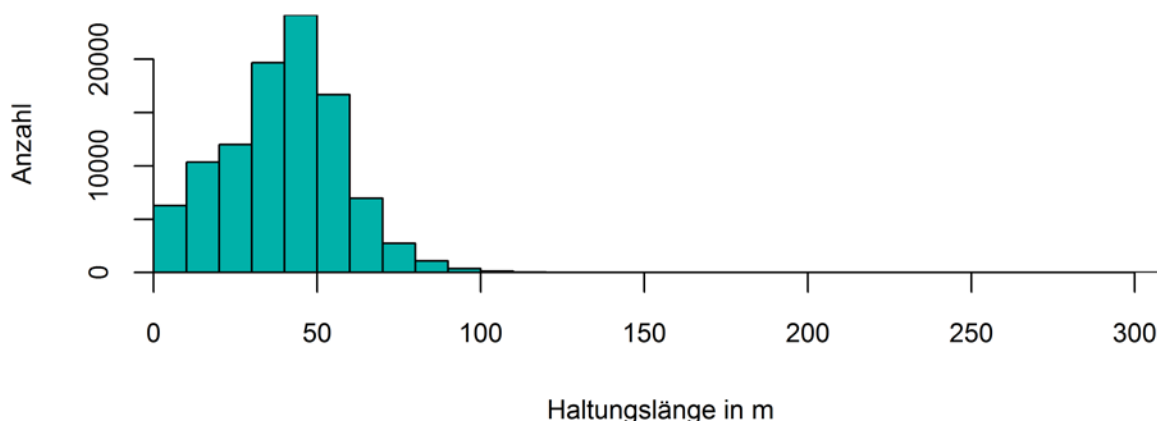
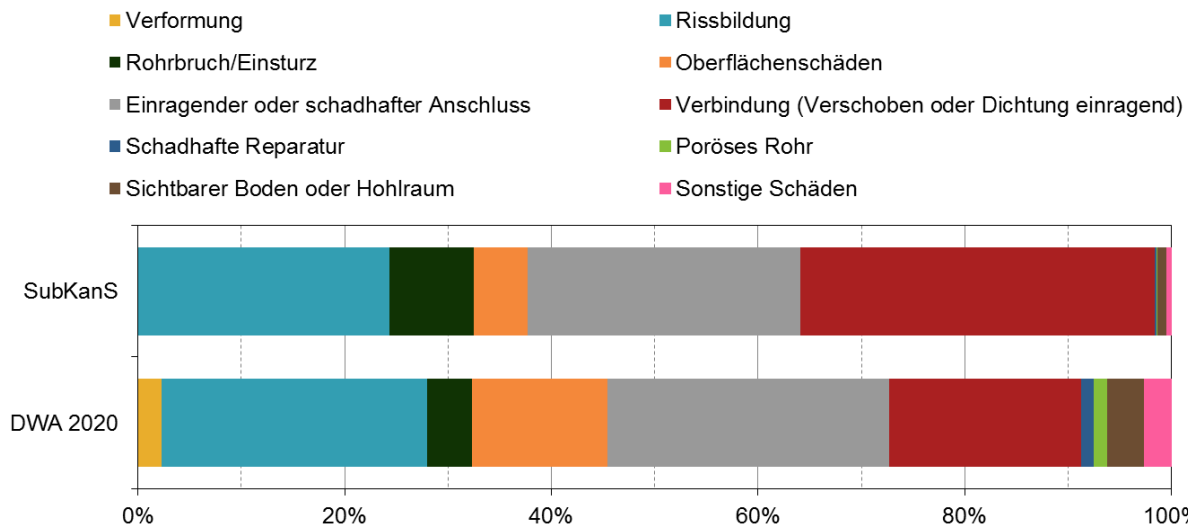


Bild 43: Histogramm der Haltungslänge im Projektdatensatz

Im Zuge o. g. DWA-Umfrage wurde untersucht, wie häufig bestimmte Schäden vorkommen. Für einen Vergleich mit den dort ermittelten Häufigkeiten wurden die im Projektdatensatz vorhandenen Hauptkodes zu Gruppen analog der Umfrage zusammengefasst. Der Vergleich wurde separat für bauliche und für betriebliche Schäden durchgeführt (Bild 44). Die häufigsten Schäden zur baulichen Struktur sind bei beiden Datensätzen „Rissbildung“, „einragender oder schadhafter Anschluss“ und „schadhafte Verbindungen (verschoben oder einragend)“. Dahinter befinden sich „Rohrbruch“ und „Oberflächenschäden“, wobei ersterer im *SubKanS*-Datensatz und letztere in der DWA-Umfrage etwas häufiger vorkommen. Vor allem das Schadensbild „Verformung“ ist im Projektdatensatz nur wenig vertreten. Auch bei den Schäden zur betrieblichen Struktur sind in beiden Datensätzen gleichermaßen die drei Schäden „Wurzeln“, „anhaftende Stoffe“ und „Infiltration“ dominant. Die in der DWA-Umfrage bereits mit geringer Häufigkeit angegebenen Schäden „Exfiltration“ und „Eindringen von Bodenmaterial“ sind im *SubKanS*-Datensatz seltener vertreten.

Insgesamt liegen bei den Haltungen des Projektdatensatzes durchschnittlich 4,9 Schäden pro Haltung vor (gemäß Schadenskatalog aus DWA-M 149-3 (DWA, 2015a)). Bei der DWA-Umfrage 2015 (Berger et al., 2016) waren es 3,5 Schäden pro Haltung. Die höhere Schadensdichte im Projektdatensatz spiegelt sich auch in der Verteilung der Zustandsklassen wider. Ungefähr die Hälfte der Haltungen aus dem Projektdatensatz befindet sich in den Zustandsklassen 0 bis 2, während in der DWA-Umfrage Haltungen mit mittleren bis starken Schäden nur ca. ein Viertel aller Haltungen ausmachen.

Schäden zur baulichen Struktur



Schäden zur betrieblichen Struktur

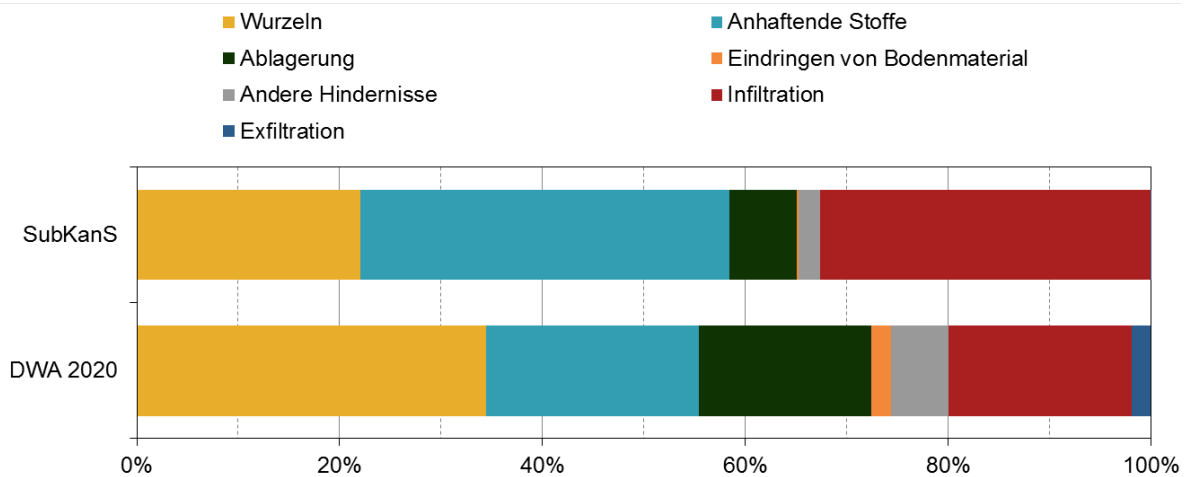


Bild 44: Verteilung der Feststellungen im Projektdatensatz und in der DWA-Umfrage von 2020 (Berger et al., 2020)

Fazit

Materialart, Alter und Haltungslänge deuten zusammenfassend darauf hin, dass der in *SubKanS* aufgebaute Haltingsdatensatz die Realität in vielen Punkten gut abbildet. Insgesamt scheinen die Hal-tungen jedoch etwas stärker beschädigt zu sein als im deutschlandweiten Durchschnitt. Das Risiko, eine Modellannahme oder einen Modellbaustein fälschlicherweise als nicht relevant zu bewerten, wird durch die erhöhte Schadensanzahl verringert. Der Projektdatensatz eignet sich demnach dazu, Aus-sagen über die Relevanz einzelner Annahmen auf Netzebene zu machen.

6.4.2 Heterogenität des Projektdatensatzes

Für die Validierung des Modells wird ein heterogener Datensatz benötigt. Neben den bereits unter Kapitel 6.4.1 beschriebenen Stammdaten „Haltungslänge“ und „Materialart“ ist als weitere Halte-eigenschaft auch der Durchmesser relevant, da er an der Berechnung der Substanz beteiligt ist. Die Verteilung des Durchmessers im Projektdatensatz ist in Bild 45 dargestellt. Die meisten Haltungen weisen einen Durchmesser von 200, 250 oder 300 mm auf. Über 3.000 Haltungen haben einen Durchmesser von mindestens 800 mm, was in etwa 3,8 % der Gesamthaltungszahl mit Schäden entspricht.

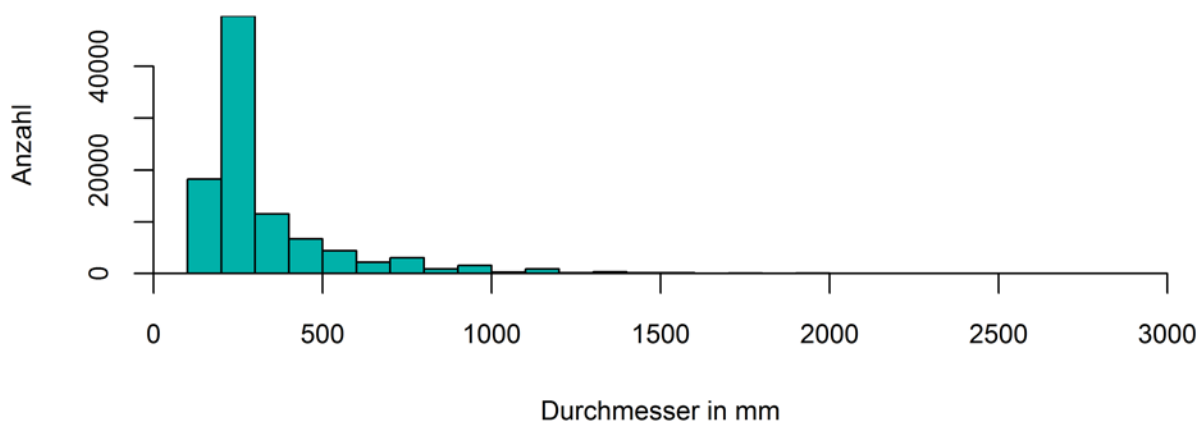


Bild 45: Histogramm des Haltungsdurchmessers im Projektdatensatz

Eine große Variabilität in Schadenseigenschaften und Schadensmustern ist entscheidend für die Erstellung eines robusten Substanzmodells. Insgesamt traten im verwendeten Datensatz 25 verschiedene Hauptcodes auf, die für die Substanzberechnung relevant sind. Diese wurden durch die erste und zweite Charakterisierung in insgesamt 258 unterschiedliche Schadenscharaktere spezifiziert. Da BCA- und BCB-Kodierungen einen Einfluss auf die Substanz haben können (vgl. Kap. 5.2.3), wurden diese in die Statistik zur Schadensverteilung aufgenommen. Die mit Abstand häufigsten Umfangschäden sind verschobene Verbindungen (BAJ). Bei den Punktschäden sind schadhafte Anschlüsse (BAH), Rissbildung (BAB) und gemeißelte Anschlüsse (BCA) besonders präsent im Datensatz. Bei Streckenschäden machen die Oberflächenschäden (BAF) den mit Abstand größten Längenanteil aus, gefolgt von anhaftenden Stoffen (BBB) und der Rissbildung. Die Schadensbilder BAJ und BAI werden häufig als Streckenschäden kodiert, obwohl es sich um punktuelle Schäden handelt, die jedoch innerhalb einer Haltung wiederholt auftreten können. (vgl. Bild 46)

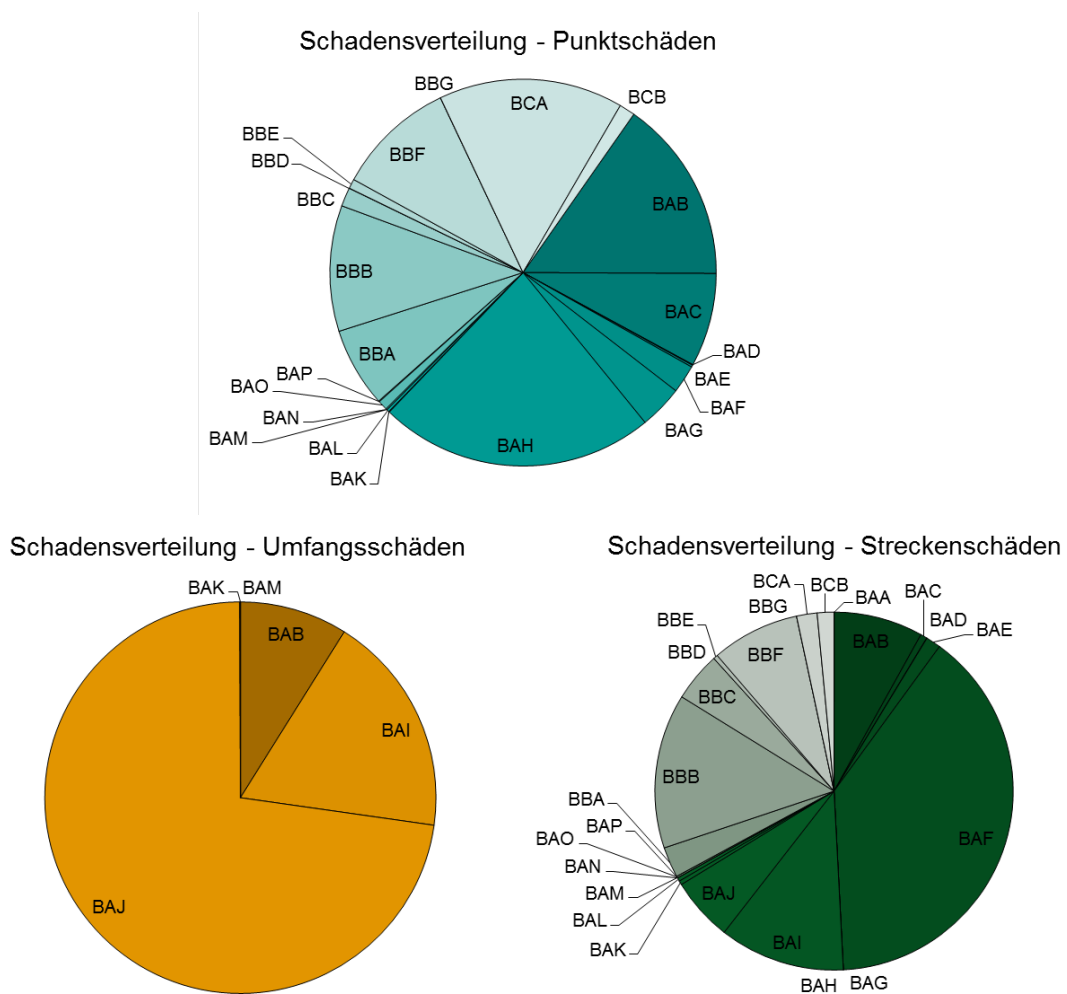


Bild 46: Verteilung der Hauptkodes nach DWA-M 149-2 (DWA, 2013b) im Projektdatensatz, getrennt für Punkt-, Umfang- und Streckenschäden

Für die Kalibrierung und die Validierung des Modells ist es außerdem notwendig, dass eine ausreichende Menge an Haltungen mit hoher Schadensdichte im Datensatz vorhanden ist. Unabhängig von den im Verlauf von *SubKanS* neu definierten Umfangschäden war von vornherein vorgesehen, dass Punkt- und Streckenschäden unterschiedlich in die Berechnung der Substanz eingehen. Es war deshalb notwendig zu kontrollieren, ob beide Schadensarten in ausreichendem Ausmaß und in unterschiedlichen Anteilen auf Haltungen im Projektdatensatz vorkommen.

Wie in Bild 47 zu erkennen ist, liegen bei den meisten Haltungen mehr Punkt- als Streckenschäden vor. Über die Hälfte der beschädigten knapp 80.000 Haltungen besitzen keine Streckenschäden, wohingegen nur 3.961 Haltungen keine Punktschäden aufweisen. Am häufigsten kommen ein oder zwei Punktschäden pro Haltung vor. Es gibt jedoch auch knapp 15.000 Haltungen mit mehr als 10 Punktschäden. Insgesamt sind viele verschiedene Kombinationen aus Punkt- und Streckenschäden vorhanden, wobei Haltungen mit 0 bis 2 Streckenschäden und 0 bis über 10 Punktschäden den Datensatz dominieren.

		Anzahl an Streckenschäden pro Haltung												
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	> 10	
Anzahl an Punktschäden pro Haltung	0	0	3124	577	164	64	19	8	3	0	1	1	0	3961
	1	12129	2300	574	181	59	28	12	12	4	2	0	0	15301
	2	8259	1990	554	193	84	39	16	12	2	1	0	4	11154
	3	5543	1674	503	202	87	29	14	7	1	1	1	2	8064
	4	4140	1431	452	185	71	33	14	13	3	4	2	4	6352
	5	3124	1207	408	167	80	35	27	9	2	1	6	2	5068
	6	2591	1042	351	156	66	33	28	13	9	1	2	0	4292
	7	1996	954	336	132	92	29	23	11	7	7	3	9	3599
	8	1530	795	316	145	84	35	19	14	7	6	4	5	2960
	9	1252	696	266	129	67	49	15	9	10	3	5	6	2507
	10	991	552	226	128	86	40	13	14	9	4	8	3	2074
	> 10	5650	3918	1982	1170	668	447	274	171	100	89	61	94	14624
		47205	19683	6545	2952	1508	816	463	288	154	120	93	129	

Bild 47: Punktschäden-Streckenschäden-Matrix mit der Anzahl an Haltungen pro Kategorie (schadensfreie Haltungen ausgeschlossen)

Der entwickelte Modellansatz unterscheidet Einzelschäden nicht nur in Punkt- und Streckenschäden, sondern führt mit Umfangschäden eine dritte Schadensart ein. Im Zuge der Überlegungen zur Überlagerung von Schäden wurden über die Schadenscodes außerdem Schadensausprägungen definiert (siehe Kap. 5.3.2). Für die Kalibrierung der Modellparameter ist es notwendig, dass Schadensart, Schadensausprägung und Einzelschadensklasse in unterschiedlichen Kombinationen vorhanden sind. Bild 48 zeigt die Verteilung von Schadensart und Schadensausprägung pro Einzelschadensklasse. Die häufigste Schadensart der Einzelschadensklassen 1 bis 4 sind Punktschäden. Vor allem in den Einzelschadensklassen 1 und 3 handelt es sich dabei vorwiegend um durchdringende Schäden. Bei den Einzelschadensklassen 2 und 4 spielen auch Schäden ohne Bezug zur baulichen Struktur eine größere Rolle. Es gibt insgesamt nur 4.192 Schäden mit der Einzelschadensklasse 0. Diese bestehen vorrangig aus durchdringenden Umfangschäden. Bei Einzelschadensklasse 4 treten neben den durchdringenden auch Umfangschäden ohne Bezug zur baulichen Struktur auf. Die Schadensausprägung Oberflächenschaden fehlt weitestgehend bei Punkt- und Umfangschäden. Bei Streckenschäden macht sie jedoch einen großen Teil vor allem in den Einzelschadensklassen 2 und 3 aus. In den gleichen Einzelschadensklassen kommen ebenfalls viele durchdringende Streckenschäden und solche ohne Bezug zur baulichen Struktur vor.

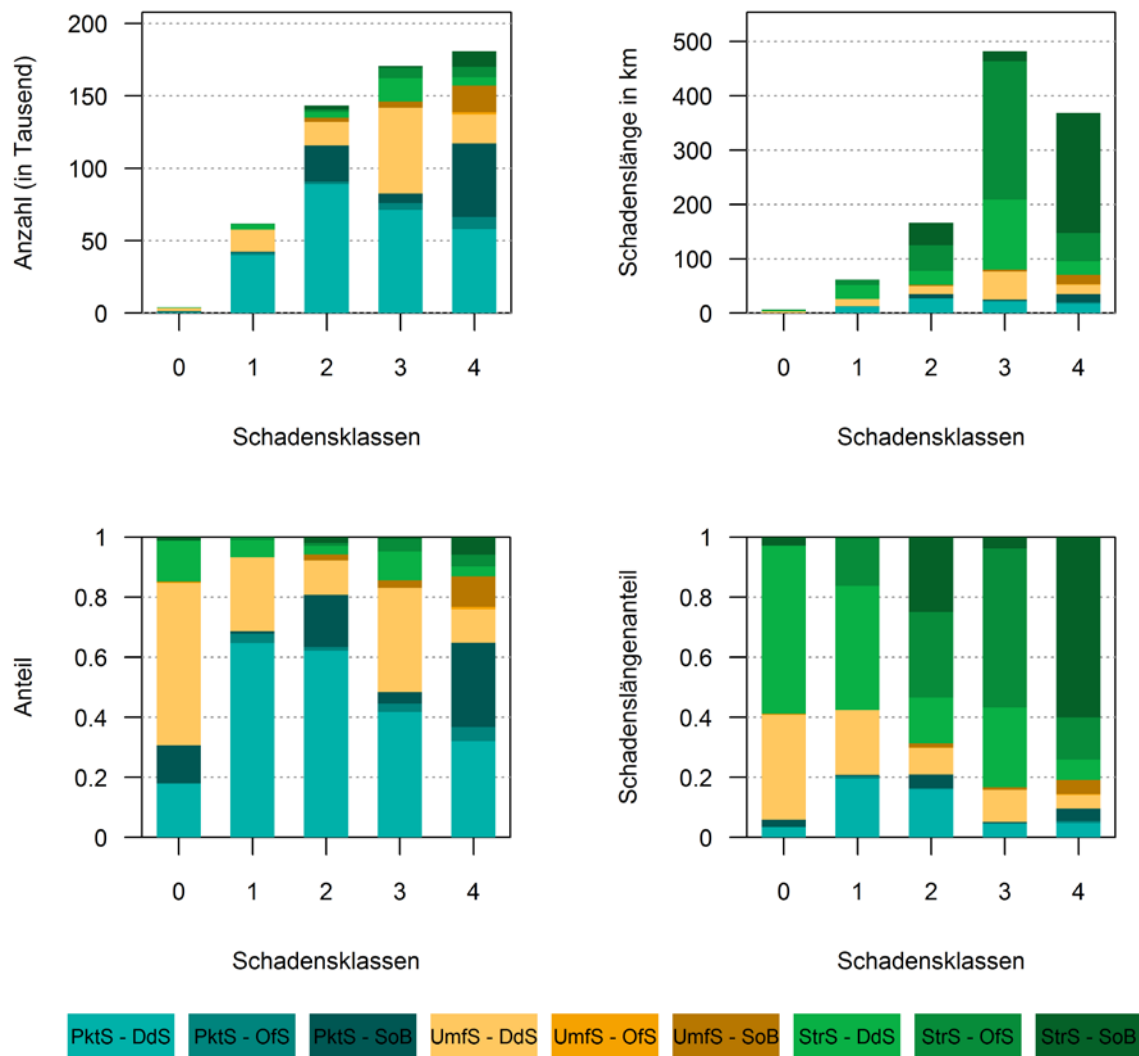


Bild 48: Anzahl sowie Schadenslänge von Schadensart und -ausprägung in Abhängigkeit der Einzelschadensklasse - absolute und relative Verteilung⁴⁷

Bei einem Vergleich zwischen Schadenshäufigkeit und Schadenslänge ist ein großer Unterschied im Anteil der Punktschäden erkennbar. Während die Schadenslänge von Streckenschäden durch das Inspektionsprotokoll, und die Länge von Umfangschäden durch den Kanalumfang vorgegeben ist, wurde die Länge für Punktschäden auf 0,3 m festgelegt. Eine Aufwertung von Punkt- und Umfangschäden gegenüber Streckenschäden ist im Rahmen des entwickelten Substanzmodells über die Startgewichte bei den Schadensarten möglich. Der Projektdatensatz bietet die Möglichkeit, diese Gewichtung zu definieren und auszuwerten, da die drei Schadensarten über alle Schadensklassen hinweg auftreten.

⁴⁷ Punktschadenslänge festgelegt auf 0,3 m

Tabelle 32: Haltungen mit Überlagerungen pro Schadensart und Schadensausprägung

Schadensart	Schadensausprägung	Anzahl der Überlagerungen			Gesamt
		1	2 - 5	> 5	
Punktschaden bzw. Umfangschaden	Durchdringender Schaden	10.079	8.633	2.564	21.276
	Oberflächenschaden	271	34	1	306
	Schaden ohne Bezug zur baulichen Struktur	1.663	292	8	1.963
Streckenschaden	Durchdringender Schaden	1.909	3.979	357	6.245
	Oberflächenschaden	670	1.096	36	1.802
	Schaden ohne Bezug zur baulichen Struktur	815	1.138	16	1.969
Gesamt	Gesamt	15.407	15.172	2.982	33.561

Regeln zur Überlagerung von Schäden lassen sich nur dann bewerten, wenn es genügend Haltungen mit sich überlagernden Punkt-, Umfang- und Streckenschäden in jeglichen Schadensausprägungen gibt. Eine Überlagerung bei Punkt- und Umfangschäden liegt dann vor, wenn laut Inspektionsprotokoll mindestens zwei Schäden an derselben Station protokolliert sind. Streckenschäden können ganz oder teilweise überlagernd sein, je nachdem in welchem Ausmaß sich ihre Strecken überschneiden. Tabelle 32 liefert eine Übersicht über Haltungen mit einer, zwei bis fünf oder mehr als fünf Überlagerungssituationen pro Schadensgruppe. Bei knapp der Hälfte aller Haltungen mit Schäden kommt es zu mindestens einer Schadensüberlagerung, knapp 3.000 Haltungen weisen mehr als fünf Überlagerungssituationen auf. Bei Punkt- und Umfangschäden handelt es sich vor allem um durchdringende Schäden. Eine Überlagerung von Oberflächenschäden kommt beinahe ausschließlich bei Streckenschäden vor. Überlagerungen von Schäden ohne Bezug zur baulichen Struktur kommen auf knapp 4.000 Haltungen vor. Dies sind vornehmlich Schäden der Schadensklasse 4 (vgl. Bild 48).

Fazit

Oberflächenschäden sind zusammenfassend eng an die Schadensart Streckenschäden gekoppelt. Alle anderen Schadensausprägungen und Schadensarten kommen in jeglichen Kombinationen in allen Einzelschadensklassen vor. Damit ist die Grundvoraussetzung für die Gewichtung zwischen den Schadensarten und den Einzelschadensklassen gegeben. Die hohe Anzahl an Haltungen mit Überlagerungen ermöglicht außerdem eine gute Bewertung unterschiedlicher Überlagerungsregeln innerhalb des Modells auf Netzebene.

7 Kalibrierung des *SubKanS*-Modells für Abwasserkanäle

7.1 Einführung

Die Substanz beschreibt als Kennzahl die Schadensdichte auf einer Haltung und wird aus den protokollierten Schäden berechnet. Die Schäden wurden zuvor bei der Kanalinspektion nach DWA-M 149-2 (DWA, 2013b) aufgenommen. Während die Länge von Streckenschäden im Protokoll definiert ist, wird die Ausdehnung von Punkt- und Umfangschäden nicht bzw. nur selten über die Lage am Umfang protokolliert. Hinzu kommt, dass die Schadensdichte letztendlich auf die Länge eines Kanals bezogen wird. Schäden, die nicht in Längsrichtung verlaufen, müssen sinnvoll in die Berechnung der Schadensdichte integriert werden. Mit diesem Ziel wurden während der Substanzmodellentwicklung Startgewichte eingefügt, die Punkt- und Umfangschäden gegenüber Streckenschäden aufwerten. Neben diesen Gewichten wurden außerdem Gewichte bezüglich der Schadensschwere angelegt. Für den Algorithmus zur Substanzberechnung waren deshalb folgende Fragen zu lösen:

- Wie viele Punktschäden entsprechen einem Streckenschaden mit gleicher Schadensschwere über die gesamte Haltung?
- Wie viele SK3-Schäden entsprechen einem SK0-Schaden der gleichen Länge?

Je nach Bewertungsziel und der Herangehensweise in der Bewertung von Schäden und Substanz können diese Fragen subjektiv sehr unterschiedlich beantwortet werden. Für die Schadensschwere gibt es bereits in anderen Zusammenhängen Gewichtungsansätze. So geht nach DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) die Schadensschwere auf Objektebene (als Zustandsklasse) linear gewichtet in weitere Berechnungen zur Sanierungsbedarfszahl ein. Im „Leitfaden zur strategischen Sanierungsplanung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden“ (DWA, 2012) wurde den prioritären Schäden hingegen ein hohes Gewicht gegeben, das anschließend exponentiell für schwächere Schäden abfällt.

Um der Vielfältigkeit von Antwortmöglichkeiten zu entgehen, wurde bewusst auf eine Festlegung von Gewichten zur Schadensart und Schadensschwere im Rahmen der Algorithmus-Entwicklung verzichtet. Die Gewichtung sollte stattdessen nachgeschaltet in einer Modellkalibrierung stattfinden. Diese sollte das bereits vorhandene Fachwissen aus DWA-Merkblättern, etablierten Modellen zur Substanzermittlung sowie Überlegungen innerhalb des *SubKanS*-Konsortiums und abgefragtes Fachwissen über die im Vorhaben durchgeführten Expertenrunden (siehe Anlagen 9 - 11) miteinander kombinieren (vgl. Bild 49).



Bild 49: Informationsquellen für die Kalibrierung⁴⁸

Konkret ergaben sich zwei Kalibrierungsziele für die bestmögliche Gewichtung bezüglich der Schadensart (für Punkt und Umfangschäden) und Schadensschwere (Einzelschadensklasse von 0 bis 4).

- Ziel 1:
Objektive Herleitung der bestmöglichen Gewichtung von Schadensart und Schadensschwere mit möglichst wenig Vorgaben
- Ziel 2:
Robuste Gewichte, die keine Scheingenauigkeit vortäuschen, sondern als allgemeingültig und vereinfachend verstanden werden können

7.2 Herleitung des methodischen Ansatzes

Der erste Schritt der Modellkalibrierung bestand darin, ein objektives Bewertungskriterium zu finden. Nur so ist ein Vergleich unterschiedlicher Gewichtungen möglich. Die nächstliegende Lösung bestand darin, das *SubKanS*-Modell an bereits etablierte Modelle anzupassen. Da im *SubKanS*-Konsortium fünf etablierte Modelle vorhanden waren, die mit unterschiedlichen Methoden die Substanz ermitteln, musste zuerst überprüft werden, wie ähnlich sich die Modellergebnisse sind. Um einen Vergleich zwischen den Modellen sowie dem *SubKanS*-Modell zu ermöglichen, wurde sich auf eine einheitliche

⁴⁸ Das Expertenwissen (von oben kommend) wird kombiniert mit dem Projektdatensatz (der Projektdatensatz war ebenfalls an der Entwicklung des Modellalgorithmus beteiligt).

Skala der ausgegebenen Zielgröße „Abnutzung zwischen 0 und 100 %“ geeinigt, wobei 0 % Abnutzung für eine neuwertige Haltung (100 % Substanz) und 100 % Abnutzung für eine komplett abgenutzte Haltung (0 % Substanz) stehen.

Bild 50 zeigt die Summenkurven der Abnutzung zweier Modelle über alle beschädigten Haltungen des Projektdatensatzes. Während Modell A für die meisten Haltungen eine Abnutzung von weniger als 20 % berechnet, ist die Abnutzung in Modell B über die gesamte Skala ausgeglichener verteilt. Es gibt einige charakteristische Abnutzungswerte, in deren Nähe offensichtlich sehr viele Haltungen eingeordnet werden. Da die Abnutzungsskala bisher nicht fest definiert war, kann einem Prozentwert keine qualitative Aussage zugeordnet werden. Trotz des gleichen Skalenrahmens zwischen 0 und 100 % sind die Ergebnisse der Modelle somit nicht miteinander vergleichbar. Hieraus lässt sich als erste Konsequenz für den methodischen Ansatz ableiten, dass die Kalibrierung der Modellparameter skalunenabhängig erfolgen muss.

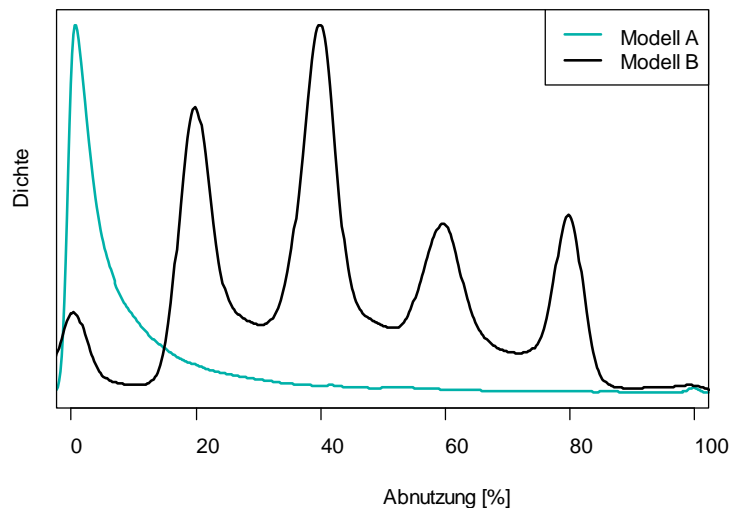


Bild 50: Dichteverteilung der Abnutzung im gesamtem Projektdatensatz durch zwei unterschiedliche etablierte Modelle

Selbst bei einem skalunenabhängigen Vergleich der Modellergebnisse war zu erwarten, dass die Modelle in ihrer Substanzbewertung nicht bei jeder Haltung identische Ergebnisse erzeugen. Dies war allein schon der Tatsache geschuldet, dass einige Modelle die Substanz auf wirtschaftlicher und andere auf technischer Grundlage berechnen. Trotzdem war es das Ziel, die Bandbreite aller fünf Modelle für die Kalibrierung des *SubKanS*-Modells zu verwenden. Daraus entwickelte sich für den *SubKanS*-Modellansatz folgende Vorgaben:

- Wenn eine Haltung von fünf Modellen mit unterschiedlichen Ansätzen ähnlich bewertet wird, soll das zu entwickelnde *SubKanS*-Modell ebenfalls zu diesem Ergebnis kommen.
- Nur „einheitlich“ bewertete Haltungen können für die Kalibrierung des *SubKanS*-Modells verwendet werden.

Aber ab welchen Umständen können zwei Haltungen als „ähnlich bewertet“ eingestuft werden? Um den Absolutwerten der Abnutzung zu entgehen, wurden die bewerteten Haltungen für jedes Modell nach ihrem Rang sortiert. Pro Modell gab es Bereiche der Abnutzungsskala, in denen sehr viele Haltungen vorlagen (hohe Haltungsdichte). In diesen Bereichen können allerdings kleine Unterschiede in der Abnutzung zu großen Unterschieden im Rang führen. Somit können Haltungen, die durch ein Substanzmodell sehr ähnlich bewertet werden, in ihrem Rang weit auseinanderliegen.

Aus diesem Grund wurde entschieden, nicht direkt den Rang als vergleichende Größe zur Ähnlichkeit der Modellergebnisse zu verwenden, sondern die Haltungen nach ihrem Rang zu klassifizieren: in der ersten Klasse liegen die Haltungen mit der geringsten Abnutzung und in der letzten Klasse die Haltungen mit der höchsten Abnutzung. Die Anzahl der Klassen war von zwei Seiten begrenzt. Eine geringe Anzahl der Klassen führt dazu, dass viele Haltungen als „ähnlich bewertet“ eingestuft werden. Die Klassifizierung ist dann sehr grob und dementsprechend eine nicht besonders sensitive Grundlage für die Kalibrierung. Eine hohe Anzahl der Klassen führt dazu, dass weniger Haltungen als „ähnlich bewertet“ eingestuft werden. Je weniger Inspektionsprotokolle für die Kalibrierung verwendet werden können, desto weniger Schadensbilder und Überlagerungsmuster können in die Kalibrierung einfließen.

In Analogie zur Zustandsbewertung sollen letztendlich fünf Substanzklassen aus der Abnutzung bzw. Substanz abgeleitet werden können. Anstatt die Haltungen pro Modell in fünf Klassen einzuteilen, wurde stattdessen eine Einordnung in 10 Klassen festgelegt und eine Abweichung von einer Klasse toleriert, um den starren Klassengrenzen bei der Definition „ähnlich bewerteter Haltungen“ zu entgehen. Es wurde ein Kalibrierungsdatensatz erstellt, der ausschließlich aus ähnlich bewerteten Haltungen bestand. Die Auswirkung der Verwendung unterschiedlicher Klassen für die Anzahl ähnlich bewerteter Haltungen im Projektdatensatz ist in Anlage 5 ausführlich beschrieben.

Die Ergebnisse des *SubKanS*-Modells wurden im Zuge der Kalibrierung ebenfalls nach ihrem Rang in 10 Klassen einsortiert. Anschließend wurde überprüft, wie viele Haltungen von den etablierten Modellen und dem neu entwickelten Modell in die gleiche Klasse eingeordnet wurden („Trefferquote“). Es wurde außerdem die Quote bestimmt, die neben der exakt gleichen Einordnung eine Abweichung von einer Klasse tolerierte. Diese Kenngröße wurde als „erweiterte Trefferquote“ bezeichnet. Beide Kenngrößen bildeten zusammen das Bewertungskriterium der Kalibrierung. Je größer die Trefferquote und die erweiterte Trefferquote ist, desto besser ist die untersuchte Gewichtung des *SubKanS*-Modells. Es handelte sich demnach bei der Kalibrierung um eine Optimierungsaufgabe. Bevor die Kalibrierung durchgeführt werden konnte, mussten die „ähnlich bewerteten Haltungen“ identifiziert und der daraus resultierende neue Datensatz erneut deskriptiv analysiert werden.

7.3 Auswahl des Kalibrierungsdatensatzes

Insgesamt wurden durch alle fünf im Projekt vertretenen Modelle 100.384 Haltungen bewertet. Für 76.467 Haltungen berechneten alle Modelle eine Abnutzung > 0 %. Diese Haltungen wurden pro Modell in 10 gleichgroße Klassen eingeteilt. Die Klassengrenzen entsprachen den Perzentilgrenzen der Abnutzung in 10 %-Schritten, sodass in der Klasse 1 die 10 % aller Haltungen mit der geringsten Abnutzung und in Klasse 10 die 10 % aller Haltungen mit der höchsten Abnutzung lagen. Um Haltungen zu identifizieren, die durch alle Modellen ähnlich bewertet wurden, wurde pro Haltung der durchschnittliche Klassenunterschied zwischen den Modellen gem. Gleichung 14 berechnet.

$$\overline{\Delta PK} = \frac{\sum_{i=2}^5 |PK_{M1} - PK_i| + \sum_{i=3}^5 |PK_{M2} - PK_{Mi}| + \sum_{i=4}^5 |PK_{M3} - PK_{Mi}| + |PK_{M4} - PK_{M5}|}{10} \quad \text{Gleichung 14}$$

Mit: PK_{Mi} : Perzentilklasse des Modells i

$\overline{\Delta PK}$: durchschnittliche Perzentilklassendifferenz

Es wurden alle Haltungen mit einer durchschnittlichen Klassendifferenz von weniger als 1 ausgewählt. Anschließend wurde die mittlere Klasse aller Modelle auf eine Ganze Zahl gerundet, um die für die Kalibrierung verwendete Zielklasse zu erhalten. Tabelle 33 zeigt das Vorgehen beispielhaft an drei Haltungen. Die zweite Haltung wurde nicht in den Kalibrierungsdatensatz aufgenommen, da sich die bestehenden Modelle zu uneinig waren bezüglich der Rangordnung. Die Haltung wird von Modell 5 in die Klasse 5,5 eingeordnet. Diese Zuordnung konnte zustande kommen, wenn mehrere Haltungen eine gleichhohe Abnutzung aufwiesen, die genau auf einer Klassengrenze lag. In diesem Fall würde ein Teil der Haltungen mit gleicher Abnutzung zufällig in Klasse 5 und der andere Teil in Klasse 6 geordnet werden, da die Klassen zwingend gleichviele Haltungen enthalten sollen. Durch die Vergabe von 5,5 konnte ihre Lokalisation an der Klassengrenze in die Berechnung der mittleren Differenz und die Bildung der mittleren Klasse einfließen. Die dritte Haltung im Beispiel wurde aufgenommen, obwohl ein Modell eine um 2 Klassen unterschiedliche Einstufung aufwies.

Tabelle 33: Beispiel zur Auswahl und Klassifizierung „ähnlich bewerteter Haltungen“⁴⁹

M1	M2	M3	M4	M5	Summe der Differenzen	Mittlere Differenz	Mittlere Klasse	Verwendete Klasse
5	4	5	4	5	6	0,6	4,6	5
5	3	4	3	5,5	14	1,4	-	-
3	3	3	5	3	8	0,8	3,4	3

Durch dieses Auswahlverfahren wurden 29.074 Haltungen herausgefiltert. Da die Rangordnung einer Haltung im Datensatz nicht nur von der Bewertung der Haltung an sich, sondern auch von der Bewertung aller umliegenden Haltungen abhängig ist, musste zusätzlich überprüft werden, ob die Einigkeit zwischen den Modellen im neu erstellten Datensatz wirklich größer war als im gesamten Projektdatensatz, oder ob der Ausschluss von nicht-ähnlich bewerteten Haltungen zu einer neuen, nicht einheitlichen Rangordnung führte. Diese Überprüfung wurde durch einen Vergleich der Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman durchgeführt, wobei ein Koeffizient von 1 eine exakt gleiche Rangordnung und ein Koeffizient von 0 eine komplett unterschiedliche Rangordnung bedeuten.

Bild 51 zeigt die Rangkorrelationskoeffizienten zwischen allen Modellen für alle bewertete Haltungen („Gesamter Projektdatensatz“), alle als schadhaft bewertete Haltungen („Geschädigte Haltungen“) sowie dessen Aufteilung in die Teildatensätze der ähnlich bewerteten Haltungen („Kalibrierungsdatensatz“) und alle ausgeschlossenen Haltungen. Die Rangkorrelation im gesamten Projektdatensatz ist größer als die für geschädigte Haltungen, da schadlose Haltungen von allen Modellen gleich bewertet wurden. Werden die schadensfreien Haltungen aus der Analyse entfernt, ergeben sich Rangkorrelationskoeffizienten von 0,70 - 0,88 zwischen allen Modellen. Eine Erhöhung auf 0,9 bis 0,96 zeigt deutlich eine Erhöhung der Einigkeit zwischen den Modellen bezüglich der Rangfolge im Kalibrierungsdatsatz und damit den Erfolg des Auswahlverfahrens.

⁴⁹ Jede Zeile steht für eine Haltung. M1 bis M5 steht für die Modelle 1 bis 5.
Rote Schrift: nicht-ähnlich bewertete Haltung.

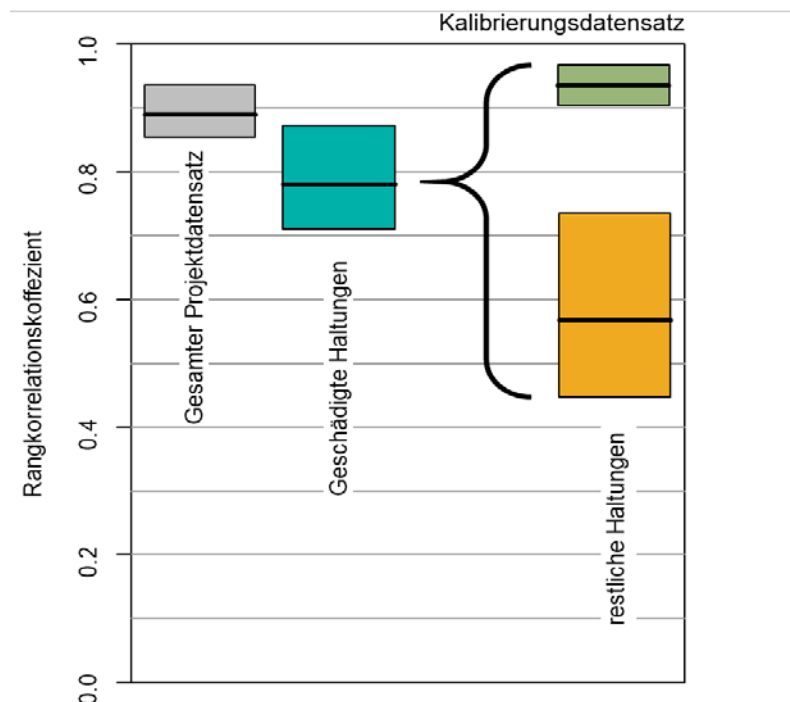


Bild 51: Rangkorrelationskoeffizienten zwischen allen bestehenden Modellen⁵⁰

7.4 Deskriptive Analyse des Kalibrierungsdatensatzes

Der Kalibrierungsdatensatz ist ein Teil des unter Kapitel 6.4 beschriebenen Gesamtdatensatzes. Er besteht aus solchen Haltungen, bei denen sich alle in *SubKanS* beteiligten Modellanbieter weitestgehend einig bezüglich der Substanzbewertung waren. Als Kriterium für die Unterscheidung wurde die skalenunabhängige Rangfolge von Haltungen als Grundlage verwendet. Der Kalibrierungsdatensatz besteht aus 29.074 Haltungen. Damit er zur Kalibrierung genutzt werden konnte, musste die Heterogenität des Teildatensatzes analog zur Analyse des Gesamtdatensatzes (Kap. 6.4.2) sichergestellt werden.

Von den 29.074 Haltungen besitzen 1.824 Haltungen die ZK0, 9.019 Haltungen die ZK1, 8.913 Haltungen die ZK2, 5.398 Haltungen die ZK3 und 3.920 Haltungen die ZK4. Verglichen mit der Aufteilung im Gesamtdatensatz (siehe Tabelle 31) zeigt sich, dass die Anzahl der Haltungen mit ZK0 oder ZK1 in etwa um die Hälfte abnimmt, während nur ein Drittel der Haltungen mit einer Zustandsklasse von 2 bis 4 übrig bleiben. Haltungen mit Zustandsklasse 5 wurden von vornherein ausgeschlossen, da sie nicht zu Kalibrierung beitragen können.

⁵⁰ Aufgetragen ist die Spannweite der Rangkorrelationskoeffizienten als Box. Der eingezeichnete Strich entspricht dem arithmetischen Mittel.

Um zu überprüfen, ob durch den Filter „Einigkeit der Modellanbieter“ bestimmte Schadensgruppen über- oder unterrepräsentiert wurden, wurde die Verteilung von Schadensart und Schadensausprägung in folgenden drei Datensätzen verglichen:

- Gesamter Projektdatensatz
- Kalibrierungsdatensatz
- Unterschiedlich bewertete und damit für die Kalibrierung ausgeschlossene Haltungen

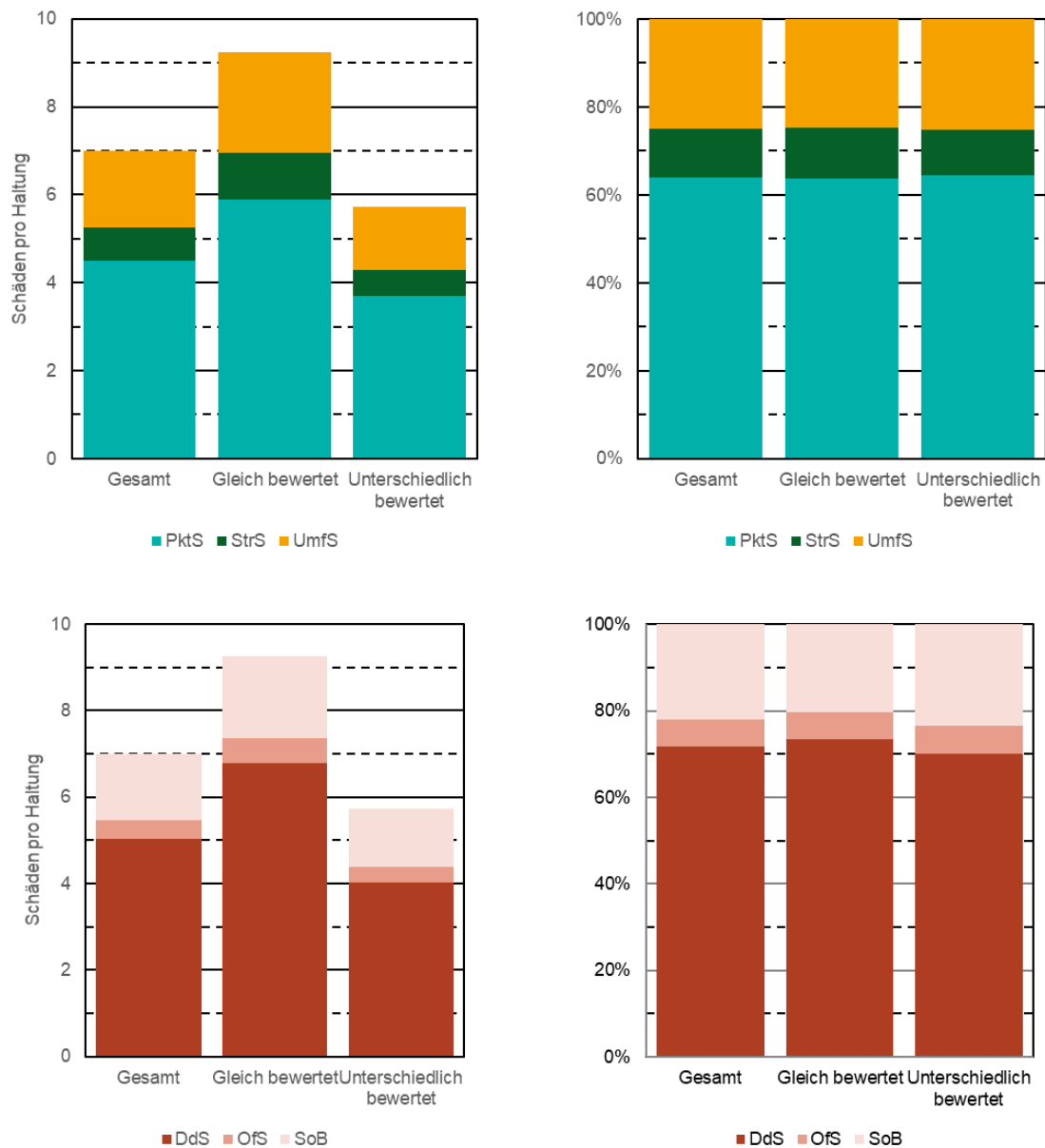


Bild 52: Vergleich der Verteilung von Schadensart und Schadensausprägung zwischen dem Gesamtdatensatz und dem Kalibrierungsdatensatz („Gesamt“: alle schadhaften Haltungen des Projektdatensatzes; „Gleich bewertet“: Kalibrierungsdatensatz; „Unterschiedlich bewertet“: für die Kalibrierung ausgeschlossene Haltungen)

Unter allen schadhafte Haltungen im Projektdatensatz liegt die Schadensdichte bei ca. 7 Schäden pro Haltung. Diese setzen sich zu 64 % aus Punktschäden, zu 25 % aus Umfangschäden und zu 11 % aus Streckenschäden zusammen. Die Haltungen des Kalibrierdatensatzes enthalten im Durchschnitt etwa 2 Schäden mehr. Folglich wurden vor allem Haltungen mit einer geringeren Schadenanzahl durch den Filter entfernt. Während dies für Aussagen über die Relevanz bestimmter Schadensbilder einen großen Einfluss haben kann, ist es für die Kalibrierung nicht von Nachteil. Hier ist die Vielfalt der Schadensbilder entscheidend, und die Wahrscheinlichkeit des Auftretens vielfältiger Schadensbilder ist bei einer größeren Schadensanzahl pro Haltung höher. Wie sich zeigte, sind die Schadensarten und die Schadensausprägungen in den Datensätzen anteilmäßig gleichstark vertreten (Bild 52). Durch den Einigkeitsfilter wurde keine Schadensgruppe besonders bevorzugt.

Eine genauere Aufschlüsselung nach Schadensart und Hauptkode (Bild 53) zeigt, dass es innerhalb der Punktschäden zu Verschiebungen im Kalibrierungsdatensatz hin zu anteilig mehr Rissen (BAB: Anteil steigt von 9,8 % auf 12,2 %) und Rohrbrüchen (BAC: Anteil steigt von 5 % auf 7 %) und zu weniger Schäden durch gemeißelte Anschlüsse (BCA: Anteil sinkt von 9,9 % auf 7 %) kam. Gemeißelte Anschlüsse bekamen erst durch die Anpassung des Einzelschadenskatalogs für das *SubKanS*-Modell einen Schadcharakter, den sie nach DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) für die Zustandsklassifizierung nicht besitzen. Insofern ist es gut möglich, dass dieser Schadenskode von den bestehenden Modellen unterschiedlich behandelt wird. Außerdem kommt die häufig kombinierte Schadenskodierung Wurzeln (BBB) und Infiltration (BBF) etwas seltener im Kalibrierungsdatensatz vor. Bei Streckenschäden und Umfangschäden kam es zu deutlich weniger Veränderung. Hier sind lediglich Risse etwas stärker im Kalibrierungsdatensatz vertreten (BAC: Anteil steigt von 3,4 % auf 4,5 %). Abgesehen von den angesprochenen Beispielen lag die Differenz zwischen den Anteilen beider Datensätze zumeist deutlich unter 1 %.

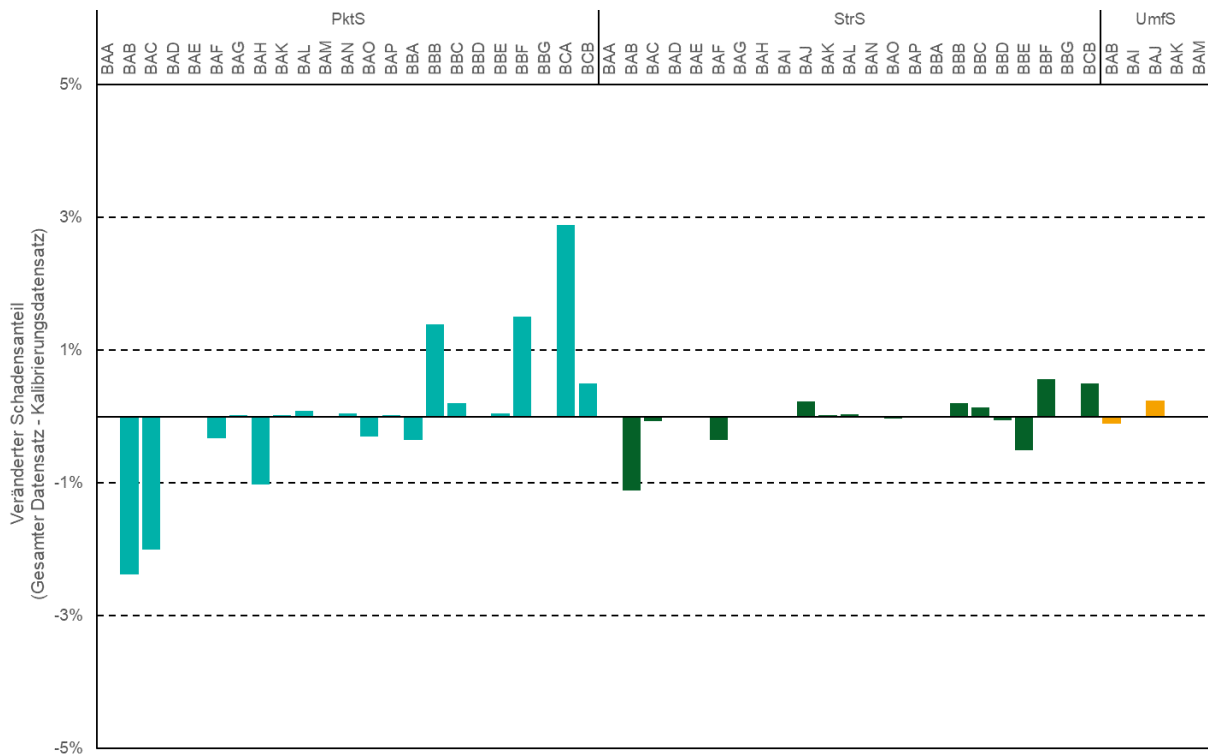


Bild 53: Verteilung der Hauptcodes nach DWA-M 149-2 (DWA, 2013b) auf die drei Schadensarten: Vergleich zwischen Gesamtdatensatz und Kalibrierungsdatensatz

Weiterhin musste überprüft werden, ob Haltungen mit bestimmten Stammdaten durch den Einigkeitsfilter systematisch von der Kalibrierung ausgeschlossen wurden. In Bild 54 sind die Dichtekurven der Stammdaten, die für die Berechnung der Substanz im *SubKanS*-Algorithmus verwendet werden, Objektlänge und Durchmesser, abgebildet. Die Verteilung des Durchmessers stimmt im Kalibrierungsdatensatz beinahe perfekt mit der Verteilung des gesamten Datensatzes überein. Beim Vergleich der Haltungenlängen beider Datensätze ist auffällig, dass besonders kurze Haltungen im Kalibrierungsdatensatz weitestgehend fehlen. Hier wirken sich kleine Unterschiede in der Bewertung einzelner Schäden (z. B. Unterschiede bei der Rundung von Schadenslängen) stärker aus, da die Haltungenlänge als Quotient in die Berechnung der Substanz eingeht. Dies kann zu größeren Abweichungen zwischen den bestehenden Modellen und somit eher zu einem Ausschluss durch den Einigkeitsfilter führen.

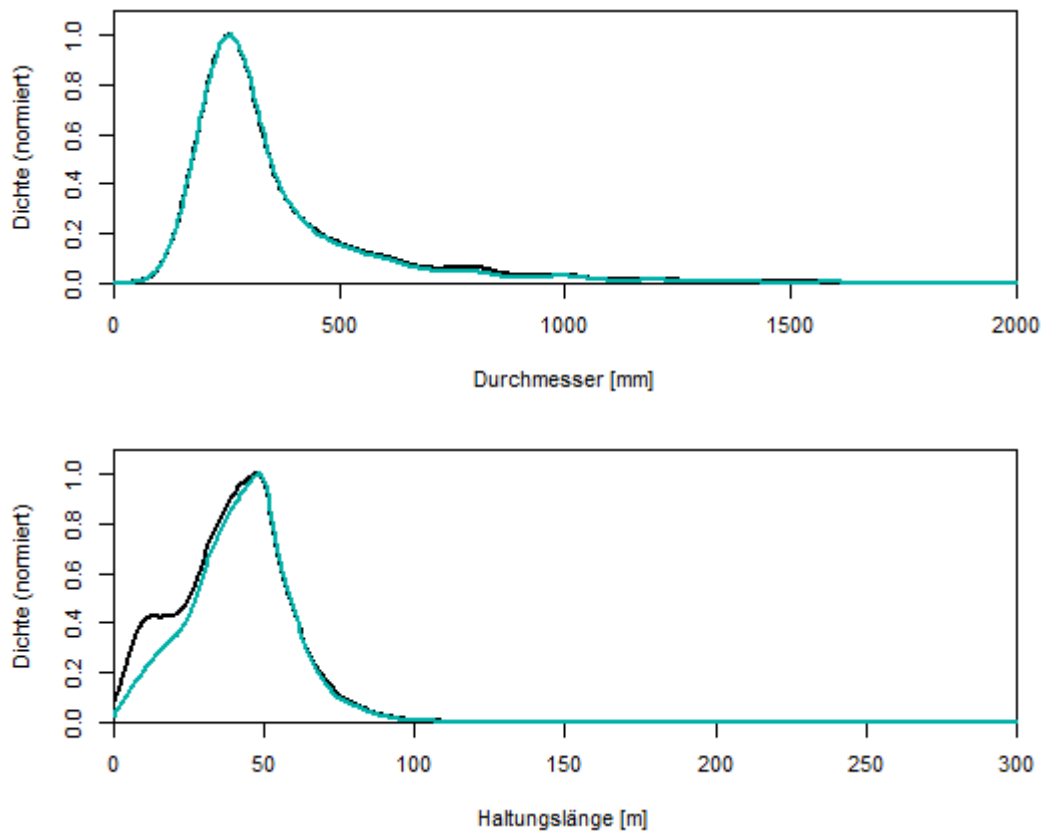


Bild 54: Vergleich der Dichtekurven zwischen Gesamtdatensatz und Kalibrierungsdatensatz für die Stammdaten „Haltungslänge“ (oben) und „Haltungsdurchmesser“ (unten)⁵¹

Ein genauerer Blick auf die Schadenslänge der Haltungen im Kalibrierungsdatensatz zeigt die vermutliche Ursache für die höhere Schadensdichte im Kalibrierungsdatensatz. In Bild 55 ist das Verhältnis der Haltungen im Kalibrierungsdatensatz zur Anzahl der Haltungen im Gesamtdatensatz pro Haltungslänge aufgetragen. Ab einer Länge von 50 m waren sich die bestehenden Modelle in ihrer Rangordnung bei 40 bis 50 % der Haltungen weitestgehend einig. Bei kurzen Haltungen zwischen 10 und 20 m Länge galt das nur für 28 % der Haltungen, bei Haltungen unter 10 m sogar nur für 18 %. Auf diesen kurzen Haltungen befinden sich durchschnittlich unter 5 Schäden pro Haltung, auf den längeren Haltungen über 50 m hingegen mehr als doppelt so viel. Mehr Schäden auf einer Haltung bedeuten auch eine höhere Wahrscheinlichkeit, dass prioritäre Schäden der Zustandsklassen 0 oder 1 vorhanden sind. Insofern ist vor allem der überdurchschnittliche Ausschluss kurzer Haltungen für den größeren Anteil von Haltungen in schlechtem Zustand im Kalibrierungsdatensatz verantwortlich.

⁵¹ schwarze Linie: alle geschädigten Haltungen im Projektdatensatz
türkise Linie: Kalibrierungsdatensatz

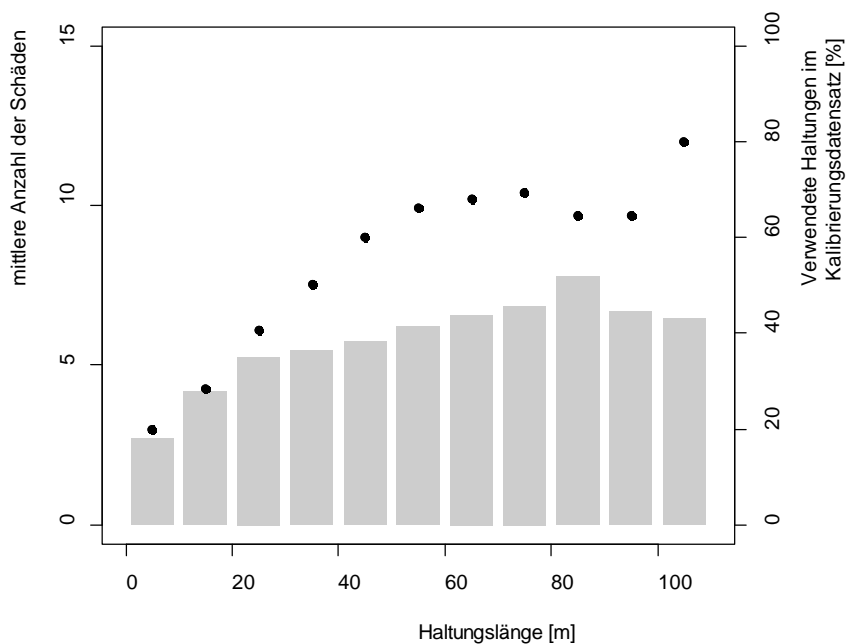


Bild 55: Mittlere Anzahl der Schäden (Punkte) und Verhältnis von Haltungen im Kalibrierungsdatensatz zu schadhaften Haltungen im Projektdatensatz (Balken) pro Haltungslänge

Fazit

Die Kombinationen der Schadensbilder im Kalibrierungsdatensatz sind sehr ähnlich zum gesamten Projektdatensatz. Die erhöhte Schadensdichte hat ihre Ursache darin, dass weniger kurze Haltungen vorhanden sind. Das hat keinen Einfluss auf die Gewichtung von Schadensart und -ausprägung und ist somit nicht als Nachteil für die Kalibrierung einzuordnen.

7.5 Kalibrierung

7.5.1 Einführung

Für Schadensschwere und Schadensart sind während der Modellentwicklung Faktoren angelegt worden, damit diese untereinander gewichtet werden können. Ziel der Kalibrierung ist es, die Gewichte so zu wählen, dass die Trefferquote zwischen der Klassifizierung des *SubKanS*-Modells und der Klassifizierung der etablierten fünf Modelle maximal wird. Insgesamt mussten vier Modellparameter zur Schadensschwere (Klassengewichte für Schäden mit der Schadensklasse 1 bis 4) und 2 Modellparameter zur Schadensart (Startgewichte für Punkt- und für Umfangschäden) mit Gewichten versehen werden. Die Klassengewichte für Schäden mit der Schadensklasse 0 und 5 sowie das Startgewicht für Streckenschäden waren mit 1, 0 und 1 vordefiniert (Tabelle 34). Es handelte sich bei der Kalibrierung demnach um eine 6-dimensionale Optimierungsaufgabe.

Tabelle 34: Startpunkt der Kalibrierung

Klassengewichte						Startgewichte		
SK0	SK1	SK2	SK3	SK4	SK5	StrS	PktS	UmfS
1	?	?	?	?	0	1	?	?

Der Kalibrierungsdatensatz wurde in einem ersten Schritt zufällig in zwei gleichgroße Datensätze aufgeteilt. Ein Teildatensatz wurde für die Kalibrierung verwendet, während das Ergebnis anschließend mit dem anderen Teildatensatz validiert wurde. Beide Datensätze bestanden aus jeweils 14.537 Haltungen.

Als Kalibrierungsmethode wurden eine maschinelle Optimierung (evolutionärer Algorithmus für nicht lineare Optimierung) und eine Rasteranalyse ausgewählt. Beide Methoden sind vereinfacht an einem 2-dimensionalen Beispiel in Bild 56 skizziert. Die Optimierung erfolgte anhand der in Kapitel 7.2 eingeführten Bewertungskriterien „Trefferquote“ und „erweiterte Trefferquote“ separat. Das dargestellte Beispiel bezieht sich auf die Verwendung der Trefferquote. Ihre Höhe ist abhängig von der Kombination aus Klassengewicht und Startgewicht. Bei der Darstellung über zwei beispielhaft ausgewählte Klassen- und Startgewichte ergibt sich somit eine dreidimensionale Landschaft mit Bergen und Tälern. Bei der Kalibrierung des *SubKanS*-Modells wurde das globale Maximum dieser Landschaft gesucht. Eingezeichnet ist hier außerdem die Höhe der Trefferquote, die sich ergibt, wenn die Rangfolge der Haltungen rein zufällig festgelegt wird. Es ist zu beachten, dass insbesondere die erweiterte Trefferquote schon bei zufälliger Anordnung deutlich größer als 0 % ist. Die Angabe der bei zufälliger Anordnung resultierenden Trefferquote ist zur Einordnung der Modellgüte immer zwingend erforderlich.

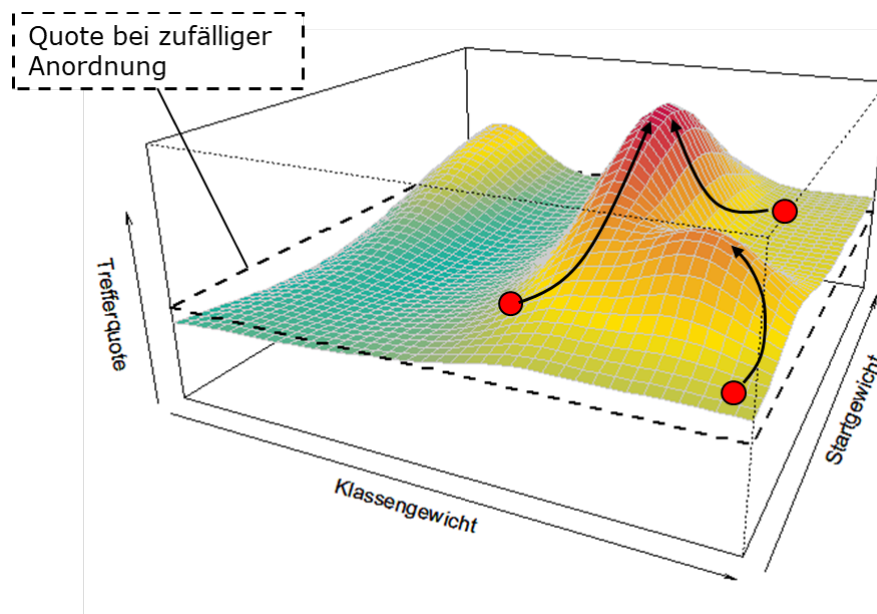


Bild 56: Zweidimensionales Beispiel der maschinellen Optimierung und Rasteranalyse

Bei einer Rasteranalyse wird an fest definierten Knotenpunkten die Trefferquote bestimmt. Durch eine Verknüpfung aller Knotenpunkte entsteht ein Netz aus Datenpunkten. Vor Durchführung einer Rasteranalyse müssen Randbedingungen vorgegeben werden. Diese beinhalten pro Parameter den Wertebereich, innerhalb dessen ein Parameter betrachtet werden soll, und die Schrittgröße, mit der der Parameter in diesem Wertebereich verläuft. Die Anzahl möglicher Kombinationen steigt bei gleicher Anzahl von Betrachtungen pro Parameter mit jedem Parameter exponentiell an. Bereits drei Parameter mit jeweils 100 Betrachtungen führen zu 1 Million zu berechnender Knotenpunkte. Eine detaillierte Betrachtung mit Beteiligung von 6 Parametern ist sehr aufwendig und rechenintensiv. Auf der anderen Seite erhöht eine zu grobe Betrachtung der Landschaft die Gefahr das Maximum zu übersehen.

Die maschinelle Optimierung ist, was die Rechenzeit angeht, deutlich effektiver. Dabei wird zuerst ein zufälliger Startpunkt in der Landschaft gewählt. Die Gewichte werden anschließend ebenfalls zufällig verändert. Führt die neu entstandene Gewichtung gegenüber der vorherigen Gewichtung zu einer Verbesserung des Ergebnisses (also zu einer höheren Trefferquote), dann setzt sich diese Gewichtungskombination gegenüber der alten durch. Falls das nicht der Fall ist, wird die alte Gewichtung beibehalten. Dieser Ablauf wird wiederholt, und mit jedem Zyklus besteht die Möglichkeit zur Verbesserung. Jeder gewählte Startpunkt führt so zu einem „optimalen“ Endpunkt, wobei das erreichbare Optimum unter anderem abhängig von der Anzahl der durchgeführten Zyklen ist. Obwohl der verwendete Algorithmus zur Suche nach globalen Werten programmiert ist, kann es trotzdem vorkommen, dass der Optimierungsprozess an einem lokalen Maximum hängen bleibt. Diese Gefahr ist deutlich höher bei komplexen Problemstellungen, wie dies bei einem 6-dimensionalen, nicht linearen Zusammenhang der Fall ist. Genauso könnte es mehrere ähnlich hohe Maxima geben. Anders

als bei der Rasteranalyse ist die zugrundliegende Landschaft mit einer maschinellen Optimierung nicht erfassbar. Dementsprechend ist ein einzelner Optimierungsdurchlauf nur schwer interpretierbar. Erst durch viele zufällig gewählte Startpunkte wird dies ermöglicht. Führen die Verläufe unterschiedlicher Startpunkte allesamt zum gleichen Endpunkt, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass es sich hierbei tatsächlich um das gesuchte globale Maximum handelt.

Beide Methoden besitzen Vor- und Nachteile für die vorliegende Problemstellung der Substanzmodellkalibrierung.

Ziel 1: Objektive Herleitung mit möglichst wenig Vorgaben

Hier besitzt die Rasteranalyse klare Nachteile. Allein durch die Notwendigkeit vorher definierter Randbedingungen müssen für jeden Parameter Vorgaben gemacht werden. Um die Rechenzeit im Rahmen zu halten, neigt man außerdem dazu, weitere Vorgaben zu machen (z. B., dass ein Punktschaden auf jeden Fall stärker gewichtet werden sollte als ein Streckenschaden). Auch wenn dies inhaltlich gut begründbar sein mag, nimmt es die Möglichkeit, Widersprüche im Modellalgorithmus oder bei anderen Annahmen innerhalb der Kalibrierung zu erkennen. Die maschinelle Optimierung hat hier ganz klar ihre Stärke, da nur für den Startpunkt Rahmenbedingungen festgelegt werden müssen. Der weitere Verlauf erfolgt zufällig und somit frei von Vorgaben.

Ziel 2: Robuste Gewichte, die keine Scheingenauigkeit vortäuschen, sondern als allgemeingültig und vereinfachend verstanden werden sollen

Hier wiederum ist die maschinelle Optimierung ungeeignet, da sie nur an wenigen Punkten Licht in die Trefferquotenlandschaft bringt. Bei unterschiedlichen Endpunkten ist schwer abschätzbar, welche Gewichtung besser oder schlechter geeignet ist. Außerdem führt die maschinelle Optimierung zu sehr präzisen Ergebnissen. Bei einer Rundung auf die erste oder zweite signifikante Stelle ändert sich das Resultat teilweise deutlich.

Um die Nachteile beider Methoden zu umgehen, wurden beide Methoden kombiniert: in einem ersten Schritt wurde die maschinelle Optimierung genutzt, um für jeden Parameter optimale Bereiche zu finden. Innerhalb dieser Bereiche wurde anschließend die höher aufgelöste Rasteranalyse durchgeführt.

Damit die Ergebnisse der Kalibrierung mit anderen Überlegungen zur Gewichtung der Schadensschwere verglichen werden können, wurden außerdem drei Vergleichsvarianten mitkalibriert. Bei diesen Varianten war die Gewichtung der Schadensschwere durch vorherige Überlegungen bereits festgelegt. Die Startgewichte für Punkt- und Umfangschäden wurden durch eine Rasteranalyse ermittelt. Die Gewichtung der Schadensschwere innerhalb der drei Vergleichsvarianten war

- **Vergleichsvariante 1 - Linear** (lineare Abnahme der Klassengewichte):
SK0 = 1; SK1 = 0,8; SK2 = 0,6; SK3 = 0,4; SK4 = 0,2
- **Vergleichsvariante 2 - Linear-Exponentiell** (lineare und ab SK2-Schäden exponentielle Abnahme):
SK0 = 1; SK1 = 0,75; SK2 = 0,5; SK3 = 0,25; SK4 = 0,125
- **Vergleichsvariante 3 - DWA-Themenband** (Vorschlag für Klassengewichte aus dem „Leitfaden zur strategischen Sanierungsplanung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden“ (DWA, 2012)):
SK0 = 1; SK1 = 1; SK2 = 0,3; SK3 = 0,09; SK4 = 0,027

7.5.2 Durchführung der maschinellen Optimierung und der Rasteranalyse

Die maschinelle Optimierung wurde mit der Statistiksoftware „R“ durchgeführt. Der Optimierungsalgorithmus ISRES ist Teil des Pakets „nloptr“ und auf <https://nlopt.readthedocs.io>⁵² genauer beschrieben. Vor der Optimierung wurde die optimale Anzahl an Zyklen ermittelt. Hierzu wurde die Verbesserung der Trefferquote über die Anzahl der Zyklen aufgetragen. Mit 10.000 Zyklen wurde ein Plateau erreicht, bei dem Verbesserungen nur noch sporadisch auftraten. Alle weiteren Angaben zur maschinellen Optimierung sind in Tabelle 35 aufgelistet.

In Bild 57 sind die Start- und Endpunkte pro Optimierungszyklus miteinander verknüpft. Die Startpunkte sind für beide Bewertungskriterien identisch, können dann in der Folge jedoch zu unterschiedlichen Endpunkten führen. Zusammenfassend ist für beide Bewertungskriterien der Wertebereich eingetragen, in denen alle Endpunkte liegen. Da sich die Kalibrierung an beiden Bewertungskriterien gleichermaßen ausrichtet, wurden beide Wertebereiche zu einem zusammengefasst.

Für alle Gewichte kam es zu überlappenden Wertebereichen beider Bewertungskriterien, was eine Kalibrierung nach beiden Kriterien ermöglicht. Bei dem Klassengewicht von SK3-Schäden und dem Startgewicht von Umfangschäden gibt es jedoch deutliche Unterschiede zwischen den Bewertungskriterien. Dadurch entstehen engere abgeleitete Wertebereiche als das jeweils für die einzelnen Bewertungskriterien der Fall wäre. Vor allem für das Klassengewicht der prioritären SK1-Schäden ergeben sich sehr breite Spannweiten. Dies kann der Tatsache geschuldet sein, dass diese Schäden in deutlich geringerem Umfang im Datensatz vorhanden sind als die schwächeren Schäden. Das Klassengewicht für SK4-Schäden endet unabhängig vom Startpunkt und Bewertungskriterium immer bei ca. 0,05. Obwohl keine Vorgaben bezüglich der Gewichtung gemacht wurden, hat sich durch die

⁵² zuletzt geprüft am 18.3.2021

Optimierung die erwartete Reihenfolge der Klassengewichte $SK_0 > SK_1 > SK_2 > SK_3 > SK_4 > SK_5$ ergeben.

Tabelle 35: Eigenschaften der maschinellen Optimierung

Name des Algorithmus	ISRES ⁵³
Typ	Evolutionär
Auswahl der Startpunkte	Zufällig
Randbedingungen für die Auswahl der Startpunkte	Klassengewichte zwischen 0 und 1 Startgewichte zwischen 1 und 10
Weitere Vorgaben für die Parameter während der Optimierung	Keine
Anzahl der Optimierungsdurchläufe	20 (pro Bewertungskriterium)
Anzahl der Zyklen pro Durchlauf	10.000

Gerundet ließen sich die Rastergrenzen von 0,65 - 0,95 für das Klassengewicht von SK1-Schäden, 0,25 - 0,33 für das Klassengewicht von SK2-Schäden, 0,15 - 0,18 für das Klassengewicht von SK3-Schäden, 0,04 - 0,06 für das Klassengewicht von SK4-Schäden, 6 - 9 für das Startgewicht von Punktschäden und 2 - 3 für das Startgewicht von Umfangschäden ableiten. Für jeden Parameter wurde die Schrittgröße an die Spannweite angepasst. Die Randbedingungen der darauf aufbauenden Rasteranalyse sind in Tabelle 36 angegeben.

⁵³ ISRES: Improved Stochastic Ranking Evolution Strategy

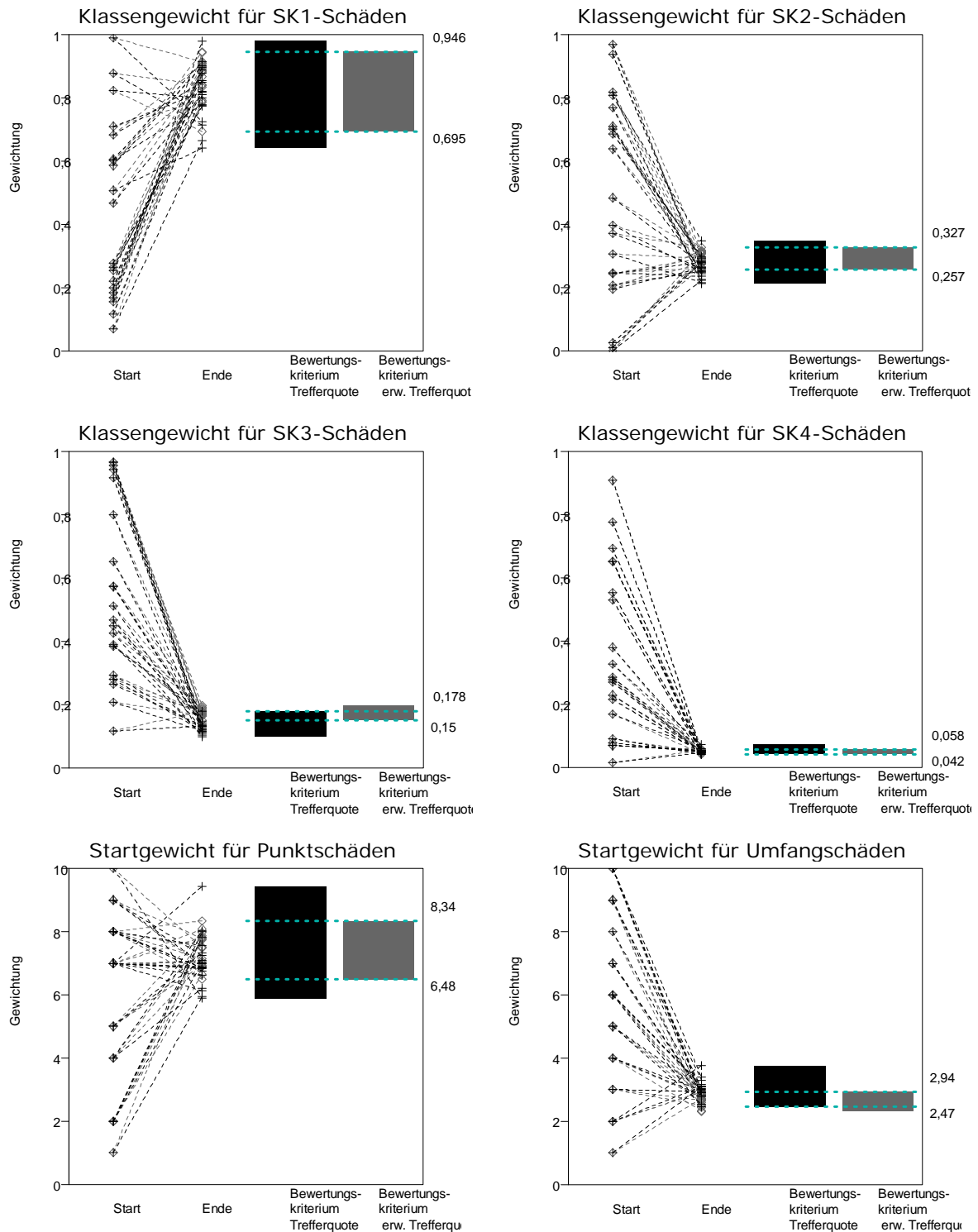


Bild 57: Start- und Endpunkte der maschinellen Optimierung mit Ableitung der Randbedingungen für die Rasteranalyse⁵⁴

⁵⁴ Kreuze: Optimierungspunkte Trefferquote, Rauten: Optimierungspunkte Erweiterte Trefferquote, türkise Linie: Kennzeichnung der durch beide Bewertungskriterien abgedeckten Spannweite

Der Vorteil der Rasteranalyse ist die Berechnung der Trefferquote und erweiterter Trefferquote über eine punktuelle Größe hinaus. Es kann somit nicht nur die Höhe der Bewertungskriterien an einem Rasterknotenpunkt, sondern auch die Veränderung in dessen Umgebung beschrieben werden. Dieser Vorteil wurde durch die Berechnung einer mittleren Trefferquote und einer mittleren erweiterter Trefferquote genutzt.

In einem 6-dimensionalen Raster besitzt jeder Rasterknotenpunkt 12 Nachbarpunkte. Der Durchschnitt wird aus der Summe der Werte am Betrachtungspunkt an sich sowie dessen 12 Nachbarpunkten gebildet (vgl. Gleichung 15).

$$\overline{TRQ}_i = \frac{TRQ_i + \sum_{k=1}^{12} TRQ_{k_i}}{13} \quad \text{Gleichung 15}$$

mit: \overline{TRQ}_i : Mittlere Trefferquote am Rasterknotenpunkt i

TRQ_i : Trefferquote am Rasterknotenpunkt i

TRQ_{k_i} : Trefferquote des Nachbarn k von Knotenpunkt i

Tabelle 36: Randbedingungen der Rasteranalyse

	Klassengewichte				Startgewichte	
	SK1	SK2	SK3	SK4	PktS	UmfS
Ergebnis der maschinellen Optimierung	0,65 - 0,95	0,25 - 0,33	0,15 - 0,18	0,04 - 0,06	6 - 9	2 - 3
Schrittgröße	0,05	0,01	0,01	0,01	1	0,5
Rastergrenzen	0,6 - 1	0,24 - 0,34	0,14 - 0,19	0,03 - 0,07	5 - 10	1,5 - 3,5

Durch das Einbeziehen der Umgebung eines Punktes werden robustere Kalibrierungen stärker bewertet als solche, die nur punktuell zu guten Ergebnissen führen, wenn in deren Umgebung die Modellperformance stark nachlässt. Damit diese gemittelten Quoten auch am Rand eines Rasters gebildet werden konnten, mussten die Grenzen des Rasters um eine Schrittgröße erweitert werden (Tabelle 36). Insgesamt wurde die Trefferquote und erweiterte Trefferquote für 89.100 Rasterknotenpunkte berechnet. Die mittleren Quoten konnten für 9.072 Rasterknotenpunkte berechnet werden, die nicht am Rand des Rasters lagen.

Die Startgewichte für die Vergleichsvarianten wurden mithilfe einer Rasteranalyse so ausgewählt, dass die Summe aus Trefferquote und erweiterter Trefferquote maximal wurde (Raster: 1 bis 10, Schrittgröße 1).

7.5.3 Ergebnis der Kalibrierung

Bei sämtlichen 9.072 berechneten Gewichtungen lag die Trefferquote zwischen 58,7 % und 63,9 % und die erweiterte Trefferquote zwischen 95 % und 97,9 %. Zum Vergleich sind in Tabelle 37 die beiden Bewertungskriterien für eine rein zufällige Klassifizierung der Haltungen und eine Anwendung des Modells ohne Wichtungsfaktoren angegeben. Bereits ohne Wichtungsfaktoren werden durch die Anwendung der Rechenregeln des *SubKanS*-Modells ca. Dreiviertel der Haltungen ähnlich eingeordnet (maximal eine Klasse Abweichung). Dies ist gewissermaßen die Nulllinie für die Bewertung der Gewichtungen innerhalb des Rasters und der Vergleichsvarianten, die alle deutlich über diesem Wert liegen.

Tabelle 37: Ergebnis der Rasteranalyse

Kriterium	Trefferquote	Erweiterte Trefferquote
Spannweite der Gewichtungen innerhalb des Rasters	58,7 - 63,9 %	95 - 97,9 %
Rein zufällige Zuordnung der Haltungen	12 %	31 %
SubKanS-Modell ohne Wichtungsfaktoren	31 %	77 %
Vergleichsvariante linear	57,6 %	94,3 %
Vergleichsvariante linear-exponentiell	60,7 %	96 %
Vergleichsvariante DWA-Leitfaden	62,3 %	96,7 %

Abgesehen von den Referenzwerten liegt die erweiterte Trefferquote immer deutlich über 90 %; sie steigt in der Reihenfolge „linear“ < „linear-exponentiell“ < „DWA-Leitfaden“ < „Beste Gewichtungen innerhalb des Rasters“ an. Die gleiche Reihenfolge ergibt sich bei der Trefferquote als Bewertungskriterium. Dass Trefferquote und erweiterte Trefferquote auf den ersten Blick sehr ähnlich hoch wirken, spricht zum einen für die Güte der Rechenregeln innerhalb des *SubKanS*-Algorithmus, die un-

abhängig von den Gewichtungen eine richtige Tendenz bei der Substanzbewertung der Haltung ermitteln. Zum anderen zeigt der Vergleich zwischen *SubKanS*-Modell ohne Wichtungsfaktoren und Vergleichsvarianten deren sinnvolle Gewichtung bezüglich der Schadensschwere.

Die Güte des kalibrierten Modells kann durch eine Konfusionsmatrix visualisiert werden, bei der die Klassifizierung der Haltungen nach kalibriertem *SubKanS*-Modell der Klassifizierung durch die bestehenden Modelle gegenübergestellt wird (Bild 58). Von den insgesamt 14.537 Haltungen wurden 97,78 % entweder in die exakt gleiche Klasse oder eine danebenliegende Klasse eingeordnet. Nur bei 29 Haltungen ist die Differenz zwischen den Klassen größer als 2. In der Konfusionsmatrix ist gut zu erkennen, dass die Abweichung in der Klassifizierung schief verteilt ist. Es gibt eine Tendenz, dass das *SubKanS*-Modell, sofern es deutliche Unterschiede gibt, dazu neigt, Haltungen schlechter zu bewerten als die bestehenden Anbietermodelle. Am deutlichsten wird das bei einer Haltung, die vom *SubKanS*-Modell der Klasse 8 zugeordnet und von den bestehenden Modellen in die Klasse 2 sortiert wird. Bei dieser Haltung handelt es sich um eine Haltung mit einem außergewöhnlich großen Durchmesser von DN 2000 und einem Umfangschaden. Da die Schadenslänge von Umfangschäden direkt aus dem Haltungsdurchmesser berechnet wird, kann dies bei großen Durchmessern zu hohen Schadenslängen führen. Auf der anderen Seite ist die Schadensart Umfangschaden nicht in den bestehenden Modellen enthalten und somit auch nicht der Zusammenhang zwischen Durchmesser und Schadenslänge, was die schiefe Lage der Abweichung erklärt. Hier handelt es sich zumeist um Haltungen mit großem Durchmesser und Umfangschaden.

		Klassifizierung des SubKanS Modells									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Klassifizierung der bestehenden Modelle	1	1405	389	17	2	2					
	2	411	1546	298	35	4	3		1		
	3		355	560	187	50	6	2			
	4		9	271	324	110	22	2	2		
	5			11	184	281	149	13	3		
	6			1	8	185	402	179	37		
	7					9	203	325	206	21	4
	8						27	237	853	323	16
	9							10	348	1429	477
	10								6	491	2086

Bild 58: Ergebnis der Kalibrierung als Konfusionsmatrix mit Klassifizierung der bestehenden Modelle und Klassifizierung des kalibrierten *SubKanS*-Modells (türkise Farben beschreiben Zellen für Trefferquote und erweiterte Trefferquote)

Die besten Gewichtungen innerhalb des Rasters unterscheiden sich nur um wenige 100stel bis 10tel Prozent. Damit stellten sich die Fragen, ab welcher Differenz ein Unterschied als signifikant interpretiert werden kann, und ob ein Modell mit einer Gewichtung, die zu einer erweiterten Trefferquote von

97,78 % führt, wirklich ein besseres Modell ist als eines mit 97,77 %. Es galt, die Unterschiede zwischen den Gewichtungen zu interpretieren, um auf dieser Grundlage letztendlich eine der vielen in Frage kommenden Gewichtungen auszuwählen.

7.5.4 Festlegung der Start- und Klassengewichte

Es kann zwei Gründe geben, warum eine Gewichtung A zu einer besseren Trefferquote führt als eine Gewichtung B. Die naheliegende Möglichkeit ist, dass das Modell mit der Gewichtung A tatsächlich besser ist. Es ist aber auch möglich, dass eine Gewichtung nur besser abschneidet, weil der Kalibrierungsdatensatz besser zu ihr passt. In diesem Fall wäre die zufällige Auswahl der Haltungen aus dem Kalibrierungsdatensatz für den Performance-Unterschied verantwortlich. Die Wahrscheinlichkeit, mit der zwei unterschiedliche Trefferquoten bezüglich eines Datensatzes zustande kommen, obwohl die Modelle grundsätzlich gleichgut performen, kann mithilfe einer Binomialverteilung abgeschätzt werden. Die Methode ist in Anlage 6 detailliert beschrieben.

Ein Unterschied zwischen zwei Trefferquoten bzw. zwei erweiterten Trefferquoten wurde bei der Kalibrierung als signifikant betrachtet, wenn die Wahrscheinlichkeit eines zufälligen Auftretens bei weniger als 50 % lag. In dem Fall ist es wahrscheinlicher, dass ein Modell grundsätzlich schlechter performt, als dass die reine Haltungsauswahl für den Unterschied verantwortlich zeichnet. Nach Anwendung des 50 %-Filters blieben von den 9.070 Gewichtungen innerhalb des Rasters 69 Gewichtungen ohne signifikanten Unterschied übrig. Diese 69 Gewichtungen kommen demnach alle als gleichwertiges Ergebnis der Kalibrierung in Frage. Aus den 69 wurden 5 Gewichtungen zur weiteren Betrachtung ausgewählt. Darunter befindet sich die Gewichtung, die in Summe am besten abgeschnitten hat (Bezeichnung: Beste), sowie vier weitere Gewichtungen, die Ziel 2 der Kalibrierung („Robuste Gewichte, die keine Scheingenaugigkeit vortäuschen, sondern als allgemeingültig und vereinfachend verstanden werden sollen“) entsprechen. Die Gewichtungen sind in Tabelle 38 aufgelistet. Sie unterscheiden sich in ihren Klassengewichten für Schäden der Schadensklasse 1 und 2 und im Startgewicht für Punktschäden. Die Trefferquoten liegen sehr nahe beieinander im Bereich von 63,26 % bis 63,56 %. Die erweiterten Trefferquoten der Gewichtungen unterschieden sich maximal um 0,1 %.

Neben den Bewertungskriterien an sich ist die Wahrscheinlichkeit, mit der die Differenz der Bewertungskriterien im Vergleich zum besten Modell („Beste“) rein zufällig auftritt, angegeben. Obwohl auch die Vergleichsvarianten zu hohen erweiterten Trefferquoten um 95 % führen, wird durch den Vergleich der Zufallswahrscheinlichkeit der Performance-Unterschied deutlich. Der Unterschied in den Trefferquoten ist mit deutlich mehr als 99,9 %-iger Wahrscheinlichkeit auf einen grundsätzlichen Performance-Unterschied der Modelle zurückzuführen. Einzig für die Vergleichsvariante „DWA-Leitfaden“ beträgt die Wahrscheinlichkeit eines rein zufälligen Unterschieds der Trefferquote 1,4 %.

Tabelle 38: Ausgewählte Gewichtungen nach Kalibrierung sowie Vergleichsvarianten für die Klassengewichte mit Angabe der Trefferquote (TRQ) und der erweiterten Trefferquote (TRQ_{erw}) in %

	Klassengewicht						Startgewicht			TRQ	TRQ _{erw}
	SK0	SK1	SK2	SK3	SK4	SK5	StrS	PktS	UmfS	Zufalls- wahrscheinlichkeit ⁵⁵	
Beste	1	0,8	0,27	0,15	0,05	0	1	8	3	63,56 (-)	97,79 (-)
75-8	1	0,75	0,25	0,15	0,05	0	1	8	3	63,33 (62 %)	97,77 (90 %)
75-9	1	0,75	0,25	0,15	0,05	0	1	9	3	63,26 (51 %)	97,69 (51 %)
80-8	1	0,8	0,25	0,15	0,05	0	1	8	3	63,37 (69 %)	97,78 (94 %)
85-8	1	0,85	0,25	0,15	0,05	0	1	8	3	63,44 (82 %)	97,72 (60 %)
linear	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0	1	10	4	57,56 (<< 0,1 %)	94,30 (<< 0,1 %)
DWA- Leitfa- den⁵⁶	1	1	0,3	0,09	0,027	0	1	4	2	62,30 (1,4 %)	96,66 (<< 0,1 %)
Linear- Exponen- tiell	1	0,75	0,5	0,25	0,125	0	1	9	4	60,80 (<< 0,1 %)	95,96 (<< 0,1 %)

⁵⁵ Die Zufallswahrscheinlichkeit entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass die Differenz zu der Trefferquote des Modells „Beste“ rein zufällig zustande kommt. Eine Wahrscheinlichkeit < 50 % führt zu einer Einschätzung als signifikanter Unterschied.

⁵⁶ DWA-Themenband 4/2012 (DWA, 2012)

Die ausgewählten besten Gewichtungen innerhalb des Rasters können als mehr oder weniger gleich gut angesehen werden. Um sich für eine Gewichtung zu entscheiden, wurde eine zusätzliche Experteneinschätzung mit Bewertung von Beispielhaltungen herangezogen. Zu Beginn von *SubKanS* wurden 105 Haltungen ausgewählt, anhand derer Sachverhalte der Substanzermittlung diskutiert wurden. Die Abnutzung dieser 105 Haltungen wurde auf Grundlage einer graphischen Darstellung der Schadenscodes über die Haltungslänge in 10 % breite Abnutzungsklassen ingenieurmäßig eingestuft. Die Schadenscodes waren farblich gekennzeichnet nach ihrer Schadensschwere. Es wurde damals noch nicht in Punkt- und Umfangschäden unterschieden. Streckenschäden waren jedoch durch die größere Ausdehnung in der Grafik erkennbar. Die ingenieurmäßige Einschätzung eignete sich nicht für die Kalibrierung des Modells, bringt jedoch eine neue Dimension in die Auswertung der Kalibrierungsergebnisse, da sie eine Skalierung der Abnutzung beinhaltet, während die Kalibrierung komplett skalunenabhängig durchgeführt wurde.

Somit ist die geschätzte und modellunabhängige Skalierung der Abnutzung im letzten Schritt die ausschlaggebende Größe. In Bild 59 ist die Summe aus Trefferquote und erweiterter Trefferquote für die Auswahl der kalibrierten Modelle aufgetragen und wird mit den anderen Überlegungen zur Gewichtung der Schadensschwere verglichen. Die Vergleichsgröße verläuft zwischen 0 % (kein Treffer) und 200 % (100 % exakte Treffer und dadurch automatisch 100 % erweiterte Treffer). Klassen- und Startgewichte entsprechen denen in Tabelle 38.

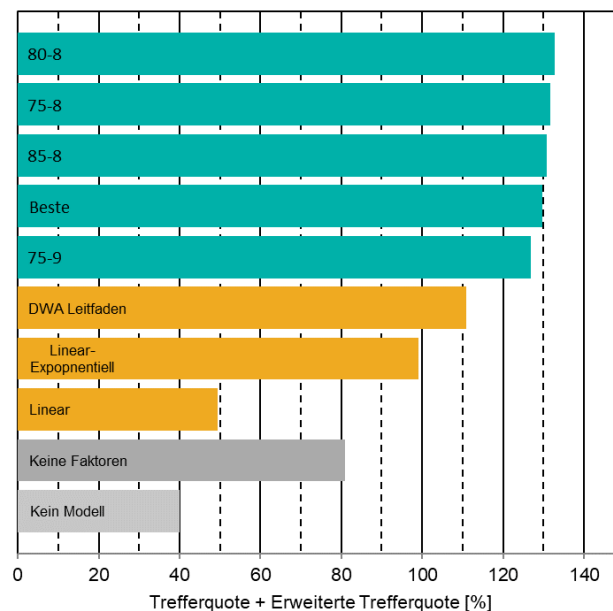


Bild 59: Vergleich unterschiedlicher Gewichtungen des *SubKanS*-Modells mit einer ingenieurmäßigen Einschätzung der Abnutzung für 105 Haltungen⁵⁷

⁵⁷ Hintergrunddaten zu den Varianten sind in Tabelle 38 angegeben

Zur Einordnung der Ergebnisse sind erneut die Trefferquote und erweiterte Trefferquote durch ein Modell ohne Wichtungsfaktoren sowie einer rein zufälligen Klassifizierung der Haltungen angegeben. Es ergibt sich eine ähnliche Ordnung der Gewichtungen wie bereits nach dem Vergleich der Rangordnungen mit den bestehenden Modellen. Die vorderen Plätze werden von den ausgewählten Gewichtungen innerhalb des Rasters belegt. Sie liegen sehr nahe beieinander und werden gefolgt von den Vergleichsvarianten „DWA-Leitfaden“ und „Linear-Exponentiell“. Eine lineare Gewichtung der Schadensschwere schneidet auch hier am schlechtesten ab. Der größere Unterschied zwischen den Gewichtungen innerhalb des Rasters und den Vergleichsvarianten deutet darauf hin, dass die Abnutzung bei den Vergleichsvarianten tendenziell anders skaliert ist als durch die Experten eingeschätzt. Aus diesem Grund wurde die Übereinstimmung zwischen dem kalibrierten Modell und der Vergleichsvariante „linear“ mit der Experteneinschätzung in einer Konfusionsmatrix dargestellt (Bild 60).

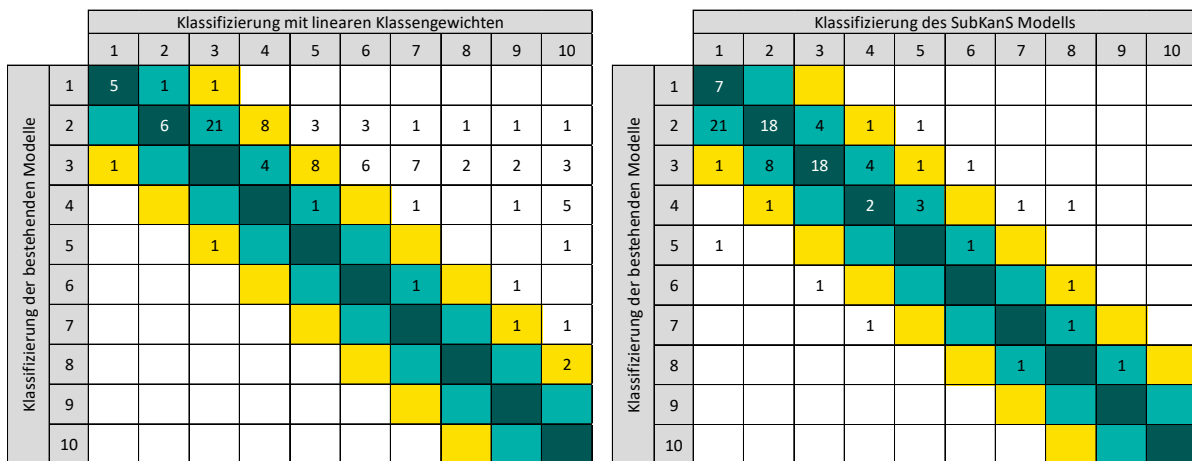


Bild 60: Konfusionsmatrix zwischen der Experteneinschätzung für die Abnutzung von 105 Haltungen und der Vergleichsvariante mit linearen Klassengewichten (links) bzw. dem kalibrierten *SubKanS*-Modell (rechts)

Es ist erkennbar, dass die Skala des *SubKanS*-Modells gut mit der Experteneinschätzung übereinstimmt. Bei zwei Haltungen wurde die Abnutzung grob zwischen 70 und 80 % geschätzt. Für eine dieser Haltungen wird durch das kalibrierte *SubKanS*-Modell eine Abnutzung von 60 - 70 % ermittelt, für die andere eine Abnutzung zwischen 80 und 90 %. Bei der Vergleichsvariante „linear“ wurden die Startgewichte für Punkt- und Umfangschäden so kalibriert, dass sie über 94 % der Haltungen in eine ähnliche Klasse wie die bestehenden Modelle zur Substanzermittlung einordnet. Wird jedoch nicht die Rangfolge, sondern die Abnutzungsskala als Grundlage für die Klassifizierung verwendet, fällt auf, dass diese Variante bei den meisten Haltungen eine viel höhere Abnutzung berechnet, als dies ingenieurmäßig geschätzt wurde. Ungefähr ein Fünftel der Haltungen landen bei dieser Gewichtung bei einer Abnutzung > 80 %. Eine so hohe Abnutzung wurde durch die Experten für keine einzige Haltung geschätzt. Es gibt also eine deutliche Diskrepanz zwischen dem Modellergebnis und der Experteneinschätzung. Dieses Ergebnis unterstreicht die Wichtigkeit, nach einer skalenunabhängigen

Kalibrierung die Skala genauer zu betrachten. Es zeigt, dass eine hohe Trefferquote auf Grundlage der Rangordnung nicht gleichbedeutend mit einer sinnvollen Skala ist.

Als am besten geeignete Gewichtung wurde sich auf die Variante „80-8“ geeinigt. Sie zählt zu den besten Gewichtungen innerhalb des Rasters im Rahmen der Kalibrierung und schneidet am besten gegenüber der Experteneinschätzung ab. Die Klassen- und Startgewichte werden im Folgenden genauer betrachtet und eingeordnet.

Die Gewichtung der Schadensschwere ist deutlich zweigeteilt (Bild 61). Die prioritären Schäden mit Schadensklasse 0 und 1 sind mit den Wichtungsfaktoren 1 und 0,8 versehen. Nachrangige Schäden werden mit maximal 0,25 deutlich geringer gewichtet. Für schwächere Schäden nimmt die Gewichtung linear ab. Ein SK0-Schaden entspricht 4 SK2-Schäden, ca. 7 SK3-Schäden und 20 SK4-Schäden der gleichen Länge.

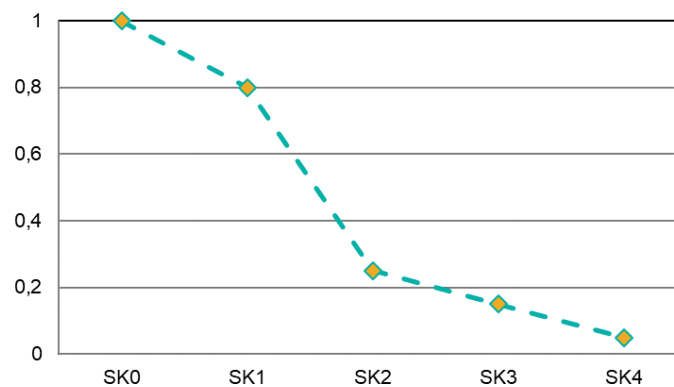


Bild 61: Klassengewichte des kalibrierten *SubKanS*-Modells

Punktschäden werden im Vergleich zu Streckenschäden 8-fach gewichtet. Bei einer festgelegten Einzelschadenslänge von 0,30 m bedeutet dies eine Nettoschadenslänge von 2,40 m. Ein Punktschaden trägt damit genauso viel zur Abnutzung bei wie ein gleich schwerer Streckenschaden der Länge 2,40 m. Kürzere Streckenschäden werden im *SubKanS*-Modell auf diese Länge heraufgesetzt, und können somit niemals eine geringere Schadenslänge annehmen als ein Punktschaden mit gleicher Schadensklasse. Umfangschäden werden mit einem Faktor von 3 gewichtet. Haltungen mit einem Durchmesser von 200 mm, 300 mm und 800 mm führen beispielsweise zu einer Schadenslänge von 1,88 m, 2,83 m und 7,54 m.

Dass die Schadenslänge bei Haltungsdurchmessern zwischen 200 und 300 mm im Bereich der gewichteten Punktschadenslänge liegt, ist kein Zufall. Dieser Durchmesser trat im Projekt- und Kalibrierungsdatensatz am häufigsten auf. In den bestehenden Modellen zur Substanzermittlung gab es die Schadensart Umfangschaden nicht. Sie konnte dementsprechend auch nicht durch die Modelle separat kalibriert werden. Stattdessen wurden Umfangschäden so kalibriert, dass sie im häufigsten

Fälle dem bereits bestehenden Punktschaden entsprechen. Bei Haltungen mit sehr geringem Durchmesser tragen Schäden am Umfang weniger zur Abnutzung bei als Punktschäden, bei Haltungen mit großem Durchmesser hingegen mehr. Dies war durch die Einführung des Umfangschadens so beabsichtigt. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass der Umfangschaden auf Haltungen mit sehr großem Durchmesser extrem hohe Schadenslängen annehmen kann. Die Substanzermittlung ist deswegen bei Haltungen mit sehr großem Durchmesser in Gegenwart von Umfangschäden nur bedingt möglich.

Fazit

Die Kalibrierung des Modells hat zu einer Gewichtung der Schadensschwere von 1, 0,8, 0,25, 0,15 und 0,05 für Schäden der Schadensklassen 0, 1, 2, 3 und 4 geführt. Gegenüber Streckenschäden werden Punktschäden 8-fach und Umfangschäden 3-fach gewichtet. Das Modell war in der Lage, 97,8 % der Haltungen nach ihrer Rangordnung mit einer tolerierbaren Abweichung so einzuordnen, wie dies durch fünf etablierte Modelle geschehen ist. Es hat darüber hinaus die von Experten eingeschätzte Abnutzungsskala von Beispielhaltungen am besten getroffen.

7.6 Validierung

Der Kalibrierungsdatensatz wurde vor Kalibrierung zufällig in zwei gleichgroße Teildatensätze aufgeteilt. Dadurch standen für die Validierung ebenfalls 14.537 Inspektionsprotokolle zur Verfügung, die nicht für die Kalibrierung verwendet wurden (vgl. Kap. 7.5.1). Für die Validierung wurde eine Binomialverteilung mit den Kennzahlen aus der Kalibrierung erstellt. Sie gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der eine bestimmte Anzahl von Treffern in einem Haltungsdatensatz zustande kommt bei einer fest definierten Wahrscheinlichkeit pro Haltung (= Trefferquote). Das Modell gilt als validiert, sofern Treffer und erweiterte Treffer der Validierung im 95 %-Konfidenzintervall der mit den Kalibrierungskennzahlen erstellten Binomialverteilung liegen. Die Trefferquote der Kalibrierung lag bei 63,38 % (entsprechend 9.214 Treffern). Mit einer Binomialverteilung ergeben sich für einen 14.537 Daten umfassenden Datensatz als 95 %-Konfidenzintervallgrenzen 9.100 und 9.327 Treffer. Analog dazu liegt das 95 %-Konfidenzintervall bei einer erweiterten Trefferquote von 97,78 % zwischen 14.179 und 14.249 erweiterten Treffern (vgl. Tabelle 39).

Tabelle 39: Trefferquoten Kalibrierung und Validierung

	Trefferquote	Erweiterte Trefferquote
Kalibrierung	63,38 %	97,78 %
Validierung	62,75 %	97,55 %

Im Zuge der Validierung wurden 9.122 (62,75 %) Haltungen exakt gleich klassifiziert wie durch die bestehenden Modelle. Das sind 90 Haltungen weniger als während der Kalibrierung, was innerhalb des Konfidenzintervalls liegt. Auch die Anzahl der erweiterten Treffer liegt bei der Validierung zwar mit 14.181 (97,55 %) Haltungen um 33 Haltungen unter der Anzahl der erweiterten Treffer der Kalibrierung, jedoch ebenfalls im Konfidenzintervall. Die guten Ergebnisse der Kalibrierung konnten somit validiert werden.

8 Sensitivitätsanalyse der Abnutzungsbestimmung und der Substanzklassifizierung von Abwasserkanälen

Die Abnutzungs- und Substanzermittlung basiert auf Inspektionsprotokollen. Werden Schäden bei der Inspektion nicht erkannt oder falsch beschrieben, führt das zu einem Fehler bei der Substanzberechnung. Um die Auswirkungen einschätzen zu können, musste der entwickelte Algorithmus auf seine Sensitivität gegenüber Fehlern im Inspektionsprotokoll geprüft werden. Hierbei ging es um solche Fehler, die nicht im Rahmen einer Plausibilisierung der Daten auffallen und dementsprechend unbemerkt zu falschen Ergebnissen führen können. Die Auswirkungen der Fehler wurden durch gezielte Modifikation von Inspektionsprotokollen untersucht. In einem ersten Schritt wurden solche Haltungen herausgefiltert, die potentiell von dem jeweiligen Fehler betroffen sein könnten. Anschließend wurden die Haltungen so modifiziert, dass die Abweichung, die durch diesen Fehler entstehen würde, quantifiziert werden konnte. Es wurde die Auswirkung auf die Abnutzung, die Substanzklassifizierung und vergleichend auf die Zustandsklassifizierung betrachtet.

Analysiert wurde die Sensitivität der Substanzermittlung in Hinblick auf das Übersehen von Schäden bei der Inspektion. Dies wurde für Schäden mit den Einzelschadensklassen 0 bis 4 für Punkt- bzw. Umfangschäden sowie für Streckenschäden getrennt durchgeführt. Darüber hinaus wurden einige konkrete Fehler bei der Inspektion betrachtet. Tabelle 40 beinhaltet eine Auflistung aller in die Analyse eingeschlossenen Fehler.

Im Projektdatensatz wurden verschobene Verbindungen (BAJ-Schaden) oder einragende Verbindungen (BAI-Schaden) sowie das Infiltrieren von Wasser (BBF-Schaden) häufig als Streckenschaden kodiert, obwohl es sich hierbei um einen punktuellen Schaden handelt. Durch die Kodierung über eine längere Strecke wurden vermeintlich mehrere Punktschäden zusammengefasst. Für die Fehleranalyse wurde davon ausgegangen, dass alle vom Streckenschaden eingeschlossenen Rohrverbindungen den jeweiligen Schaden aufweisen. Ein Streckenschaden wurde dementsprechend durch Punktschäden, die mit der Anzahl der Rohrverbindungen korrespondieren, ersetzt. Es wurde eine Rohrlänge von durchschnittlich 2,50 m für die Berechnung der tatsächlichen Schadensanzahl angesetzt, da es sich hierbei um eine Standardrohrlänge für Beton- und Steinzeugrohre handelt. Ein Streckenschaden des Schadensbilds „Verschobene Verbindung im Winkel“ (BAJ C) wurde hingegen durch drei punktuelle Schäden ersetzt. Diese Überlegung beruht auf der Tatsache, dass es dreier Richtungswechsel bedarf, sobald die Haltung an einer Stelle im Winkel verschoben ist.

Als weitere Fehlermöglichkeiten wurden übersehene geringe Verformungen (< 7 %) und schadhafte Sanierungen identifiziert. Auch die Auswirkungen einer Schadenskodierung als Rohrbruch, obwohl es sich tatsächlich nur um eine Abplatzung handelt, wurde überprüft. Bei verdunkelten Stellen an der Kanalunterseite wird standardmäßig der Schadenscode Boden sichtbar (BAO) angegeben. Mit einer Einzelschadensklasse von 1 für Dichtheit und Standsicherheit kann dieser Schaden einen erheblichen Einfluss auf die Bewertung haben. Eventuell hat die Verdunkelung jedoch andere Ursachen und ist

nicht auf sichtbaren Boden zurückzuführen. Um die maximale Auswirkung dieses Schadens auf die Substanzklassifizierung abzuschätzen, wurde auf betroffenen Haltungen der Kode BAO gezielt entfernt.

Im Sinne der Automatisierbarkeit der Einzelschadensbewertung wird bei der Substanzermittlung bei Schäden, die nach DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) eine Einzelfalluntersuchung benötigen, auf die vorgeschlagenen Einzelschadensklassen der Baufachlichen Richtlinien Abwasser (ISYBAU) zurückgegriffen (BFR, 2019). Tatsächlich kann es aber sein, dass der Schaden stärker oder schwächer ist als dieser Durchschnittswert. In diesem Fall handelt es sich nicht um einen Inspektionsfehler, sondern um einen Fehler, der durch eine Vereinfachung der Einzelschadensbewertung eintreten könnte. Auch diese Fehler gingen in die Sensitivitätsanalyse ein.

Tabelle 40: Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse betrachtete Fehler, sortiert nach Fehlergruppen - Beschreibung der Modifikation von Inspektionsprotokollen und Angabe der Anzahl modifizierter Protokolle

Name		Fehler	Modifikation	Anzahl
Stammdaten	Objektlänge	Anstelle der Objektlänge wird die Haltungslänge zur Berechnung der Substanz verwendet.	Ausgewählt wurden alle Haltungen mit Schäden. Die Länge des Objekts wurde um 0,5 m nach vorne und um 0,5 m nach hinten verlängert, um eine Verwendung der Haltungslänge von Schachtmitte bis Schachtmitte nachzustellen.	79.956
		Nach einer Einzelfalluntersuchung hätte der Zustand des Schadens zwei Klassen tiefer gelegen als der verwendete Wert nach der BFR Abwasser.	Ausgewählt wurden alle Haltungen mit einem Schaden, der nach DWA-M 149-3 durch eine Einzelfalluntersuchung gemusst hätte. Diese Schäden wurden zwei Einzelschadensklassen heruntersetzt im Vergleich zum ISYBAU-Wert, jedoch maximal auf die Zustandsklasse 0.	36.154
Fehler durch Vereinfachungen bei der Einzelschadensbewertung	ISYBAU - 2	Nach einer Einzelfalluntersuchung hätte der Zustand des Schadens eine Klasse tiefer gelegen als der verwendete Wert nach der BFR Abwasser.	Ausgewählt wurden alle Haltungen mit einem Schaden, der nach DWA-M 149-3 durch eine Einzelfalluntersuchung gemusst hätte. Diese Schäden wurden eine Einzelschadensklasse heruntersetzt im Vergleich zum ISYBAU-Wert, jedoch maximal auf die Einzelschadensklasse 0.	36.154

	Name	Fehler	Modifikation	Anzahl
	ISYBAU + 1	Nach einer Einzel- falluntersuchung hätte der Zustand des Schadens eine Klasse höher ge- legen als der ver- wendete Wert nach der BFR Abwasser.	Ausgewählt wurden alle Haltungen mit einem Schaden, der nach DWA-M 149-3 durch eine Einzelfalluntersuchung gemusst hätte. Diese Schäden wurden eine Einzelschadensklasse heraufgesetzt im Vergleich zum ISYBAU-Wert, jedoch maximal auf die Einzelschadensklasse 5.	36.154
	ISYBAU + 2	Nach einer Einzel- falluntersuchung hätte der Zustand des Schadens zwei Klassen höher ge- legen als der ver- wendete Wert nach der BFR Abwasser.	Ausgewählt wurden alle Haltungen mit einem Schaden, der nach DWA-M 149-3 durch eine Einzelfalluntersuchung gemusst hätte. Diese Schäden wurden zwei Einzelschadensklassen heraufgesetzt im Vergleich zum ISYBAU-Wert, jedoch maximal auf die Einzelschadensklasse 5.	36.154
Generelle Fehler bei der Inspektion	ZK0 übersehen	Bei der Inspektion wurde ein ZK0-Schaden nicht aufgenommen.	Ausgewählt wurden alle Haltungen mit mindestens einem ZK0-Schaden. Anschließend wurde ein ZK0-Schaden von der Haltung entfernt. Für den Fall, dass mehrere ZK0-Schäden auf der Haltung vorlagen, wurde ein Schaden zufällig ausgewählt. Die Auswahl erfolgte getrennt für Punktschäden + Umfangschäden und für Streckenschäden. Die Schadensausprägung spielte für die Auswahl keine Rolle.	PktS + UmfS: 3.350 StrS: 767
	ZK1 übersehen	Bei der Inspektion wurde ein ZK1-Schaden nicht aufgenommen.	Ausgewählt wurden alle Haltungen mit mindestens einem ZK1-Schaden. Anschließend wurde ein ZK1-Schaden von der Haltung entfernt. Für den Fall, dass mehrere ZK1-Schäden auf der Haltung vorlagen, wurde ein Schaden zufällig ausgewählt. Die Auswahl erfolgte getrennt für Punktschäden + Umfangschäden und für Streckenschäden. Die Schadensausprägung spielte für die Auswahl keine Rolle.	PktS + UmfS: 22.605 StrS: 2.954

Name		Fehler	Modifikation	Anzahl
	ZK2 übersehen	Bei der Inspektion wurde ein ZK2-Schaden nicht aufgenommen.	Ausgewählt wurden alle Haltungen mit mindestens einem ZK2-Schaden. Anschließend wurde ein ZK2-Schaden von der Haltung entfernt. Für den Fall, dass mehrere ZK2-Schäden auf der Haltung vorlagen, wurde ein Schaden zufällig ausgewählt. Die Auswahl erfolgte getrennt für Punktschäden + Umfangschäden und für Streckenschäden. Die Schadensausprägung spielte für die Auswahl keine Rolle.	PktS + UmfS: 47.413 StrS: 8.872
	ZK3 übersehen	Bei der Inspektion wurde ein ZK3-Schaden nicht aufgenommen.	Ausgewählt wurden alle Haltungen mit mindestens einem ZK3-Schaden. Anschließend wurde ein ZK3-Schaden von der Haltung entfernt. Für den Fall, dass mehrere ZK3-Schäden auf der Haltung vorlagen, wurde ein Schaden zufällig ausgewählt. Die Auswahl erfolgte getrennt für Punktschäden + Umfangschäden und für Streckenschäden. Die Schadensausprägung spielte für die Auswahl keine Rolle.	PktS + UmfS: 46.228 StrS: 16.207
	ZK4 übersehen	Bei der Inspektion wurde ein ZK4-Schaden nicht aufgenommen.	Ausgewählt wurden alle Haltungen mit mindestens einem ZK4-Schaden. Anschließend wurde ein ZK4-Schaden von der Haltung entfernt. Für den Fall, dass mehrere ZK4-Schäden auf der Haltung vorlagen, wurde ein Schaden zufällig ausgewählt. Die Auswahl erfolgte getrennt für Punktschäden + Umfangschäden und für Streckenschäden. Die Schadensausprägung spielte für die Auswahl keine Rolle.	PktS + UmfS: 37.573 StrS: 13.288
Fehlerhafte Schadensart	BAJ C Streckenschaden	Mehrere im Winkel verschobene Verbindungen hintereinander wurden zu einem Streckenschaden zusammengefasst.	Ausgewählt wurden alle Haltungen mit einem BAJ C-Streckenschaden. Dieser Schaden wurde durch 3 BAJ-Umfangschäden ersetzt: einen Umfangschaden zu Beginn des Streckenschadens, einen am Ende und einen in der Mitte	2.499

	Name	Fehler	Modifikation	Anzahl
	BAJ B Streckenschaden	Mehrere radial verschobene Verbindungen hintereinander wurden zu einem Streckenschaden zusammengefasst.	Ausgewählt wurden alle Haltungen mit einem BAJ B-Streckenschaden. Dieser Schaden wurde durch BAJ B-Umfangschäden alle 2,50 m (angenommene Rohrlänge) ersetzt. Die Anzahl der Umfangschäden ist damit von der Länge des Streckenschadens abhängig.	353
	BAI Streckenschaden	Mehrere einragende Verbindungen hintereinander wurden zu einem Streckenschaden zusammengefasst.	Ausgewählt wurden alle Haltungen mit einem BAI-Streckenschaden. Dieser Schaden wurde durch BAI-Umfangschäden alle 2,50 m (angenommene Rohrlänge) ersetzt. Die Anzahl der Umfangschäden ist damit von der Länge des Streckenschadens abhängig.	3.622
	BBF Streckenschaden	Die Infiltration von Wasser wird als Streckenschaden kodiert, obwohl jeweils nur an den Muffen Wasser eintritt.	Ausgewählt wurden alle Haltungen mit einem BBF-Streckenschaden. Dieser Schaden wurde durch BBF-Punktschäden alle 2,50 m (angenommene Rohrlänge) ersetzt. Die Anzahl der Punktschäden ist damit von der Länge des Streckenschadens abhängig.	2.185
Konkrete Fehler bei den Feststellungen	Verformung	Eine Verformung unter 7 % wurde nicht erkannt.	Ausgewählt wurden alle Haltungen mit einem BAA-Schaden < 7 %. Auf ihnen wurde der Schaden entfernt.	23
	Rohrbruch	Abplatzungen werden fälschlicherweise als Rohrbruch kodiert.	Ausgewählt wurden alle Haltungen mit Rohrbruch, der durch eine Abplatzung (BAF B) ersetzt wurde.	12.085
	Sanierung	Eine fehlerhafte Sanierung wurde nicht erkannt.	Ausgewählt wurden alle Haltungen mit einer fehlerhaften Sanierung (BAL). Auf ihnen wurde der Schadenscode BAL entfernt.	530

Name	Fehler	Modifikation	Anzahl
Boden sichtbar	Es wurde der Schaden „Boden sichtbar“ protokolliert. Tatsächlich handelt es sich nur um eine Verdunklung aus anderen Gründen, die die Substanz nicht beeinträchtigt.	Ausgewählt wurden alle Haltungen mit dem Schadenscode Boden sichtbar (BAO), welcher entfernt wurde.	1.903

Die Auswirkungen der möglichen Fehler wurden bezüglich der Substanz, der Substanzklassifizierung und vergleichend bezüglich der Zustandsklassifizierung ausgewertet. Außerdem wurde die Häufigkeit eines solchen Fehlers von Experten grob in die Kategorien „häufig“, „ab und zu“, „selten“ und „nicht abschätzbar“ eingeteilt.

In Bild 62 ist die Abweichung der berechneten Substanz durch die Fehler sortiert nach den Fehlergruppen aufgetragen. Neben dem arithmetischen Mittel und dem Median sind unterschiedliche Perzentile angezeigt, um Informationen über die Abweichung der Substanz auf Objektebene zu erhalten. Je breiter die Perzentile sind, desto unterschiedlicher wirkt sich der jeweilige Fehler auf einzelne Haltungen aus. Je weiter die Mittelwerte von 0 entfernt sind, desto stärker kann sich der Fehler im schlimmsten Falle auf Netzebene auswirken. Es wird deshalb vom schlimmsten Fall gesprochen, da der Mittelwert nur aus Haltungen gebildet wurde, bei denen der Fehler eingebaut wurde. Zu dieser abweichenden Substanz würde es auf Netzebene nur kommen, sofern der Fehler auf allen Haltungen eines Kanalnetzes in gleicher Art und Weise aufträte.

Die größten Abweichungen kommen durch das Übersehen eines Schadens zustande, wobei das Übersehen von Streckenschäden generell einen größeren Einfluss auf die Substanz hat. Allerdings werden Streckenschäden prinzipiell seltener übersehen als Punktschäden der gleichen Einzelschadensklasse. Obwohl nicht erkannte Streckenschäden der Einzelschadensklasse 0 und 1 zu einer Überschätzung der Substanz um mehr als 50 % führen können, liegt die mittlere Abweichung mit 5,9 % und 4,8 % (Median) deutlich unter der mittleren Überschätzung durch nicht erkannte Streckenschäden der Zustandsklasse 3 mit 12,7 %. Das Klassengewicht von Schäden mit der Einzelschadensklasse 3 liegt bei 0,15. Ein Schaden über die gesamte Haltungslänge würde somit zu einer Abnutzung von 15 % führen, die im Maximalfall nicht berücksichtigt würde. Der hohe Median deutet darauf hin, dass vor allem ZK3-Streckenschäden häufig über die gesamte Haltung verlaufen, während ZK0- oder ZK1-Streckenschäden meist einen geringeren Einfluss aufgrund ihrer geringeren Ausdehnung haben. Das Übersehen von Punktschäden mit einer Einzelschadensklasse von 2 oder höher ist für die Substanz nur von geringer Bedeutung.



Bild 62: Abweichung der Substanz durch Fehler im Inspektionsprotokoll (der Durchschnitt beschreibt das arithmetische Mittel)⁵⁸

Das größte Potential zur Unterschätzung der Substanz besitzen als Rohrbruch kodierte Abplatzungen. Sie können auf einzelnen Haltungen zu einer erhöhten Abnutzung von mehr als 40 % führen. Auch eine falsche Verwendung des Codes „Boden sichtbar“ kann auf Haltungsebene zu einer unereschätzten Substanz von mehr als 20 % führen. Im Mittel wirkt sich dieser Fehler jedoch nicht auf die Abnutzung aus (Median = 0 %). Das liegt vor allem an den angewandten Überlagerungsregeln im *SubKans*-Algorithmus. Durch das Zusammenfassen der Schadenscodes zu Schadensbildern werden nachrangige Schäden ausgeschlossen. Der Code „Boden sichtbar“ wird in etwa der Hälfte aller Erwähnungen im Zusammenhang mit gleichschweren oder schwereren Schäden kodiert. Ohne das Zusammenfassen zu Schadensbildern (alle Schadenscodes gehen in die Berechnung der Substanz ein) würde eine falsche Kodierung zu einer mittleren Unterschätzung der Substanz von 5 % führen (Bild 63). Die berechnete Substanz ist aufgrund der Überlagerungsregeln somit robuster bei Schadensbildern, die durch mehrere Codes beschrieben werden. Verdächtig ein Fehler zu sein sind tendenziell Stationen, an denen neben dem Code „Boden sichtbar“ kein weiterer Schaden kodiert wurde. In

⁵⁸ Der Farbkode oberhalb des Diagramms beschreibt die Häufigkeit des Fehlers in der Praxis: rot = häufig, orange = ab und zu, grün = selten, grau = nicht abschätzbar

Anbetracht der möglichen hohen Auswirkung kann es sinnvoll sein, im Rahmen der Plausibilisierung nach solchen Protokolleinträgen zu suchen.

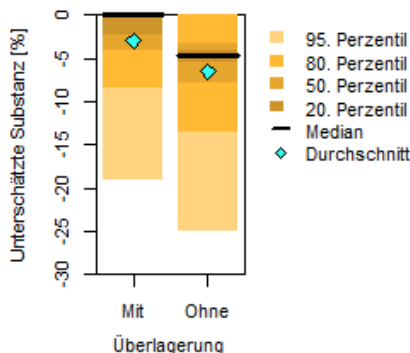


Bild 63: Vergleich der Auswirkung des Fehlers "Boden sichtbar" auf die Substanz mit und ohne Überlagerungsregeln

Den größten Effekt auf Objektebene durch die Verwendung einer falschen Schadensart (Streckenschaden anstelle von Punkt- oder Umfangschaden) haben falsch kodierte im Winkel verschobene Verbindungen (BAJ C). Die Grenzen des 95 %-Perzentils liegen bei -18,5 % und 23,7 %. Je nach Haltungs- und Schadenslänge kann sich die ermittelte Substanz einer Haltung durch den Fehler deutlich verändern. Es ist jedoch auffällig, dass sämtliche Auswirkungen falscher Schadensarten im Mittel nahe bei 0 % liegen. Obwohl es hier auf Einzelhaltungsebene zu Unterschieden kommt, wirken sich diese auf Netzebene nicht relevant aus. Das wird verdeutlicht durch Bild 64 A, in der die Substanzklassenverteilung der Haltungen mit BAJ C-Schäden durch die zwei Varianten „3 Umfangschäden“ bzw. „1 Streckenschaden“ aufgetragen ist. Zwar wechseln 28 % der Haltungen die Klasse, jedoch ändert sich dadurch nur wenig an der Gesamtverteilung.

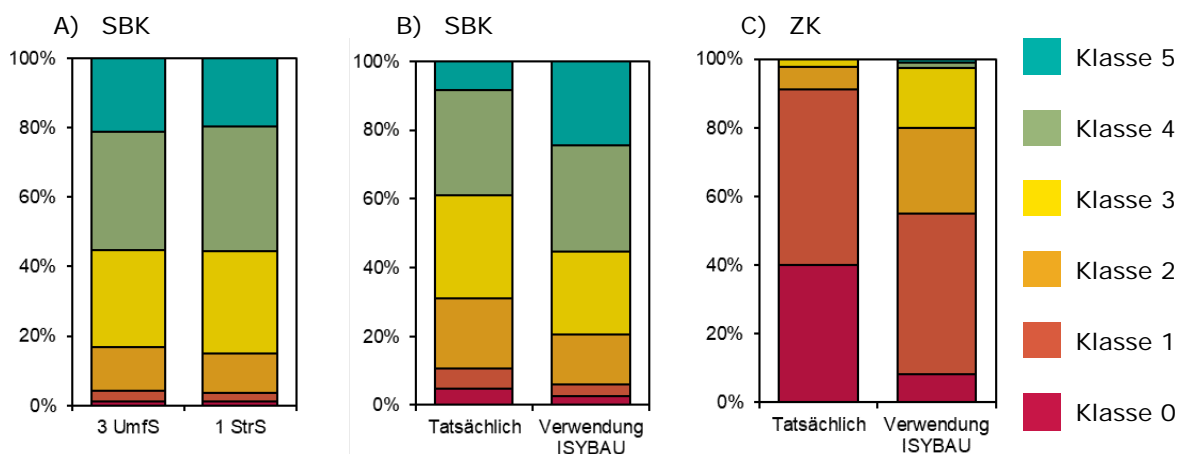


Bild 64: Verteilung der Substanzklassen (SBK) und Zustandsklassen (ZK) aller modifizierter Haltungen für die Fehler: A) verschobene Verbindung im Winkel als Streckenschaden (BAJ C StrS) sowie B) und C) eine durch die Annahme ISYBAU um 2 Einzelschadensklassen unterschätzte Schadensschwere („ISYBAU – 2“)

Unter allen betrachteten Fehlermöglichkeiten birgt die Verwendung der ISYBAU-Werte das größte Risiko, da eine um 2 Einzelschadensklassen zu niedrige Einschätzung eine große Auswirkung auf die Substanz besitzt und durchaus häufig auftritt. Die Auswirkung dieses Fehlers wurde deshalb detaillierter untersucht. Beinahe auf jeder zweiten Haltung befindet sich ein Schaden, der nach DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) einer Einzelfalluntersuchung unterzogen werden müsste. Auf einigen Haltungen kann die Verwendung des ISYBAU-Werts zu einer Überschätzung der Substanz um mehr als 44 % führen. Eine Haltung wäre dann tatsächlich deutlich stärker geschädigt als es durch die berechnete Substanz angezeigt würde. In 50 % der Fälle handelt es sich jedoch lediglich um eine Überschätzung von 4,2 % und weniger.

Eine Betrachtung der Substanzklassenverteilung zeigt, dass im Falle der unterschätzten Schadensschwere deutlich weniger Haltungen in die Substanzklasse 2 und deutlich mehr Haltungen in die Substanzklasse 5 eingeordnet werden. Der Fehler führt in 42 % der Fälle zu einer veränderten Klassifizierung der Substanz (siehe Tabelle 41), hat jedoch deutlich größere Auswirkungen auf die Zustandsklassifizierung (Bild 64 C). Hier führt die Annahme, dass der Schaden tatsächlich um 2 ZK schwerer ist, bei ca. Dreiviertel aller Haltungen zu einem Wechsel der Objektzustandsklasse. Durch eine Verwendung der ISYBAU-Werte würden Haltungen deutlich seltener in die Zustandsklassen 0 und 1 einsortiert. Die Zustandsklassifizierung reagiert also sensitiver auf eine „falsche“ Verwendung der ISYBAU-Werte als die Substanzklassifizierung. Besonders deutlich wird dies bei der Abfrage nach der durchschnittlichen Veränderung der Substanz- bzw. Zustandsklasse (Bild 65). Die Substanzklasse ändert sich im Durchschnitt um weniger als eine Klasse, ausgehend von fehlerhafter Verwendung des ISYBAU-Werts. Mehr als die Hälfte der Haltungen verbleiben hier in ihrer Substanzklasse, selbst wenn die Klasse des betroffenen Einzelschadens um zwei gesenkt wird. Nur in sehr wenigen Ausnahmefällen kommt es zu einer Veränderung um 2 Klassen. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine höhere Schadensschwere zu einer um 2 verminderten Substanzklasse führt, liegt im Projektdatensatz - ausgehend von den Ursprungsklassen 5, 4, 3 und 2 - bei 9 %, 9 %, 6 % und 4 %. Die Wahrscheinlichkeit einer Verschlechterung bei der Zustandsklassifizierung ist mit 100 %, 67 %, 91 % und 82 % deutlich größer. Eine Verwendung von ISYBAU-Durchschnittswerten ist deshalb bei der Zustandsklassifizierung kritischer zu sehen als bei der Substanzklassifizierung, obwohl auch hier ein gewisses Unterschätzungsrisiko vorhanden ist.

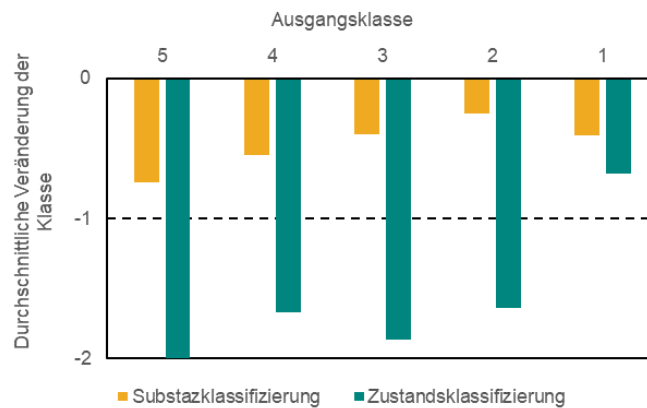


Bild 65: Veränderung der Substanz- bzw. Zustandsklasse bei Verwendung eines um 2 Klassen schwereren Einzelschadens anstelle eines durchschnittlichen ISYBAU-Werts

Auch für alle weiteren Fehler wurde die Wahrscheinlichkeit berechnet, mit der eine Haltung durch den jeweiligen Fehler in eine andere Klasse eingeordnet wird (siehe Tabelle 41). Analog zu den Perzentilen der Substanzabweichung gibt dieser Wert Auskunft über die Auswirkung eines Fehlers auf Objektebene. Es wurde nicht unterschieden zwischen einer Verbesserung oder Verschlechterung der Substanzbewertung. Aufschluss über die Richtung der Veränderung auf Netzebene gibt der Median der abweichenden Substanz. Außerdem ist der Anteil der Haltungen im Projektdatensatz angegeben, auf denen eine Modifikation bezüglich des Fehlers stattgefunden hat. Insbesondere bei nachgeschalteten Fehlern wie der ISYBAU-Bewertung oder bei identifizierbaren Fehlern wie dem Kodieren einer falschen Schadensart (z. B. BAI-Schäden), ermöglicht diese Zahl eine gute Einschätzung des Fehlerpotentials im Datensatz. In Tabelle 41 sind alle wichtigen Kennwerte zusammengefasst und nach ihrem Einfluss auf die Substanzklassifizierung sortiert. Der schwerwiegendste Fehler für die Substanzklassifizierung ist das Übersehen von Streckenschäden der Einzelschadensklasse 3. Hier würde eine korrekte Kodierung in 52 % der Fälle zu einer anderen Klassifizierung der Haltung führen. ZK3-Streckenschäden traten im Projektdatensatz auf jeder fünften Haltung auf. Auf die Zustandsklassifizierung hat dieser Fehler hingegen nur eine geringe Auswirkung.

Eine Fehlkodierung der Schadensart hat erwartungsgemäß keinen Einfluss auf die Objektzustandsklasse, kann jedoch zu einer falsch abgeleiteten Substanzklasse führen. Hingegen reagiert die Zustandsklassifizierung besonders sensitiv auf Fehler bezüglich prioritärer Schäden.

Tabelle 41: Auswirkung von Fehlern auf Substanzklassifizierung, Zustandsklassifizierung und ermittelte Substanz

Fehler	Modifizierte Haltungen im Projektdatensatz	Häufigkeit des Fehlers	Wahrscheinlichkeit, dass der Fehler zu einer anderen Substanzklasse führt	Wahrscheinlichkeit, dass der Fehler zu einer anderen Zustandsklasse führt	Durchschnittliche Abweichende Substanz durch den Fehler (Median)
ZK3-StrS übersehen	20.3%	Ab und Zu	52%	11%	12.7
Rohrbruch	15.1%	Nicht Abschätzbar	44%	54%	-5.3
ZK0-StrS übersehen	1.0%	Selten	43%	61%	5.9
ISYBAU - 2	45.2%	Häufig	42%	72%	4.2
ZK0-PktS übersehen	4.2%	Selten	42%	78%	5.3
ZK1-StrS übersehen	3.7%	Selten	41%	24%	4.8
ZK1-PktS übersehen	28.3%	Selten	38%	44%	4.3
ZK2-StrS übersehen	11.1%	Selten	37%	11%	2.2
BAJ C StrS	3.1%	Selten	28%	0%	0.2
Reparatur/Sanierung	0.7%	Selten	27%	43%	1.4
Verformungen	0.0%	Ab und Zu	26%	30%	1.7
ZK4-StrS übersehen	16.6%	Ab und Zu	16%	11%	0.5
BAI StrS	4.5%	Selten	15%	0%	0.4
BAJ B StrS	0.4%	Selten	14%	0%	0.2
Boden Sichtbar	2.4%	Selten	14%	11%	0
ZK2-PktS übersehen	59.3%	Ab und Zu	13%	23%	1.3
ZK3-PktS übersehen	57.8%	Häufig	10%	16%	0.9
BBF StrS	2.7%	Selten	10%	0%	0.5
ISYBAU - 1	45.2%	Häufig	8%	19%	0.4
Objektlänge	100.0%		4%	0%	0.2
ZK4-PktS übersehen	47.0%	Häufig	3%	8%	0.3
ISYBAU +2	45.2%	Selten	1%	2%	0
ISYBAU +1	45.2%	Selten	0%	2%	0

Fazit

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass Fehler im Inspektionsprotokoll, die bisher im Sinne der Zustandsbewertung vernachlässigbar waren, für die Substanzklassifizierung von größerer Bedeutung sein können und umgekehrt. Für die Substanzklassifizierung müssen dementsprechend im Rahmen der Plausibilisierung von Ausgangsdaten andere Schwerpunkte gesetzt werden. Die durchschnittliche Auswirkung eines Fehlers liegt bei den meisten aller hier betrachteten Fehler bei einer Abweichung von weniger als 5 % auf einer Haltung. Die Verwendung eines ISYBAU-Werts für Schäden, die einer Einzelfallbetrachtung bedürfen, birgt aufgrund des häufigen Vorkommens das größte Risiko einer Fehleinschätzung der Substanz.

9 Sanierungsempfehlung und -kosten für Abwasserkanäle

9.1 Einführung

Um die nach dem *SubKanS*-Ansatz ermittelte Abnutzung bzw. Substanz (= 100 % - Abnutzung [%]) einschätzen zu können, bedarf es einer praxisnahen Interpretation. Dazu wird im Folgenden der Zusammenhang zwischen Substanz einer Kanalhaltung und der daraus ableitbaren Sanierungsempfehlung sowie damit verbundenen Aufwendungen betrachtet. Für diese Untersuchungen wurde die Experteneinschätzung der fünf beteiligten Modellanbieter auf Basis ihrer langjährigen Erfahrungen und praxiserprobten Entscheidungsmodelle auf den in *SubKanS* aufgebauten Datensatz angewandt und in Relation zur ermittelten Abnutzung gesetzt.

Abnutzung und Sanierungsempfehlung korrespondieren zwar, allerdings kann aus der Abnutzung nicht unmittelbar eine Sanierungsempfehlung und umgekehrt aus der Sanierungsempfehlung nicht unmittelbar eine Abnutzung abgeleitet werden. Neben ökonomischen Aspekten, (Rest)nutzungsdauern, Abschreibungszeiträumen, „Reparaturbereitschaft“ des Betreibers, akzeptierter Restabnutzung nach Sanierung (Reparatur) und vielen anderen Aspekten (vgl. auch Bild 30, S. 111) liegt der Grund im Wesentlichen auch darin, dass mit einer Sanierungsmaßnahme mehrere unabhängige Schäden saniert werden können. Lage und Ausprägung der Schäden sind somit wesentlich für die Festlegung eines technisch und wirtschaftlich sinnvollen Sanierungsverfahrens.

9.2 Datengrundlage und Vorgehensweise

Als Datengrundlage für die Auswertung diente der gesamte Projektdatensatz mit den in Kapitel 6.4 beschriebenen 100.532 Haltungen. Dieser Datensatz wurde durch die fünf an *SubKanS* beteiligten Modellanbieter (Stein Infrastructure Management GmbH, Fischer Teamplan Ingenieurbüro GmbH, Ingenieurbüro Dr. Klaus Hochstrate, SiwaPlan Ingenieurgesellschaft mbH sowie Dr.-Ing. Pecher und Partner Ingenieurgesellschaft mbH) in Hinblick auf eine haltungsbezogene Sanierungsempfehlung ausgewertet. Als mögliche Sanierungsoptionen wurden die Kategorien Monitoring (MON), Reparatur (REP), Renovierung (REN) und Erneuerung (ERN) vorgegeben (vgl. Bild 66). Damit für diese auszuweisenden Sanierungsempfehlungen eine interpretationsfähige Vergleichsbasis geschaffen wird, wurden im Vorfeld folgende zu untersuchende Sanierungsszenarien festgelegt:

- Berücksichtigung der Schäden in der Zustandsklasse ZK 0,
- Berücksichtigung der Schäden in den Zustandsklassen ZK 0-1,
- Berücksichtigung der Schäden in den Zustandsklassen ZK 0-2,
- Berücksichtigung der Schäden in den Zustandsklassen ZK 0-3
- Berücksichtigung der Schäden in den Zustandsklassen ZK 0-4 sowie
- eine frei wählbare **Vorzugsvariante** des jeweiligen Modellanbieters.

Für die Analyse wurden die Modelle der fünf in *SubKanS* vertretenen Anbieter eingesetzt, die durch unterschiedliche Modellansätze verschiedene Ergebnisse lieferten (vgl. Kap. 3.2.2.1 - 3.2.2.5). Zur Harmonisierung der Grundlagendaten wurden im Vorfeld die durch die Modelle zu verwendenden Richtpreise für verschiedene Sanierungsarten (siehe Anlage 7) in Anlehnung an die KVR-Leitlinie (LAWA et al., 2012) abgestimmt.

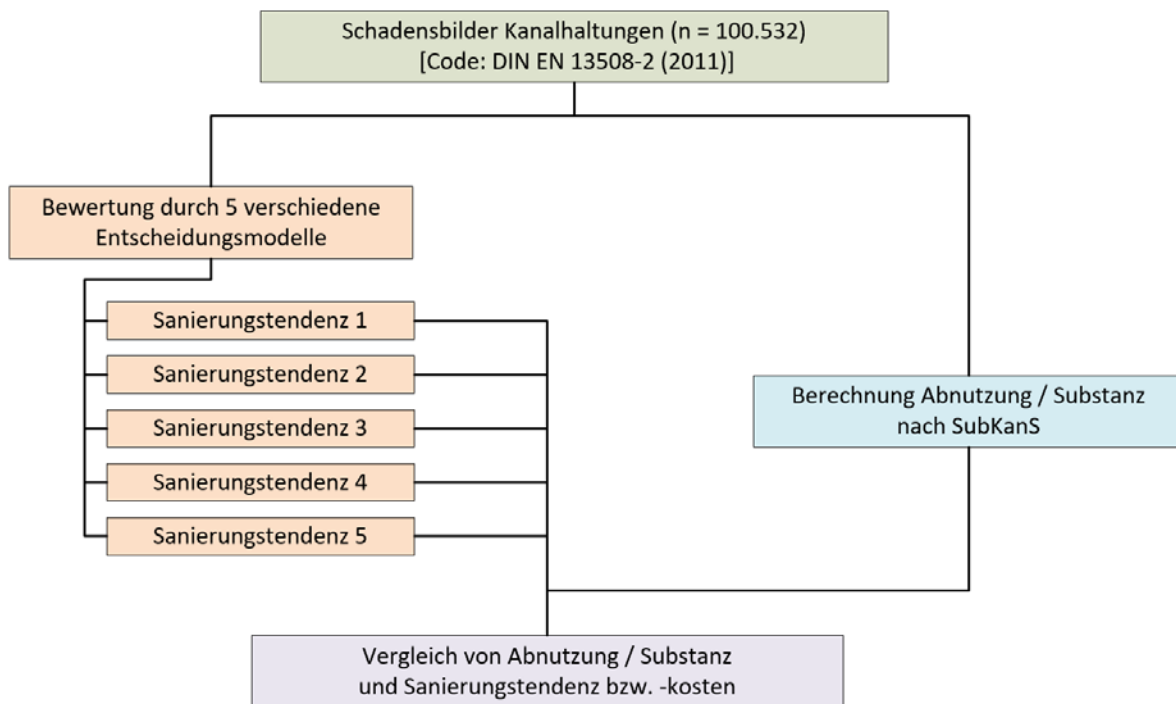


Bild 66: Verfahrensschema zur Ableitung von Sanierungstendenzen und -kosten

9.3 Sanierungstendenz

Für alle Haltungen lag neben der Sanierungsempfehlung durch die fünf Modellanbieter die Abnutzung ABN [%] auf Basis des *SubKanS*-Ansatzes vor. Auf Grundlage dieser Daten wurde analysiert, ob ein Zusammenhang zwischen Substanzbeurteilung und Handlungsoption abgeleitet werden kann. Dieser Zusammenhang spielt nachfolgend auch eine wesentliche Rolle bei der Definition der Substanzklassen, die sich ggf. als verschiedene Handlungsoptionen darstellen lassen. Die Empfehlung zugunsten Monitoring oder Sanierung (umfasst Reparatur, Renovierung und Erneuerung) wird im Wesentlichen aus der Priorität, also der Zustandsklassifizierung nach DWA-M 149-3 (DWA, 2015a), abgeleitet. Haltungen mit nachrangigen Schäden werden, trotz rechnerisch vorhandener relevanter Abnutzung, praxisorientiert häufig dem Bereich Monitoring zugeordnet. Die Restsubstanz oder Abnutzung wird dabei offensichtlich kaum betrachtet. Da die Option „Monitoring“ durch die Modellanbieter offenbar substanzunabhängig gewählt wurde, bleibt diese Option in den folgenden Darstellungen unberück-

sichtigt. Die verwendeten Entscheidungsmodelle der Modellanbieter zeigten eine Bandbreite an Empfehlungen, die in Bild 67 exemplarisch in Abhängigkeit der Substanz nach *SubKanS*-Ansatz dargestellt ist.

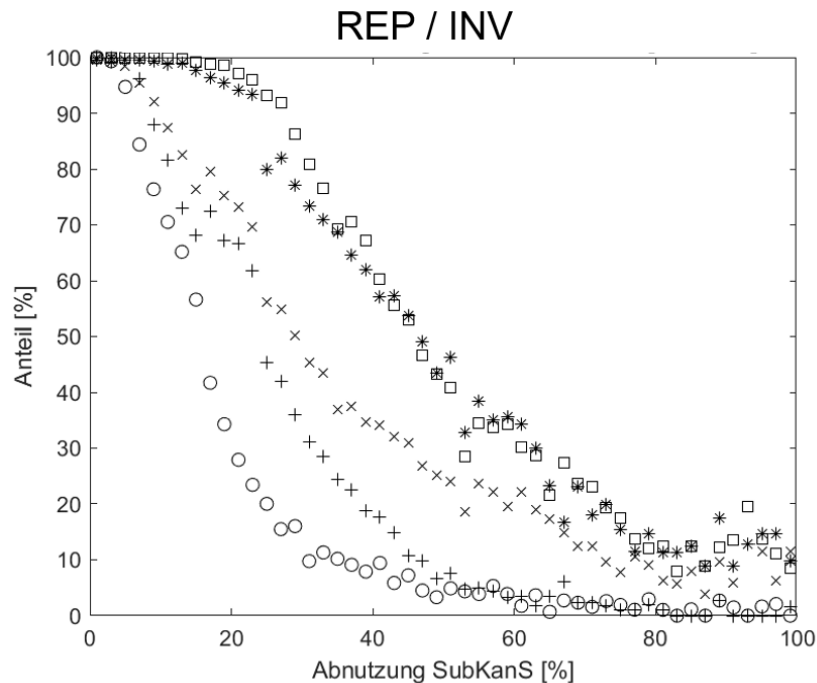


Bild 67: Sanierungsempfehlungen der Modellanbieter (anonymisiert)

In Bild 67 werden die Sanierungsempfehlungen „Renovierung“ (REN) und „Erneuerung“ (ERN) als „investive Verfahren“ (INV) zusammengefasst. Die Grafik zeigt somit zunächst, dass Haltungen mit geringer Abnutzung überwiegend repariert werden. Mit steigender Abnutzung nimmt der Anteil investiv sanierter Haltungen stetig zu. Dieser Zusammenhang lässt sich bei allen fünf Modellanbietern erkennen. Darüber hinaus zeigte sich jedoch, dass der Bereich der Abnutzung, in dem überwiegend investiv saniert wird, durch die Modellanbieter sehr unterschiedlich angegeben wurde. Aus den Ergebnissen wurde daher nachfolgend eine Sanierungstendenz abgeleitet, die sich aus den beobachteten Anteilen bzw. Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Sanierungshauptverfahren (REP, REN und ERN) ergibt.

In der weiteren Auswertung wird Bezug auf das Szenario „Vorzugsvariante“ genommen, da diesem die höchste Praxisrelevanz zugebilligt wird. Dabei muss darauf hingewiesen werden, dass durch die Sanierungstendenz „Reparatur“ nicht zwingend alle Schäden behoben werden, sondern nachrangige Schäden - im Gegensatz zur Option „Investive Sanierung“ - möglicherweise nach Einschätzung der Modellanbieter auf der Haltung verbleiben. Zugeordnet zur Abnutzung ergibt sich für den Projektdatensatz in der Aufsummierung aller Anbieter die in Bild 68 dargestellte Verteilung.

Eine Reparierbarkeit trotz hoher Abnutzung ist plausibel, da sich die wiederherzustellende Abnutzung durch eine Kombination prioritärer Schäden und/oder nachrangiger Schäden ergibt. Prioritäre Schäden erhalten im *SubKanS*-Ansatz über das Klassengewicht KG eine höhere Gewichtung und tragen deshalb bei gleicher Schadenslänge mehr zur Abnutzung bei als nachrangige Schäden. Besteht ein Schadensbild im Wesentlichen aus prioritären Schäden, kann eine hohe Abnutzung auch auf vergleichsweise kurzen Haltungsabschnitten entstehen, die dennoch mittels Reparatur sanierbar sind. Setzt sich ein Schadensbild dagegen auch aus nachrangigen Schäden zusammen, so ist die Reparierbarkeit bei gleicher Abnutzung unwahrscheinlicher, da nachrangige Schäden eine größere Schadenslänge als prioritäre Schäden benötigen, um die gleiche Abnutzung zu erzeugen. Insofern kann ohne exakte Betrachtung der Einzelhaltung und der Schadensverteilung keine exakte Sanierungsvariante abgeleitet werden, sondern lediglich eine Wahrscheinlichkeit bzw. eine Sanierungstendenz, die aus der repräsentativen Schadensverteilung des Datensatzes (vgl. Kap. 6.4.1) abgeleitet wurde.

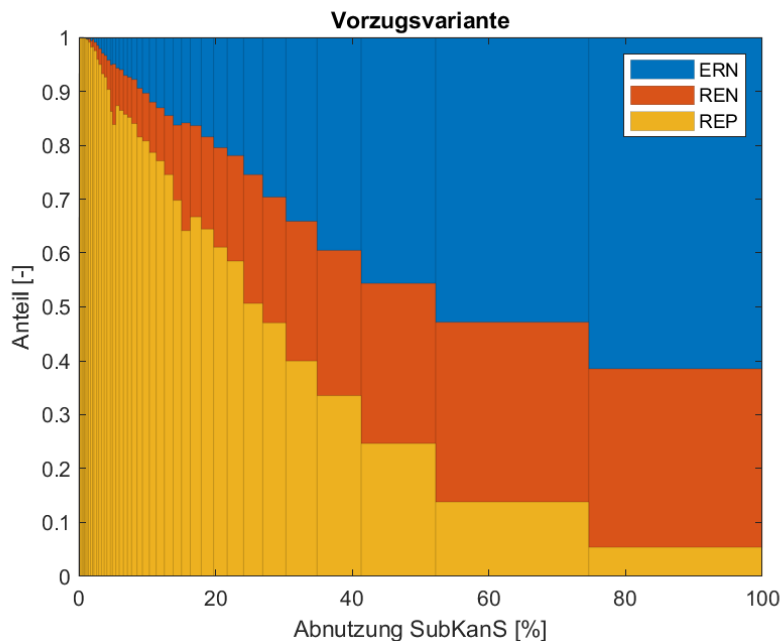


Bild 68: Aufsummierung aller Sanierungsempfehlungen für das Szenario „Vorzugsvariante“

In Bild 68 ist erkennbar, dass im Projektdatensatz offensichtlich ein Zusammenhang zwischen Abnutzung und der gewählten Sanierungsvariante besteht: Bei steigender Abnutzung nehmen die Anteile der investiven Sanierung (Renovierung bzw. Erneuerung) deutlich zu. Ebenso ist erkenn- und nachvollziehbar, dass mit zunehmender Berücksichtigung der Schäden mit besseren Schadensklassen der Anteil der punktuellen Reparaturmaßnahmen sinkt und der Anteil der die Gesamthaltung betreffenden investiven Maßnahmen (Renovierung + Erneuerung) steigt. Aus der Grafik lässt sich zudem ablesen, dass beispielsweise bei einer Abnutzung von 10 % eine Wahrscheinlichkeit von 80 % für Reparatur und 20 % für investive Sanierung besteht. Steigt die Abnutzung auf 30 %, verschiebt sich der zugeordnete Wahrscheinlichkeitsvektor auf $REP/INV = [0,4; 0,6]$. Bei hohen Abnutzungen

von über 80 % beträgt die Wahrscheinlichkeit für eine Reparatur nur noch ca. 5 %, während sie für investive Maßnahmen auf etwa 95 % ansteigt.

Zur weiteren Auswertung wurden die empirischen Daten mit einer nichtlinearen Regressionsformel nachgebildet. Dabei wurde eine fünfparametrische Funktion des folgenden Typs verwendet und kalibriert (Gleichung 16):

$$y(x) = e^{-(a \cdot x)^b} - h \cdot e^{-(f \cdot x)^g} + h \quad \text{Gleichung 16}$$

mit: a, b, f, g, h: freie Parameter

Damit ergibt sich die folgende Darstellung der Regressionsfunktionen, die im Folgenden weiterverwendet werden.

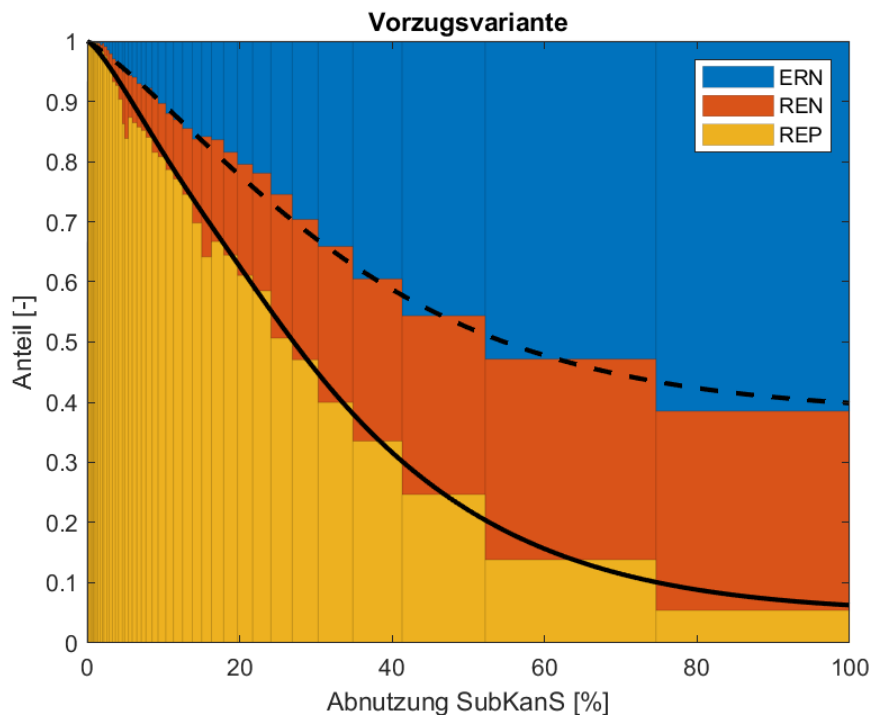


Bild 69: Sanierungsempfehlungen für das Szenario „Vorzugsvariante“ mit Regressionskurven

Die Unterscheidung zwischen Renovierung und Erneuerung ist bei den Sanierungsempfehlungen sehr breit streuend. Dies hängt damit zusammen, dass diese Entscheidung häufig durch andere Faktoren wie Hydraulik, Anzahl der Anschlüsse oder Umgebungsbedingungen getrieben und nicht unmittelbar mit der baulichen Substanz verknüpft ist. Von einer detaillierten Auswertung der Diagramme diesbezüglich wird daher abgeraten, auch wenn die beiden Bestandteile investiver Sanierung in den Diagrammen durch die Linie der Regressionsfunktion jeweils separat ausgewiesen sind.

9.4 Sanierungsszenarien

Die zuvor abgeleitete Beziehung zwischen Sanierungstendenz und Abnutzung bzw. Substanz wurde im Folgenden genutzt, um auf vereinfachte Art und Weise verschiedene Sanierungsszenarien auf den Projektdatensatz *SubKanS* abzubilden. Mit Hilfe der Sanierungsszenarien wurde somit ein Überblick für einen realen Kanaldatensatz gewonnen, der zeigt, welche Größenordnungen an Sanierungshauptverfahren zu erwarten sind, wenn den Sanierungsszenarien einfache Entscheidungskriterien zu Grunde gelegt werden. Diese Auswertungen dienen strategischen Betrachtungen und überschlägigen Analysen von Netzen und Netzteilen, nicht aber der operativen Sanierungsplanung.

Es wurden zwei exemplarische Sanierungsszenarien betrachtet:

- Sanierungsszenario 1: „ZK 0-1“
Im Sanierungsszenario „ZK 0-1“ wurden ausschließlich Haltungen für eine Sanierung ausgewählt, die als schwersten Einzelschaden einen Schaden der Zustandsklasse ZK 0 oder ZK 1 aufwiesen. Haltungen ohne ZK 0- oder ZK 1-Schäden wurden dem „Monitoring“ zugeordnet. Eine Unterscheidung zwischen „Reparatur“ und „investive Verfahren“ erfolgte auf Grundlage der zuvor abgeleiteten Beziehung zwischen Sanierungstendenz und Abnutzung. Lag bspw. bei einer Haltung mindestens ein ZK 0- oder ZK 1-Schaden und eine Abnutzung von 30 % vor, so wurde diese Haltung anteilig zu 45 % einer Reparatur und zu 55 % einem investivem Verfahren zugeordnet (siehe Bild 68).
- Sanierungsszenario 2: „ZK 0-1 und ausreichende Mindestsubstanz“
Dieses Sanierungsszenario wurde analog zum vorherigen Sanierungsszenario ausgewählt. Ergänzend kam für dieses Sanierungsszenario hinzu, dass neben Haltungen mit ZK 0- bzw. ZK 1-Schäden auch Haltungen für eine Sanierung ausgewählt wurden, die eine Abnutzung $ABN > 33 \%$ aufwiesen. Zwischen „Reparatur“ und „investive Verfahren“ wurde wiederum auf der Grundlage der zuvor abgeleiteten Beziehung zwischen Sanierungstendenz und Abnutzung entschieden.

Die genannten Sanierungsszenarien wurden auf den Projektdatensatz angewendet. Als Ergebnis wurde die Anzahl an Haltungen in Abhängigkeit der Abnutzung ermittelt, die keiner unmittelbaren Sanierung bedurften (Monitoring), bzw. einer Reparatur oder einem investiven Sanierungsverfahren zugeordnet wurden. Die Ergebnisse sind in Bild 70 dargestellt. Auf diesem Weg kann unter bestimmten strategischen Annahmen über die Abnutzung eine Sanierungslast für Netze oder Teilnetze ermittelt werden, welche als Grundlage einer Sanierungsstrategie dienen kann.

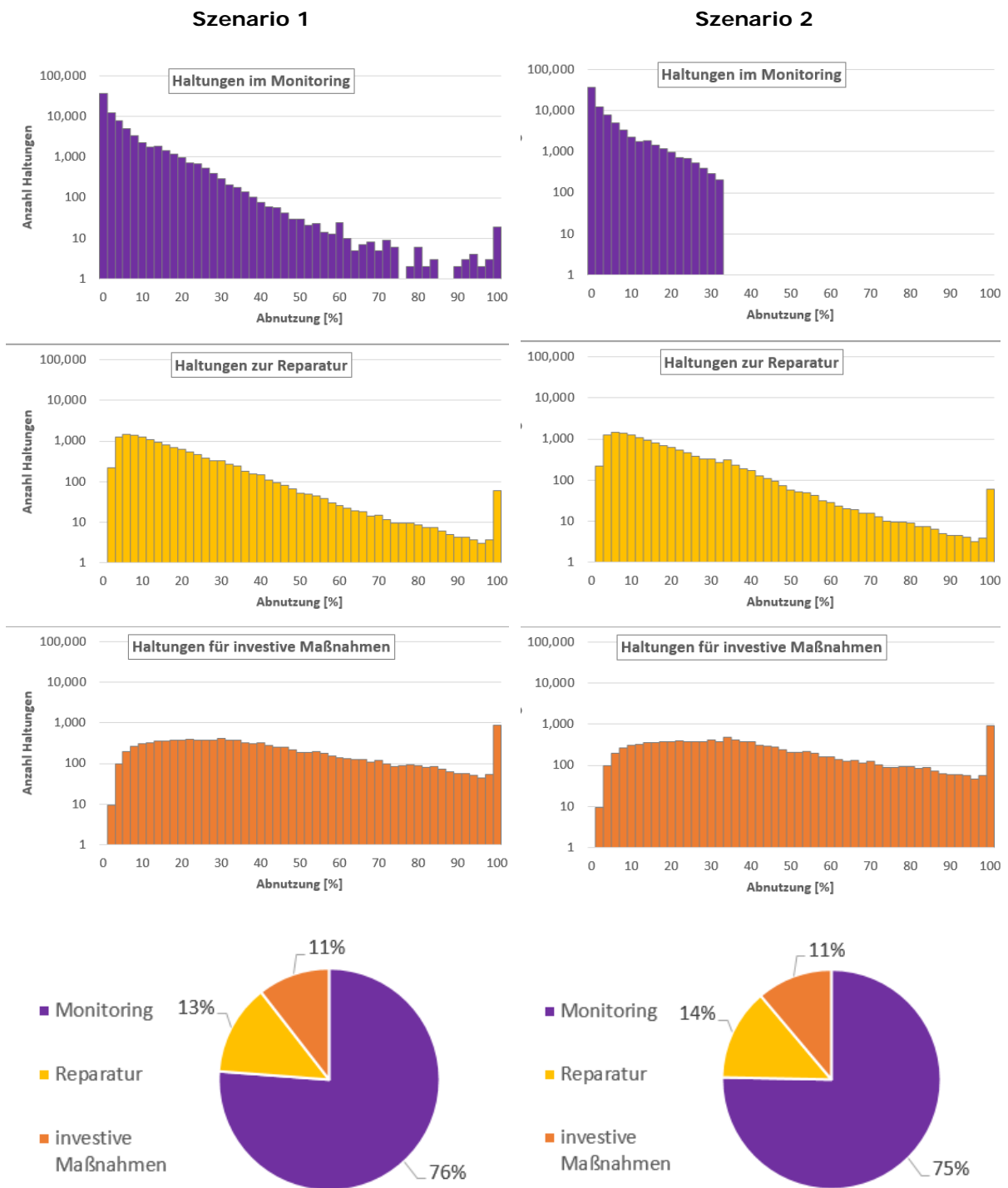


Bild 70: Ergebnisse der beiden Sanierungsszenarien

In Bild 70 wurden die Haltungen entsprechend ihrer Abnutzung in Klassen mit einer Breite von jeweils 2 % (0 % bis < 2 %, 2 % bis < 4 %, ... usw.) eingeteilt. Anschließend wurden die absoluten Häufigkeiten pro Klasse ermittelt und auf einer logarithmischen Skala aufgetragen.

Es zeigt sich, dass die Anzahl der Haltungen im Monitoring bei sehr geringen Abnutzungen ($< 5\%$) rd. 10.000 Haltungen pro Klasse in beiden Szenarien betrug. Mit zunehmender Abnutzung nahm die Anzahl der Haltungen im Monitoring in beiden Szenarien stetig ab. In Abhängigkeit davon, ob die Abnutzung als Auslöser für eine Sanierung zu Grunde gelegt wurde, fielen mehr oder weniger Haltungen in das Monitoring. Unabhängig vom gewählten Sanierungsszenario lag das Maximum an Reparaturen pro Klasse im Bereich geringer Abnutzungen ($< \text{rd. } 15\%$) und stellte im Verhältnis zu den Haltungen im „Monitoring“ den deutlich geringeren Anteil dar. So betrug die maximale Anzahl an Reparaturen pro Klasse etwa 1.000. Investive Verfahren wurden im Maximum mit etwa 200 bis 400 Haltungen pro Klasse zugeordnet.

Die prozentualen Anteile der Sanierungshauptverfahren für beide Sanierungsszenarien insgesamt (Bild 70, unten) zeigen, dass der Anteil an Haltungen mit Abnutzungen $\text{ABN} > 33\%$ bezogen auf den Projektdatensatz vergleichsweise gering war. So unterschieden sich beide Szenarien bzgl. des Anteils der Haltungen im Monitoring lediglich um einen Prozentpunkt.

Anhand dieser exemplarisch gewählten Beispiele zeigt sich, welche Möglichkeiten bestehen, den ermittelten Zusammenhang von Abnutzung und Sanierungstendenz auf reale Kanalnetze anzuwenden, um die Auswirkungen verschiedener Sanierungsszenarien überschläglich zu ermitteln. Die in diesen Szenarien identifizierten Haltungen mit Sanierungsbedarf würden in einem nächsten Schritt einer ingenieurmäßigen Betrachtung unterzogen werden. Daher sind die 24 % bzw. 25 % an Haltungen, denen eine Reparatur bzw. investive Maßnahme zugeordnet wurde, als grobe Orientierung für ein mögliches vorhandenes Sanierungspotenzial zu verstehen, das ausschließlich auf dem zuvor festgelegten Sanierungsszenario sowie dem Zusammenhang nach Bild 69 basiert.

9.5 Ableitung von Sanierungskosten

Um den Zusammenhang zwischen Abnutzung (bzw. Substanz) und Sanierungskosten betrachten zu können, wurden neben den Sanierungsempfehlungen auch die entsprechenden Sanierungskosten bei den Modellanbietern abgefragt. Grundlage der Abfrage zu den Sanierungskosten waren im *SubKanS*-Konsortium zuvor abgestimmte Nettoeinheitspreise (reine Baukosten), die u. a. auf Richtpreisen für verschiedene Innensanierungsverfahren und für Erneuerungen sowie Teilerneuerungsfaktoren basierten.

Bei der anschließenden Auswertung wurden die Haltungen in 2 % breite Klassen nach ihrer Abnutzung eingeteilt und pro Klasse ein mittlerer Kostenwert in €/m Haltungslänge für jeden Modellanbieter ermittelt. Erwartungsgemäß zeigten sich dabei große Streubreiten in den Ergebnissen. In zahlreichen Klassen lagen Standardabweichungen in der Größenordnung des Mittelwerts vor. Die Mittelwerte je Klasse sind für jeden Modellanbieter getrennt für die Sanierungshauptverfahren Reparatur, Renovierung und Erneuerung in den nachfolgenden drei Abbildungen (Bild 71 - Bild 73) dargestellt.

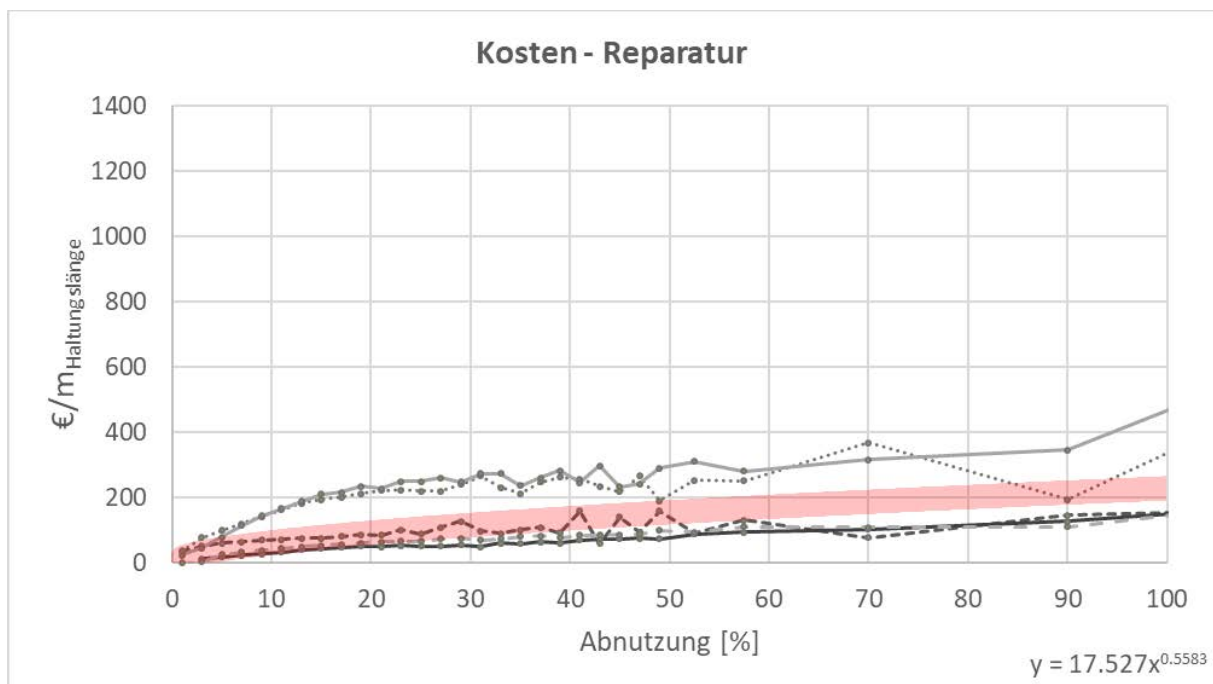


Bild 71: Kosten für Reparaturen

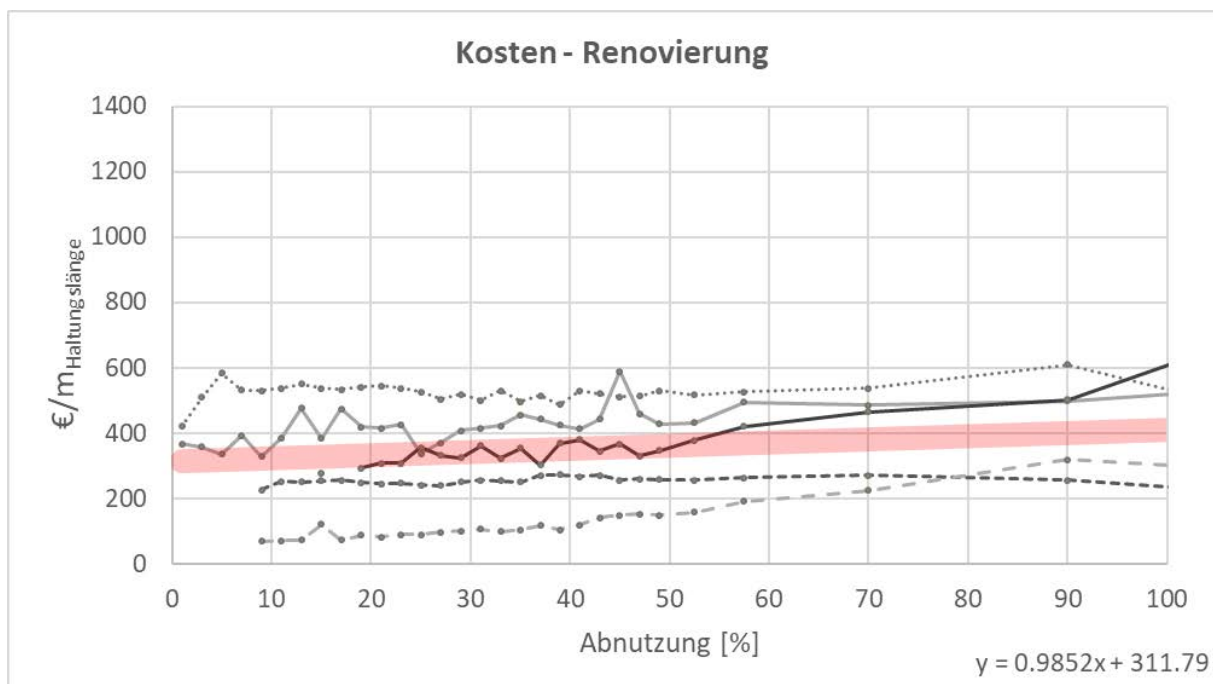


Bild 72: Kosten für Renovierungen

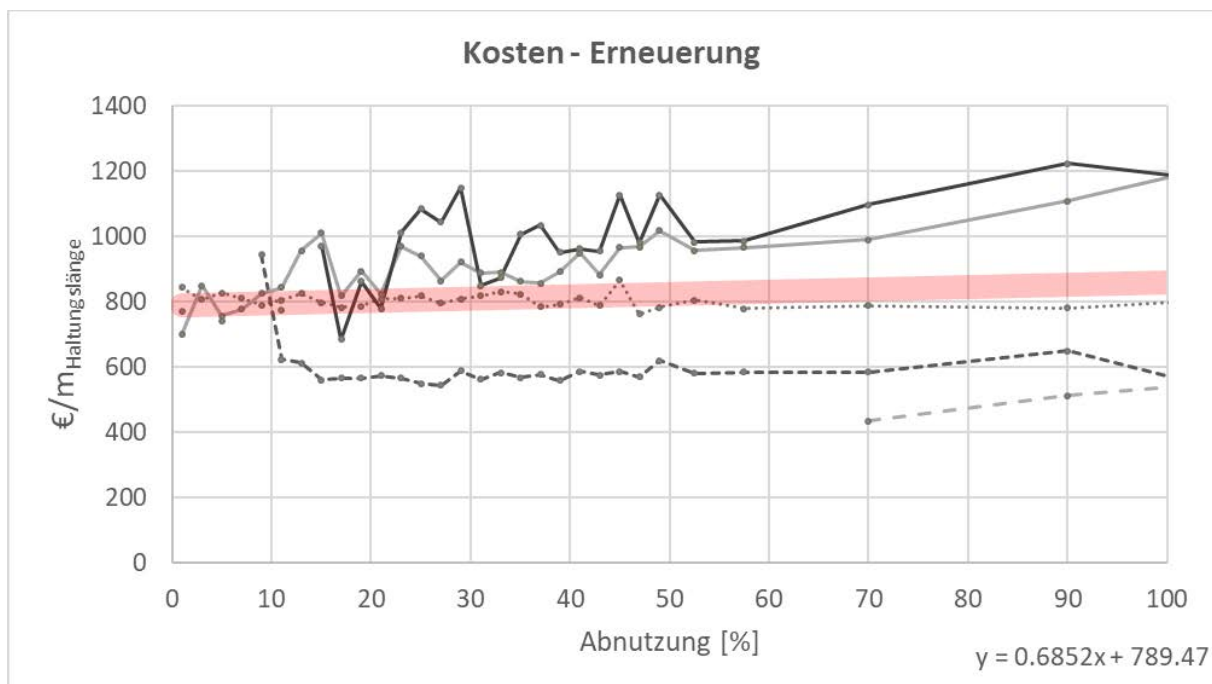


Bild 73: Kosten für Erneuerungen

Zu erkennen ist, dass die Klassenmittelwerte der Sanierungskosten auch von Modellanbieter zu Modellanbieter stark variierten. Zwischen dem Modellanbieter mit dem niedrigsten Preis und demjenigen mit dem höchsten Preis liegt häufig ein Faktor zwischen zwei und drei, unabhängig davon, welches Sanierungshauptverfahren betrachtet wird. Für die Reparatur zeigt sich zudem eine steigende Tendenz der Sanierungskosten mit zunehmender Abnutzung, die bei der Renovierung und der Erneuerung weniger stark ausgeprägt bzw. kaum vorhanden ist.

Über die Wahrscheinlichkeiten der Sanierungshauptverfahren in Abhängigkeit der Substanz/Abnutzung können damit grobe Kostenschätzungen durchgeführt werden. Dies kann bspw. durch Multiplikation eines Wahrscheinlichkeitsvektors durchgeführt werden, der aus Bild 69 abgelesen werden kann, und der die drei Wahrscheinlichkeiten der Sanierungshauptverfahren wiedergibt [p_{REP} , p_{REN} , p_{ERN}]. Wird der Wahrscheinlichkeitsvektor [p_{REP} , p_{REN} , p_{ERN}] anschließend mit bspw. den in Bild 71, Bild 72 und Bild 73 dargestellten durchschnittlichen Sanierungskosten multipliziert, ergibt sich eine wahrscheinlichkeitsgewichtete Sanierungslast.

Beispielhaft sei eine Haltung angenommen, die eine Abnutzung von 50 % aufweist. Bei einer Abnutzung bzw. Substanz von 50 % ergibt sich ein Wahrscheinlichkeitsvektor [p_{REP} , p_{REN} , p_{ERN}] = [0,21; 0,31; 0,48], wie Bild 74 zeigt.

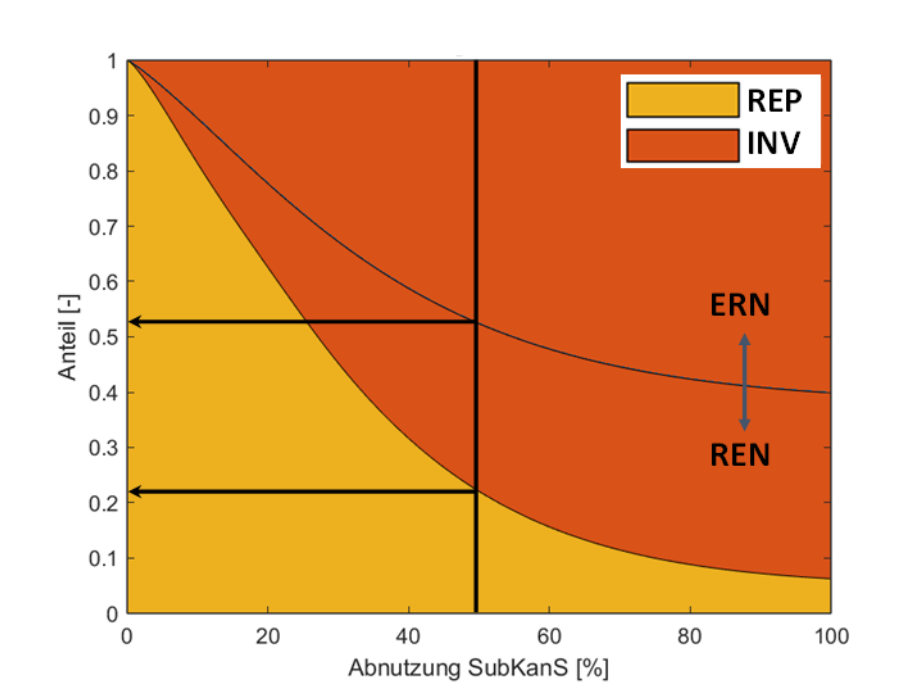


Bild 74: Wahrscheinlichkeitsvektor für [REP; REN; ERN] für eine Abnutzung von 50 %

Wird der Wahrscheinlichkeitsvektor [0,21; 0,31; 0,48] mit durchschnittlichen Kostenannahmen (beispielsweise REP = 200 €/m, REN = 400 €/m und ERN = 1.000 €/m) multipliziert, ergibt sich ein wahrscheinlichkeitsgewichteter Durchschnittspreis von $(0,21 \cdot 200 + 0,31 \cdot 350 + 0,48 \cdot 850) = 558,5$ €/m für dieses Element. Bei einer Haltungslänge von 50 m beträgt der wahrscheinlichkeitsgewichtete Durchschnittspreis 27.925,- €. Der wahrscheinlichkeitsgewichtete Durchschnittspreis dient dem Zweck, ohne eine vorherige Sanierungsempfehlung bzw. -tendenz allein auf Grundlage der Abnutzung eine überschlägliche Kostenschätzung vorzunehmen. Dies kann für einzelne Haltungen oder ganze Netze bzw. Netzteile erfolgen.

9.6 Verfahrensableitung bei teilweiser Sanierung

Eine weitere Auswertemöglichkeit besteht darin, Rückschlüsse auf teilweise Sanierungen zu ziehen, bei denen nicht zwingend die gesamte Substanz wiederhergestellt werden muss. Damit lässt sich über die Substanz auch ein teilweiser Sanierungserfolg beschreiben, wenn eine Haltung nicht bis zum schadensfreien Zustand wiederhergestellt wird. Dies ist für die Praxis relevant, da nicht nach jeder Sanierungsmaßnahme alle Schäden behoben sind. Das Vorgehen soll an einer fiktiven Haltung beispielhaft demonstriert werden.

Gegeben sei eine Haltung, welche mehrere Risse aufweist sowie eine Korrosion auf gesamter Länge. Insgesamt ergibt sich nach dem *SubKanS*-Ansatz eine angenommene Abnutzung von 60 %, die zu 20 % aus den Rissen und 40 % aus der Korrosion herrührt. Das nachfolgende Bild 75 zeigt ein entsprechendes Ablesebeispiel.

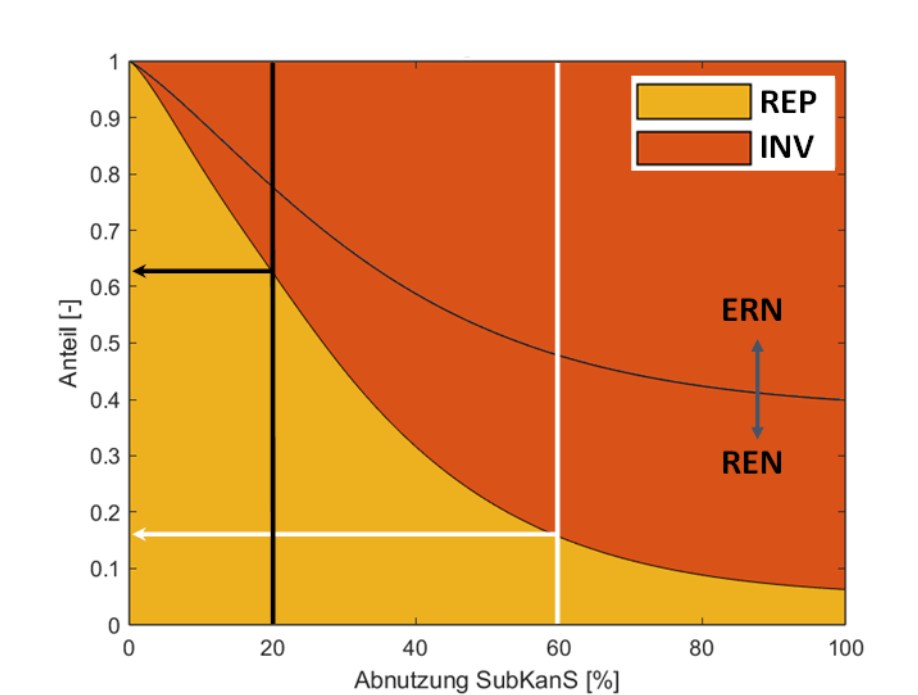


Bild 75: Ableitung von teilweiser Substanzverbesserung (exemplarische Darstellung)

Sollen im ersten Fall nur die 20 % der über die Risse verursachten Abnutzung behoben werden, da die Korrosion als nachrangig und damit zunächst hinnehmbar eingestuft wird, lässt sich überschlägig ein Wertepaar von ca. 62 % für Reparatur und 38 % für investive Sanierung ablesen (schwarze Linie, bei 20 % Abnutzung). Strebt man hingegen im zweiten Fall die vollständige Behebung der Abnutzung an (weiße Linie, bei 60 % Abnutzung), so ergeben sich Wahrscheinlichkeiten von ca. 17 % für Reparatur und 83 % für investive Erneuerung. Im ersten Fall wäre also eine Reparatur abzuleiten, im zweiten Fall eine investive Maßnahme.

Anzumerken ist, dass auch hier aufgrund der Streuung der Ergebnisse nur eine Tendenz abgelesen werden kann. Je enger die beiden Werte für Reparatur und investive Maßnahmen beieinanderliegen, umso stärker ist eine ingenieurmäßige Einzelbetrachtung der Haltung erforderlich. Für die operative Sanierungsplanung ist diese ohnehin unabdingbar.

9.7 Fazit

Durch die Verknüpfung der Substanz bzw. Abnutzung nach *SubKanS*-Ansatz mit empirischen Sanierungsempfehlungen konnten anhand des repräsentativen Projektdatensatzes Szenarien ausgewertet und daraus Sanierungstendenzen sowie grobe Kostenansätze abgeleitet werden. Zwar kann der Wert der Abnutzung keine ingenieurmäßige Betrachtung eines Sanierungsobjektes ersetzen. Als überschlägige Kenngröße analog zur Zustandsklasse nach DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) ist die Substanz allerdings ein wichtiger Faktor, der Netze für Betreiber vergleichbar macht und wichtigen Input für vertiefte Strategieanalysen gibt.

Die pragmatisch-empirische Herangehensweise in *SubKanS* lässt sicher noch Spielraum für weitere Modelloptimierungen, die sich aus den Erfahrungen der Netzbetreiber und Ingenieurbüros im Einsatz ergeben werden. Prioritäts- und Substanzbewertung sollten im strategischen Netzmanagement gleichberechtigt nebeneinanderstehen und zwei unterschiedliche Aspekte fokussieren: Dringlichkeit und Gesamtumfang der Schädigung eines Kanalnetzelementes.

10 Substanzklassifizierung von Abwasserkanälen

Anders als bei der Zustandsklassifizierung einer Haltung, deren Sanierungspriorität sich im Wesentlichen auf den Schaden mit der schwersten Einzelschadensklasse stützt, werden bei der Substanzklassifizierung alle Einzelschäden und die von ihnen hervorgerufenen Beiträge zur Funktionseinschränkung bzw. zum Funktionsverlust im Kontext der Haltung und ggf. bestehenden gegenseitigen Beeinflussungen und Abhängigkeiten betrachtet.

Maßgeblichen Einfluss auf den Substanzverlust hat das Zusammenspiel aller Einzelschäden innerhalb der Haltung. Entsprechend führt nur eine zusätzliche Bewertung entlang der gesamten Haltung unter Berücksichtigung des Zusammenhangs der Einzelschäden entlang der Haltungsachse zum Ziel.

Bei der Klassifizierung der Substanz einer Haltung dient die Bewertung des Einzelschadens somit als Zwischenschritt für die folgende Gesamtbewertung.

Einzelschäden unterschiedlicher Schadensart bei gleicher räumlicher Ausdehnung und Verteilung innerhalb einer Haltung führen zu einer gleichen Substanzbewertung, wenn die aus den Bewertungen nach Schutzzielen resultierenden Klassen identisch sind.

Der Gesamtprozess der Substanzklassifizierung einer Haltung ist in Anlage 8 exemplarisch dargestellt.

Tabelle 42 zeigt die in *SubKanS* entwickelten Substanzklassen mit einer entsprechenden verbalen Beschreibung. Der Wertebereich der Substanz wurde in Substanzklassen von 0 bis 5 unterteilt, um in Analogie zu DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) eine schnelle Zuordnung der bewerteten Haltungen zu ermöglichen.

Tabelle 42: Definition der Substanzklassen

Substanzklasse SBK	Beschreibung
5 (S ≥ 95 %)	Sehr gute bis vollständige Substanz/ Vernachlässigbare bis keine Abnutzung I. d. R. Monitoring (planmäßige Inspektion), keine Maßnahmen zur Substanzwiederherstellung erforderlich
4 (95 % > S > 85 %)	Gute Substanz/Geringe Abnutzung Kaum investive Maßnahmen zur vollständigen Substanzwiederherstellung erforderlich, hohe Wahrscheinlichkeit für Reparaturverfahren
3 (85 % > S > 67 %)	Ausreichende Substanz/Fortschreitende Abnutzung Überwiegend Reparaturverfahren mit steigendem investiven Anteil zur Substanzwiederherstellung
2 (67 % > S > 33 %)	Schlechte Substanz/Hohe Abnutzung Überwiegend investive Maßnahmen mit sinkendem Reparaturanteil zur Substanzwiederherstellung
1 (33 % > S > 5 %)	Sehr schlechte Substanz/Kritische Abnutzung Maßnahmen zur Substanzwiederherstellung werden zumeist investiv sein, Reparaturanteil sehr gering
0 (S ≤ 5 %)	Substanz vollständig aufgebraucht/Vollständige Abnutzung Maßnahmen zur Substanzwiederherstellung i. d. R. nur noch investiv möglich

Als Interpretationshilfe für die Substanz(klasse) soll die aus Bild 19 bekannte Beispielhaltung H0000082 dienen. Sie ist nach Tabelle 43 mit einer Zustandsklasse ZK 1 in die Substanzklasse SBK 2 an der Grenze zu SBK 3 einzuordnen und weist eine Substanz bzw. einen Abnutzungsvorrat von 66 % auf. Wird der klaffende Riss an Station 27,10 m repariert, verbessert sich die Substanz auf 71 % (ZK 2, SBK 3). Werden zudem sämtliche schadhafte Anschlüsse wiederhergestellt, ergibt sich eine Substanz von 80 % (ZK 3, SBK 3 mit Tendenz zu SBK 4). Die Reparaturen der Anschlüsse und bzw. oder des klaffenden Risses würden somit dazu führen, dass sich die Substanzklasse der Haltung von ursprünglich Substanzklasse SBK 2 auf SBK 3 nur leicht verbessert. Um die Substanz vollständig wiederherzustellen, wäre aufgrund des Oberflächenschadens mit sichtbaren Zuschlagsstoffen eine investive Sanierung erforderlich.

Tabelle 43: Ermittlung von Abnutzung und Substanzklasse für das in Bild 19 dargestellte Hal-
tungsbeispiel H0000082

Szenario	Zustandsklasse	Substanz	Substanzklasse	Bemerkung
H0000082	1	66 %	2 (3)	Ausgangs- szenario
Reparatur klaf- fender Riss	2	71 %	3	Nachrangige Ver- besserung von Zustand und Substanz
Reparatur klaf- fender Riss und aller schadhafte Anschlüsse	3	80 %	3 (4)	Zustand deutlich verbessert, nach- rangige Verbes- serung der Sub- stanz Kombination ZK und SBK deutet auf nicht repa- rables Schadens- bild hin
Haltung gem. Bild 3 ohne Oberflächenscha- den	1	81 %	3 (4)	Niedrige Zu- stands-klasse bei recht guter Sub- stanz deutet auf reparables Scha- densbild hin

Analysiert man den Projektdatensatz hinsichtlich der Häufigkeit der Substanzklassen, ergibt sich die in Bild 76 dargestellte Verteilung. Es zeigt sich, dass es nur relativ wenige Haltungen mit schlechter Substanz im Datensatz gibt. Im Projektdatensatz sind die Substanzklassen SBK 0-2 mit etwa 9 % vertreten. Dies bestätigt die Annahme, dass das Auftreten prioritärer Einzelschäden (im Datensatz bei etwa 50 %) häufig eben nicht dem tatsächlichen Netzzustand entspricht.

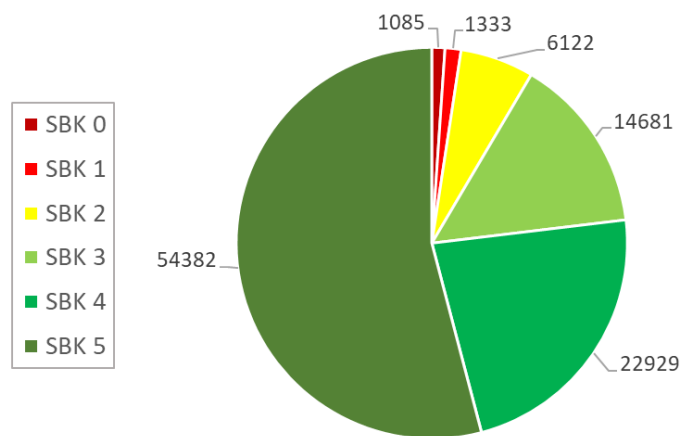


Bild 76: Verteilung der Substanzklassen nach *SubKanS* über die Anzahl der Haltungen im gesamten Projektdatensatz

Auf (Teil-)Netzebene können aus der Kombination von Zustands- und Substanzklasse gegenwärtige und mittelfristig erwartbare Risiken sowie erwartbare Sanierungslasten abgeleitet werden. In Bild 75 ist ein reales Teilnetz nach Zustands- und Substanzklasse eingefärbt. Etwa 48 % der Haltungen ist den Zustandsklassen ZK 0 - 2 (vgl. auch Bild 77) zuzuordnen. Aus der Gegenüberstellung von Zustand und Substanz (vgl. auch Tabelle 44) wird deutlich, dass Haltungen mit hoher Sanierungspriorität und guter Substanz existieren, die zwar dringend aber nur mit geringem Aufwand zu sanieren sind. Umgekehrt existieren Haltungen mit nachrangiger Sanierungspriorität, aber geringer Substanz.

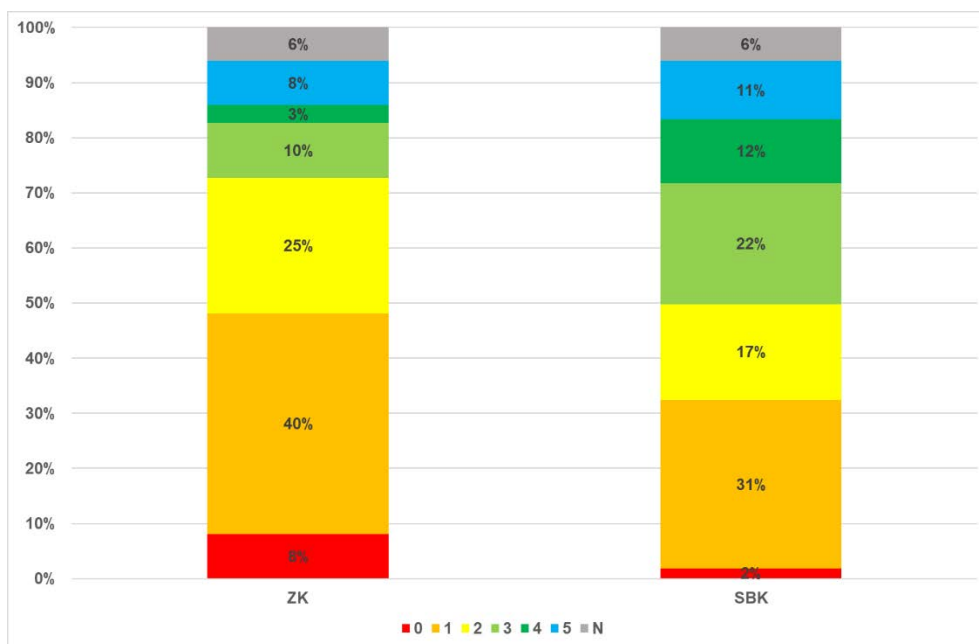


Bild 77: Reales Teilnetz mit 1.337 Haltungen: Zustands- und Substanzklassenverteilung

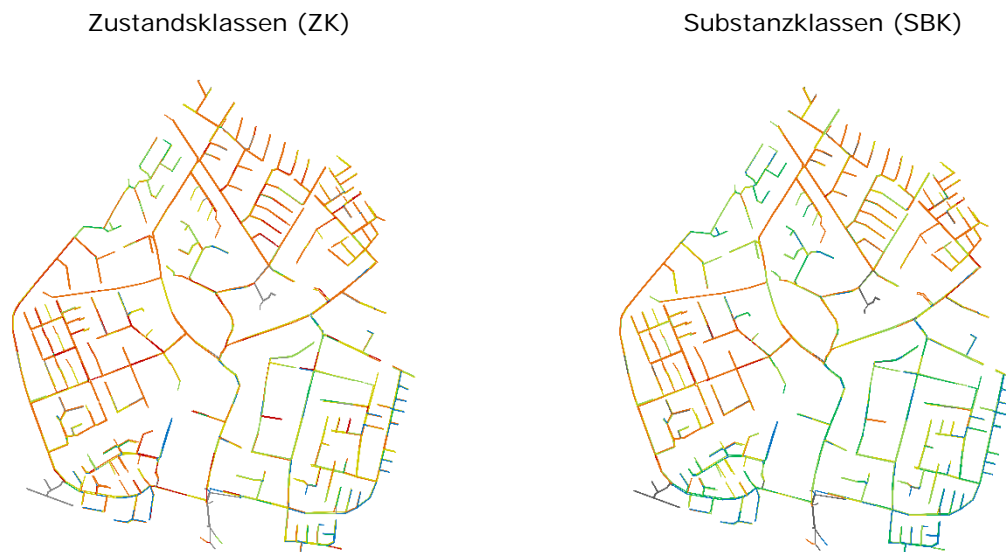


Bild 78: Reales Teilnetz mit 1.337 Haltungen: Zustandsklassen (links) und Substanzklassen (rechts)⁵⁹

Hier wird der Vorteil der Substanzklassifizierung sichtbar, da bei Beurteilung allein auf Grundlage der prioritätsorientierten Zustandsklasse übersehen werden könnte, dass solche Haltungen zukünftig voraussichtlich investiv zu sanieren wären.

Es ist in diesem Zusammenhang unbedingt festzuhalten, dass die Ableitung eines Sanierungshauptverfahrens nicht allein über die Substanzklasse erfolgen kann (oder soll). Neben Substanz sind zusätzliche ingenieurmäßige Beurteilungen und die Einbeziehung zahlreicher weiterer Randbedingungen, insbesondere der kaufmännischen Faktoren, für die dezidierte Festlegung von Sanierungsverfahren erforderlich.

Ungeachtet dessen kann für das beispielhafte Teilnetz aus der Gegenüberstellung von Zustand und Substanz im Einzelnen folgendes abgeleitet werden:

- 205 Haltungen (ca. 15 %, grün hinterlegt) sind in Bezug auf Zustand und Substanz unkritisch. Gegenwärtig besteht kein Sanierungsbedarf, auch mittelfristig ist kein großes Risiko vorhanden (erwartbar sind ggf. vereinzelt erforderliche Reparaturen). Die Substanz dieser Haltungen weist auf einen erheblichen Abnutzungsvorrat verbunden mit einer langen technischen Restnutzungsdauer hin.

⁵⁹ Farbgebung gemäß Tabelle 44

- 92 Haltungen (ca. 7 %, gelb hinterlegt) sind bei hoher Sanierungspriorität in Bezug auf die Substanz unkritisch. Erwartbar ist, dass diese Haltungen mit großem Erfolg repariert werden können. Abnutzungsvorrat und technische Restnutzungsdauer dieser Haltungen sind durch die Sanierung in hohem Maße wiederherstellbar.
- 428 Haltungen (ca. 32 %, rot hinterlegt) weisen bei niedriger Substanz eine hohe Sanierungspriorität auf. Erwartbar ist, dass diese Haltungen sofort bis mittelfristig und i.d.R. mittels investiver Verfahren zu sanieren sind. Bei 25 Haltungen ist der Abnutzungsvorrat erschöpft; das Ende der technischen Nutzungsdauer ist erreicht.
- 452 Haltungen (ca. 34 %, orange hinterlegt) sind in Bezug auf ein zuzuordnendes Sanierungsverfahren indifferent und können je nach Randbedingungen entweder noch sinnvoll repariert oder müssen investiv saniert werden.
- 79 Haltungen (blau hinterlegt) weisen eine nachrangige Sanierungspriorität bei allerdings nur geringer Substanz auf. Dies gilt insbesondere für 18 Haltungen (rote Schrift), die mit hoher Wahrscheinlichkeit investiv zu sanieren sind.

Tabelle 44: Reales Teilnetz mit 1.337 Haltungen (81 Haltungen nicht inspiziert „N“): Gegenüberstellung von Zustands- und Substanzklassen

		Substanzklasse SBK						N
		5	4	3	2	1	0	
Zustandsklasse ZK	5	107	0	0	0	0	0	81
	4	20	13	11	0	0	0	
	3	14	51	50	13	5	0	
	2	0	72	149	56	51	0	
	1	0	16	69	142	296	13	
	0	0	4	14	22	56	12	
N								

Auf (Teil-)Netzebene ermöglicht die Kenntnis über die Verteilung der Substanzklassen zusammenfassend eine Einschätzung des vorhandenen Sanierungs- bzw. Investitionsbedarfes, die den Netzbetreiber bei der Entwicklung bzw. Überprüfung und Anpassung der Sanierungsstrategie unterstützen soll. Im konkreten Beispiel-Kanalnetz wäre deshalb kritisch zu überprüfen, ob die bisher durchgeführte bzw. geplante Sanierungstätigkeit in Hinblick auf das Kriterium Substanz ausreichend ist. Wird zudem das Netzalter sowie die erwartete Nutzungsdauer berücksichtigt, kann eine erste Einschätzung vorgenommen werden, ob ggf. bereits ein unangemessener Netzverschleiß und damit Substanzverzehr vorhanden ist, dem durch eine geeignete Sanierungsstrategie vorgebeugt werden muss.

11 Substanzklassifizierung von Schächten

11.1 Einführung

Bei der ursprünglichen Vorhabenplanung wurde davon ausgegangen, dass nach Entwicklung des Abnutzungsalgorithmus für Haltungen dieser Ansatz in vereinfachter auf Schächte übertragen werden kann, indem (Regel)schächte als senkrecht Rohre betrachtet werden. Im Rahmen der Bearbeitung von *SubKanS* stellte sich allerdings die Notwendigkeit einer detaillierteren Betrachtung heraus, da Schächte aufgrund der statischen Belastung und des komplexeren Aufbaus (Konus, Schachtunterteil usw.) deutliche Unterschiede zu Rohrleitungen aufweisen, die bei der Substanzklassifizierung Berücksichtigung finden sollten.

Insofern wurde das Projektteilziel „Substanzklassifizierung von Schächten“ nur begonnen und anschließend im weiteren Projektverlauf nicht weiterverfolgt. Es ist geplant, dieses Teilnormierungsziel in einen Anschlussantrag zu integrieren, sodass die nachfolgend dargelegten Vorarbeiten für die Substanzklassifizierung von Schächten zu einem Abschluss geführt werden können.

Analog zu Kapitel 5.2 wurde der vorhandene Katalog zur Einzelschadensklassifizierung von Schächten aus DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) auf Übertragbarkeit für die Substanzklassifizierung geprüft und entsprechend angepasst. Auch hier sollte eine größtmögliche Analogie zur Zustandsklassifizierung beibehalten werden (siehe Kap. 11.2). Wie bei den Haltungen sollen in dem späteren Merkblatt DWA-M 149-10 „*Substanzklassifizierung*“ die empfohlenen Anpassungen der Einzelschadensklassen festgeschrieben werden. Auch wurde ein repräsentativer Datensatz mit etwa 20.000 Schächten zusammengestellt und aufbereitet (siehe Kap. 11.3).

Es ist davon auszugehen, dass bei der Substanzklassifizierung von Schächten wie bei den Haltungen die Beurteilung der Schwere und der Verteilung der Schäden in die Beurteilung der baulichen Substanz und somit der Abnutzung bzw. des Abnutzungsvorrates einfließen wird. Allerdings sind die strukturellen Unterschiede des Aufbaus von Schächten besonders zu berücksichtigen. Ein Schachtbauwerk besteht aus verschiedenen Segmenten (vgl. Bild 79). Schäden in den unterschiedlichen Segmenten haben unterschiedlich starke Auswirkungen auf die Schadensbeurteilung und -klassifizierung des Schachtes.

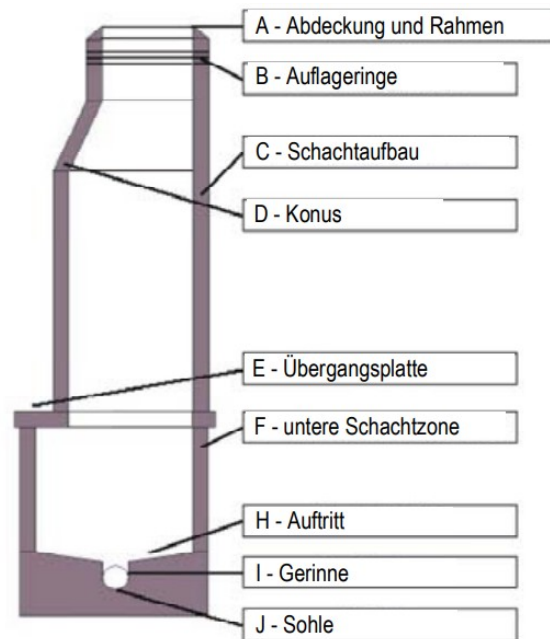


Bild 79: Beschreibung der Lage innerhalb von Schächten nach DIN EN 13508-2 (DIN EN, 2011)

11.2 Relevanz des Einzelschadens auf die Substanzklassifizierung eines Schachtbauwerkes

11.2.1 Definition der Substanz eines Schachts

Der Abnutzungsvorrat bzw. die Substanz eines Schachts oder einer Inspektionsöffnung (nachfolgend unter dem Begriff *Schacht* zusammengefasst) ist definiert als Grad der möglichen Funktionserfüllung, der einem Schacht (noch) innewohnt (siehe auch Glossar). Die Funktionserfüllung eines Schachts wird durch Einzelschäden beeinträchtigt. Art und Ausprägung der Einzelschäden, deren räumliche Anordnung und Zuordnung zu einer bestimmten Lage innerhalb des Schachts, ggf. vorhandene gegenseitige Beeinflussung sowie die örtlichen Randbedingungen des Schachts beeinflusst den Funktionsverlust und damit die (verbleibende) Substanz einer Haltung.

11.2.2 Definition des Einzelschadens

Als Einzelschaden wird ein in sich abgeschlossener Schaden verstanden, welcher mit standardisierten alphanumerischen Codes beschrieben wird. Zur Beschreibung eines Einzelschadens können bei Bedarf mehrere der nach Schadenscharakteristika gegliederten Codes verwendet werden.

Der Hauptcode eines Einzelschadens setzt sich gemäß DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) aus drei Buchstaben zusammen. Der erste Buchstabe eines Einzelschadens verweist auf die Objektart des Schachts ("D"), der zweite Buchstabe auf die Zuordnung entweder zur Codegruppe Struktur des Schachts

(“A”) oder zu Kodegruppe Betrieb des Schachts (“B”); der dritte Buchstabe verweist auf den Schadenstyp (z. B. “B”: Riss).

Sämtliche Einzelschäden mit Codes zur Struktur und zum Betrieb des Schachts führen zu einer Einschränkung der Funktion und somit zum Abbau des Abnutzungsvorrates. Die von den jeweiligen Schäden hervorgerufenen Funktionseinschränkungen betreffen dabei die jeweiligen, ihnen zugeordneten und von ihnen entsprechend der Bewertung beeinflussten Schutzziele Standsicherheit, Betriebssicherheit und Dichtheit. Alle Schäden können nur durch eine bauliche Sanierungsmaßnahme behoben werden. Als bauliche Maßnahme zählen in diesem Kontext alle Maßnahmen, die zur Behebung des Funktionsverlustes eingesetzt werden und über eine Reinigung hinausgehen.

Jeder Einzelschaden stellt eine Funktionsbeeinträchtigung und damit auch eine Substanzbeeinträchtigung dar. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Inspektion fachgerecht und regelwerkskonform ausgeführt wurde und mit einer vorhergehenden Reinigung des Schachts ggf. vorhandene leichte betriebliche Einschränkungen, die keiner Sanierungsmaßnahme bedürfen, bereits beseitigt wurden. Auch bei der Inspektion festgestellte verfestigte Ablagerungen verursachen aus diesem Grund einen Handlungsbedarf und sind somit substanzrelevant.

11.2.3 Bestandsaufnahme von Schächten

Mit dem zweiten Buchstaben “C” eines Hauptkodes werden bei der Inspektion Feststellungen zur Bestandsaufnahme aufgenommen. Reparaturstellen “DCB” haben für die Ermittlung des Handlungsbedarfs zur baulichen Sanierung keine Bedeutung. Dementsprechend wird Reparaturstellen in DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) keine Klassifizierung zugeordnet.

Bei der Bewertung der Substanz eines Schachts hingegen weisen Reparaturen auf eine bereits erfolgte Abnutzung hin.

Aus diesem Grund werden entsprechende Bestandsaufnahmen, die auf Reparaturstellen hinweisen, ebenfalls hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die drei Schutzziele und die Funktionsbeeinträchtigung untersucht. Gleiches gilt für Bestandskodes, welche auf Bauweisen hinweisen, die nicht dem heutigen Stand der Technik entsprechen.

11.2.4 Bauliche / Betriebliche Einzelschadensklasse

Analog zu dem erarbeiteten Einzelschadenskatalog bei den Haltungen (siehe Anlage 2) wurde auch für die Schachtbetrachtung auf Grundlage des DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) ein Einzelschadenskatalog Schächte zusammengestellt (siehe Anlage 3). In einem späteren Anschlussvorhaben soll dieser nochmal aufgegriffen und ggf. adaptiert werden, indem die Notwendigkeit einer Differenzierung des Einzelschadens nach Lage im Bauteil (Konus, Mittelteil, Berme, ...) intensiver erforscht wird.

11.3 Datengrundlage Schächte

Zu Beginn der Zustandserfassung von Haltungen in den 90er Jahren sind Schächte zunächst nur durch Schwenken der Kamera aus dem Schachtgerinne nach oben in den Schacht inspiziert worden. Diese Sicht ist ergänzt worden um eine Aufnahme von der Deckeloberkante in den Schacht hinein.

Viele Betreiber ermitteln im Zuge der Zustandserfassung der Schächte gleich den Sanierungsbedarf aufgrund der festgestellten Schäden. Damit entfällt zum einem die Qualitätssicherung der Bewertung und die Berücksichtigung möglicher Sanierungsalternativen.

Im Zuge der technischen Entwicklung der Zustandserfassung der Kanalisation werden Inspektionen gemäß DIN EN 13508-2 (DIN EN, 2011) durchgeführt, wobei Schächte immer häufiger zusammen mit den Haltungen inspiziert werden. Die frühere Sichtweise als „Anhängsel“ der Haltung wird heute in der Regel nicht mehr vertreten, zeigt sich aber oft noch in Umfang und Qualität des aktuell vorhandenen Datenbestandes. Im Gegensatz zu weithin verfügbaren Zustandsinformationen für Haltungen ist die Datenlage für Schächte bei den Netzbetreibern allerdings allgemein nicht so ausgeprägt. In Kenntnis dieser geringen Datenlage wurden bereits vor Änderung des Projektumfangs, der zu einer Ausgliederung der Schachtbetrachtungen führte, verschiedene Anstrengungen unternommen, standardisierte Schacht-Zustandsinformationen mit einem in *SubKanS* definierten Detaillierungsgrad zu erhalten.

Mit dem Hintergrundwissen aus den Haltungsbetrachtungen wurde auch bei den Schächten angenommen, dass eine deutlich größere Datenmenge - als ursprünglich im Rahmen der Vorhabenplanung angenommen - erforderlich ist, um die verschiedenen Schadensbilder und Sanierungsempfehlungen statistisch belastbar abzubilden. So konnte ein anonymisierter Datensatz von ca. 20.000 Schächten auf Grundlage der Inspektionsdaten zweier Betreiber zusammengestellt, plausibilisiert und nach DWA-M 149-3 (DWA, 2015a) klassifiziert werden. Die Anwendung des Einzelschadenskataloges (siehe Anlage 3) steht aus, da dieser durch intensivere Betrachtungen in einem Anschlussvorhaben ggf. adaptiert werden wird (siehe Kap. 11.2.4).

11.4 Fazit

Durch die spätere Verfügbarkeit der Inspektionstechnik begründet sich ein bisheriges Schattendasein der Zustandserfassung der Schächte, sowohl in Bezug auf Umfang als auch auf Qualität. Der Wissensstand bei den Schächten ist nicht so ausgeprägt wie bei den Haltungen.

Auch ist die allgemeine Erfahrung mit der Sanierung von Schachtbauwerke im Vergleich zu der Sanierung von Haltungen deutlich geringer und somit eine Einschätzung bzw. Überprüfung von Auswertungen der baulichen Substanz schwieriger als bei Haltungen. Häufig wird die Sanierung von Schächten in Kombination mit der Sanierung von Haltungen durchgeführt. Vielfach folgt derzeit die Schachtsanierung der Haltungssanierung. Dies betrifft nicht nur die Frage, welche Schächte saniert

werden, sondern bei größeren Schäden auch die Verfahrenswahl. Kleinere Schäden werden dagegen regelmäßig unabhängig - zum Teil durch das eigene Personal des Netzbetreibers - behoben. Den Abwasserschächten wird in der Sanierungsplanung und Entwicklung der Sanierungsstrategie oftmals eine geringere Bedeutung zugerechnet.

Derzeit existiert ein sehr breites Spektrum, was die Aufnahme und die Auswertung der Schachtdaten sowie die Auswirkung auf die Sanierungsempfehlung angeht. Auf Grundlage der in *SubKanS* durchgeführten Experteninterviews (siehe Anlage 10) lässt sich feststellen, dass insbesondere größere Betreiber sehr gezielt Schachtdaten aufnehmen und auswerten. Andere Betreiber agieren bisher nur sporadisch und betrachten Schachtsanierungen eher untergeordnet; dies betrifft alle damit verbundenen Schritte, beginnend bei der Inspektion als Grundlage über die strategischen Überlegungen bis hin zur Sanierungsdurchführung. Der Aufbau einer systematischen und qualifizierten Schachtzustandserfassung (wie bei den Haltungen) liegt noch nicht in Gänze für die Schächte vor. Jedoch wird sie von vielen Betreibern für die zukünftige Einbeziehung in die systematische Sanierungsplanung vorgesehen. Dies betrifft insbesondere die gebietsorientierte Strategie.

Grundsätzlich wird in den durchgeführten Experteninterviews (siehe Anlage 10) anerkannt, dass Regelschächte für die bauliche Zustandsbeurteilung sowie für die Ermittlung der baulichen Substanz die gleiche Bedeutung haben wie Haltungen. Schachtbauwerke verfügen oftmals über weitere Funktionen, für die zusätzliche Anforderungen gelten.

Für die Erreichung einer wissenschaftlich fundierten Substanzklassifizierung für Schächte, die in einen Normungsprozess eingespeist werden kann, sind detailliertere Betrachtungen notwendig als dies im gegebenen Umfang von *SubKanS* möglich war. So sollte beispielsweise erforscht werden, inwieweit eine Differenzierung des baulichen Schadens nach Bauteil (Konus, Mittelteil, Berme, ...) und evtl. auch nach Tiefenlage sinnvoll und inwieweit die Sanierungstendenz Schacht auch von der Sanierungstendenz Haltung abhängig ist. Dies könnte für Schächte zu einem Substanzklassifizierungsansatz führen, der deutlich von dem für Kanalhaltungen entwickelten Ansatz abweicht, was entsprechend zu validieren und in der Fachwelt zu etablieren wäre. Der Berechnungsansatz sowie die Gewichtungen der Schäden und der Schadensarten wäre zu adaptieren. Darunter fallen insbesondere die Prüfung der möglichen Gewichtung je Schadstelle im Schacht (Schachtsegment).

Zudem wäre zu untersuchen, ob eine Korrelation der Substanzklasse Haltung mit der Substanzklasse Schacht ableitbar ist. Die Auswirkung von Schäden an Schächten auf die Funktionalität des Entwässerungsbetriebes wird im Allgemeinen als geringer als von Haltungsschäden eingestuft. Nicht nur die Umsetzung der Sanierungen, sondern auch der vorhandene Sanierungsbedarf bei den Schächten ist allgemein geringer als bei den Haltungen einzuschätzen. Durch spätere Detailbetrachtungen im Rahmen eines Anschlussvorhabens ist deshalb genauer herauszuarbeiten, ob dies in einer allgemein geringeren Schadenshäufigkeit oder einer geringeren Dringlichkeit typischer Schachtschäden begründet ist. Auch ist die Verschneidung der beiden bisher separat angelegten Datenbanken zu prüfen.

12 Ergebnisverwertung und Ausblick

12.1 Praktische Relevanz

In *SubKanS* wurde ein Berechnungsverfahren entwickelt, das sämtliche Schäden einer Kanalhaltung zu einer einzelnen numerischen Kennzahl aggregiert. Diese Kennzahl beschreibt die bauliche Substanz einer Kanalhaltung in einem Wertebereich zwischen 0 % (Substanz aufgebraucht) und 100 % (vollständige Substanz vorhanden) in Abhängigkeit von Art, Ausmaß, Ausprägung und Schwere aller vorhandenen Schäden. Für das entwickelte Klassifizierungsverfahren gilt folgende Praxisrelevanz:

- Die bauliche Substanz stellt einen Maßstab zur verbleibenden Funktionserfüllung einer Kanalhaltung dar.
- Die technische Restnutzungsdauer wird maßgeblich von der baulichen Substanz beeinflusst. Über die technische Restnutzungsdauer ergibt sich ein direkter Zusammenhang zum Substanzwert nach DWA-A 143-14 (DWA, 2017).
- Die bauliche Substanz stellt ein Maß für den zu erwartenden Sanierungsaufwand und den Sanierungserfolg nach durchgeführten Sanierungsmaßnahmen dar.
- Auf Grundlage der baulichen Substanz können verschiedene Sanierungsstrategieansätze beurteilt werden, indem zu erwartende Sanierungserfolge bzw. Substanzverbesserungen den damit verbundenen Sanierungskosten gegenübergestellt werden. Auf diese Weise wird die langfristige Sanierungsplanung unterstützt und ein integrales Kanalnetzmanagement gefördert.
- Die entwickelte Kennzahl zur baulichen Substanz ermöglicht ein betreiberübergreifendes Benchmarking verschiedener Kanalnetze auf der Grundlage eines einheitlichen Berechnungsverfahrens.

In der Literatur sowie in der Sanierungspraxis wird der Substanzbegriff derzeit noch häufig unterschiedlich aufgefasst und angewandt. Daher erfolgt mit der Überführung der Vorhabenergebnisse in nationales Regelwerk (DWA) eine Standardisierung des Substanzbegriffs sowie des entwickelten Berechnungsverfahrens. Die Standardisierung ermöglicht u. a. die zukünftige wissenschaftliche und wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse von *SubKanS*.

12.2 Verwertung durch Kanalnetzbetreiber und volkswirtschaftliche Relevanz

Die Länge des bundesdeutschen Kanalnetzes betrug 2018 gem. DWA-Umfrage ca. 600.000 km (Berger et al., 2020). Der Wiederbeschaffungswert allein der Abwasserkanäle kann mit 1,1 Bill. € abgeschätzt werden. Hinzu kommen Schacht- und Sonderbauwerke sowie öffentliche und private Anschlussleitungen. Die Kanalisation ist damit i. d. R. das größte kommunale Anlagenvermögen.

Betrachtet man die Altersverteilung im Kanalnetz, so sind rd. 33 % der Kanäle älter als 50 Jahre, 15 % älter als 75 Jahre und 8 % sogar älter als 100 Jahre. Insgesamt besteht ein kurz- bis mittelfristiger Sanierungsbedarf auf etwa einem Fünftel der Gesamtlänge des öffentlichen Kanalnetzes (Berger et al., 2020). Hinzu kommt, dass eine fortschreitende Alterung von Abwassersystemen zu beobachten ist und damit die Anpassung der Investitionen zum Werterhalt der Abwasseranlagen und zur Sicherstellung ihrer Funktionalität notwendig sein wird.

U. a. aus diesen Gründen werden von Kanalnetzbetreibern Instandhaltungskonzepte entwickelt. Die Steuerung solcher investiven und betrieblichen Maßnahmen erfolgt dabei jedoch nach wie vor in aller Regel über die Sanierungsdringlichkeit sowie in den Grenzen vorhandener finanzieller Budgets und gegebener personeller Kapazitäten. Eine normierte Substanz(klasse) kann als zusätzliche Entscheidungsgröße einen Beitrag leisten, die Sanierungsstrategie und –steuerung nachhaltiger zu gestalten und damit einem ungesteuerten Vermögensverzehr vorzubeugen.

Die Ergebnisse von *SubKanS* tragen somit dazu bei, einen solchen ungesteuerten Vermögensverzehr kosteneffizient zu vermeiden und sind insofern zunächst volkswirtschaftlich relevant. Die Bezifferung eines möglichen Vermögensverzehrs ist nicht bundesweit, sondern lediglich exemplarisch möglich (vgl. Bild 80). Grund hierfür ist, dass bisherige Sanierungsaktivitäten, Netzalter, Netzzustand und Netzzustandsentwicklung konkret ermittelt und gegenüberzustellen sind. So geht aus der in Bild 80 exemplarisch dargestellten Strategieanalyse hervor, dass der „natürliche“ Vermögensverzehr aufgrund von Alterungsprozessen bei der betrachteten Kanalisation (ca. 1.000 km Netzlänge) im Vergleich zur derzeit umgesetzten Strategie (Weiterso-Strategie) im Mittel bei etwa 1.700 €/((km·a) liegt. Durch Optimierung der Strategie kann dagegen unter Verrechnung der erforderlichen Investitionen ein Nettovermögensaufbau in Höhe von ca. 900 €/((km·a) erzielt werden.

Die einzelnen Kanalnetzbetreiber können mit den Ergebnissen aus *SubKanS* bisherige Reinvestitions- und Instandhaltungsstrategien überprüfen, um Effektivität und Effizienz einzusetzender monetärer, technischer und personeller Ressourcen im Sinne des Vermögenserhalt weiter zu optimieren. Mit der Einführung einer einheitlichen Substanzklassifizierung erhält das Infrastrukturmanagement eine wichtige zusätzliche und vor allem standardisierte Bewertungsgrundlage, die unabhängig von Unternehmensform, Aufbau- und Ablauforganisation ist. Daher ist davon auszugehen, dass die entwickelte

substanzbeschreibende Kennzahl bzw. das entwickelte Berechnungsverfahren Eingang in den betriebswirtschaftlichen und betriebstechnischen Entscheidungsprozess der Netzbetreiber finden wird. Auch eine Einbindung in Benchmarkprozesse und damit ein Vergleich bzw. eine Einordnung des eigenen Handelns mit dem Handeln anderer Betreiber wird durch die neue Kenngröße ermöglicht.

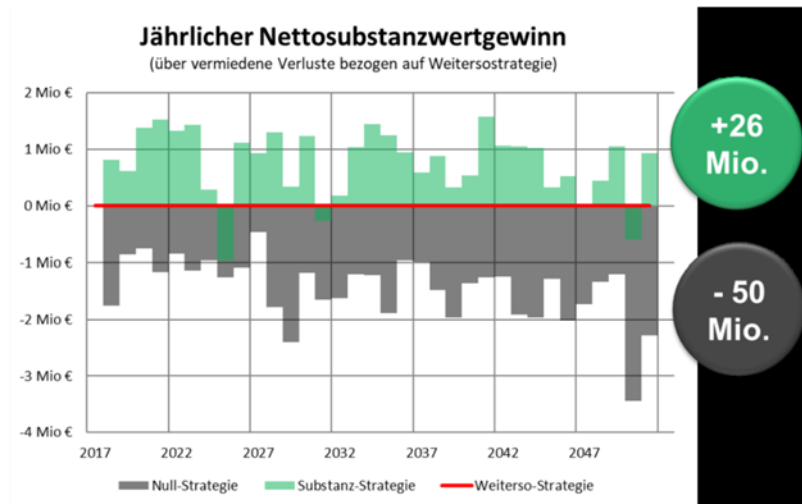


Bild 80: Beispiel der Vermögensentwicklung für verschiedene Instandhaltungsstrategien (Kanalnetzlänge ca. 1.000 km)

12.3 Verwertung durch beteiligte Ingenieurbüros

Die Ergebnisse von *SubKanS* werden durch die am Vorhaben beteiligten Ingenieurbüros im Rahmen ihrer zukünftigen Projektakquise und -bearbeitung verwertet. Durch die Standardisierung können Leistungen, wie z. B. das Erstellen von kosteneffizienten und nachhaltigen Sanierungsstrategien effektiver erbracht werden. Gegenüber den Auftraggebern kann ein auf breiter wissenschaftlicher Basis abgestimmtes Vorgehen präsentiert und regelwerkskonform in Software umgesetzt werden. Aktuell wird dies bspw. schon jetzt für prognosegestützte Substanzerhaltungskonzepte diskutiert.

Insbesondere für die Substanzbewertung kleinerer Netze bietet die standardisierte Vorgehensweise erhebliche Vorteile. Diese Auftraggeber (Betreiber von kleinen oder mittleren Netzen) verfügen in der Regel nicht über das notwendige Fachwissen, um Vor- und Nachteile unterschiedlicher vorhandener Ansätze abwägen zu können. Durch die Standardisierung wächst gerade bei diesen Auftraggebern das Vertrauen in die Substanzbewertung und damit in substanzwertorientierte bzw. vermögenserhaltende Sanierungsstrategien. Die Bereitschaft zur Beauftragung derartiger Analysen und Dienstleistungen wird durch die standardisierte Kenngröße deutlich erhöht.

Unter Berücksichtigung bisheriger Projekte zur Strategieentwicklung kann für Deutschland abgeschätzt werden, dass nach wie vor für etwa 500.000 km Kanalnetzlänge keine vermögenserhaltende Strategie entwickelt wurde. Ein immenses Verwertungspotential ist also gegeben.

Die entwickelte Methodik zur Substanzklassifizierung und -bewertung kann darüber hinaus in unterschiedliche bereits eingesetzte Software zur Alterungsprognose und damit zur Unterstützung von langfristigen Planungen im Asset Management implementiert werden. Der Standard eröffnet für kommerzielle Softwareanbieter einen breiten Markt und darüber hinaus Auftraggebern wie Auftragnehmern Planungssicherheit und Kompatibilität.

12.4 Wissenschaftliche Verwertung

Aus wissenschaftlicher Sicht dienen die Vorhabenergebnisse zunächst dazu ein einheitliches Substanzverständnis in der Fachwelt zu etablieren. Dazu wurden bereits zahlreiche Veröffentlichungen durch das *SubKanS*-Konsortium verfasst und einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht, z. B. auf den Inspektions- und Sanierungstagen der DWA (IST) 2021 in Dortmund (geplant). Eine vollständige Übersicht der Veröffentlichungen sowie gehaltener Vorträge befindet sich in Anlage 12.

Das im Vorhaben entwickelte Substanzverständnis sowie das entwickelte Verfahren zur Substanzklassifizierung und -bewertung dient insbesondere den Forschungseinrichtungen als eine Grundlage für die Generierung weiterer Forschungsprojekte, bspw. um weitere Anwendungsgebiete für die entwickelte Methodik erschließen zu können. Weiterhin werden die Vorhabenergebnisse zeitnah in Lehrinhalte umgesetzt, was die Ausbildung künftiger Ingenieure im Bereich der Kanalsanierung um aktuelle Themenfelder erweitert. Teilweise ist dies schon geschehen, z. B. in der Vorlesungsreihe „Zustandserfassung und -beurteilung“ im Masterstudiengang Wasserwirtschaft an der HS MD-ST von Prof. Dr.-Ing. Torsten Schmidt oder in der Vorlesungsreihe „Planung, Bau und Betrieb von Kanalisationen“ im Bachelorstudiengang Bauingenieurwesen an der FH Aachen von Prof. Dr.-Ing. Karsten Kerres. Bereits während der Projektlaufzeit wurden an der FH Aachen zwei studentische Abschlussarbeiten (1 Bachelor- und 1 Masterarbeit) erfolgreich abgeschlossen, die sich mit Einzelaufgaben aus *SubKanS* befassten.

12.5 Ausblick

Die entwickelte Methodik zur Substanzklassifizierung und -bewertung von Kanalhaltungen wird derzeit in nationales Regelwerk überführt. Die DWA-Arbeitsgruppe ES-4.7 „Sanierungsstrategien“ hat im November 2020 ihre Arbeit aufgenommen und den Auftrag, ein entsprechendes Regelwerk zu formulieren. Zahlreiche Konsortialpartner sind in dieser Arbeitsgruppe vertreten und bringen die Ergebnisse aus *SubKanS* ein. Darauf aufbauend ergeben sich weitere Anwendungsbereiche, auf die die entwickelte Methodik übertragen werden kann. Wie in Kapitel 11 beschrieben, soll der entwickelte Ansatz zunächst auf Schächte übertragen werden.

Neben der Anwendung auf Kanalhaltungen und Schächte kann die entwickelte Methodik grundsätzlich auch auf Großprofile und Sonderbauwerke übertragen werden und somit ggf. bei sämtlichen

Bauwerken der Kanalisation bzw. der Wasserwirtschaft allgemein zur Anwendung kommen. Darüber hinaus können die Ergebnisse grundsätzlich auch auf andere (leitungsgebundene) Infrastrukturen, wie bspw. Gas-, Wasser- oder Fernwärmenetze sowie Straßen übertragen werden. Voraussetzung sind standardisierte Inspektionen der Infrastruktursysteme. Wenn eine Nutzung der entwickelten Methodik auch für diese Bereiche nützlich erscheint, werden entsprechende existierende Konzepte und Berechnungsmethoden dahingehend angepasst und weiterentwickelt.

Grundsätzlich ist ein effizienter Rehabilitations- und Investitionsplan ein Schlüsselement für eine nachhaltige Instandhaltungsstrategie. Die Ergebnisse von *SubKanS*, insbesondere die standardisierte und transparente Methodik zur Substanzklassifizierung und -bewertung, stellen ein Werkzeug dar, um Rehabilitations- und Investitionspläne hinsichtlich der zu erwartenden Substanzverbesserung bewerten zu können. Dabei können verschiedene Handlungsszenarien miteinander verglichen und hinsichtlich ihrer Kosteneffizienz eingeschätzt werden. Durch Einbindung der Abnutzung bzw. der Substanz(klasse) als zusätzliches Element in die DWA-Umfrage zum Zustand der Kanalisation in Deutschland (vgl. Berger et al., 2020) können Vergleich und Handlungsnotwendigkeiten auch auf Bundesebene quantifiziert werden.

Erwartet wird, dass in naher Zukunft die Erfahrung bei der Anwendung der entwickelten Methodik zur Substanzbewertung steigt. Daraus ergibt sich eine weitere Steigerung des Nutzens der Vorhabenergebnisse sowie eine weitere Steigerung der beschriebenen Verwertungsmöglichkeiten.

13 Literaturverzeichnis

- BAST (1999): *Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B 22. Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Bergisch Gladbach. Februar 1999.
- BAST (2017): *Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 - RI-EBW-PRÜF*. Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Bergisch Gladbach. Februar 2017.
- BAW (2010): *Bauwerksinspektion (MBI)*. Ausgabe 2010. BAW Merkblatt. Hg. v. BAW. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe.
- BAW (2018): *Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV)*. Ausgabe 2018. BAW-Merkblatt. Unter Mitarbeit von Kloé, K. und Bödefeld, J. Hg. v. BAW. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe.
- Berger, C.; Falk, C.; Hetzel, F.; Pinnekamp, J.; Roder, S.; Ruppelt, J. (2016): *Zustand der Kanalisation in Deutschland - Ergebnisse der DWA-Umfrage 2015*. KA Korrespondenz Abwasser Abfall, Juni 2016.
- Berger, C.; Falk, C.; Hetzel, F.; Pinnekamp, J.; Ruppelt, J.; Schleiffer, P.; Schmitt, J. (2020): *Zustand der Kanalisation in Deutschland - Ergebnisse der DWA-Umfrage 2020*. KA Korrespondenz Abwasser Abfall, Dezember 2020.
- BFR (2019): *Baufachliche Richtlinien Abwasser – Arbeitshilfen zu Planung, Bau und Betrieb von abwassertechnischen Anlagen in Liegenschaften des Bundes*. Herausgegeben durch das Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) und das Bundesministerium der Verteidigung (BMVg). Berlin und Bonn, 2019.
- BMVI (2013): *Bauwerksprüfung nach DIN 1076 Bedeutung, Organisation, Kosten*. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin. September 2013.
- Cherqui, F.; Wery, C.; Ibrahim, M.; Le Gauffre, P. (2008): *CCTV inspection of sewer segments: calibration of performance indicators based on experts' opinions*. 11th International Conference on Urban Drainage, Aug 2008, Edinburgh, United Kingdom. ffhal-00397946
- DIN 1076: 1999-11 (1999): *Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung*. Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), November 1999.
- DIN EN 13380:2001-10 (2001): *Allgemeine Anforderungen an Bauteile für Renovierung und Reparatur von Abwasserleitungen und -kanälen außerhalb von Gebäuden. Deutsche Fassung EN 13380:2001*. Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), Oktober 2001.

- DIN EN 14457:2004-09 (2004): *Allgemeine Anforderungen an Bauteile, die bei grabenlosem Einbau von Abwasserleitungen und -kanälen verwendet werden. Deutsche Fassung EN 14457:2004.* Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), September 2004.
- DIN EN 13508-2:2011-08 (2011): *Untersuchung und Beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 2: Kodiersystem für die optische Inspektion. Deutsche Fassung EN 13508-2:2003+A1:2011.* Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), August 2011.
- DIN EN 13508-1:2013-01 (2013): *Untersuchung und Beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 1: Allgemeine Anforderungen.* Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), Januar 2013.
- DIN EN 16323:2014-07 (2014): *Wörterbuch für Begriffe der Abwassertechnik. Dreisprachige Fassung EN 16323:2014.* Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), Juli 2014.
- DIN EN 1610:2015-12 (2015): *Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen.* Deutsche Fassung EN 1610:2015. Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), Dezember 2015.
- DIN EN 752:2017-07 (2017): *Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden - Kanalmanagement. Deutsche Fassung EN 752:2017.* Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), Juli 2017.
- DIN EN 13306:2018-02 (2018): *Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung. Dreisprachige Fassung EN 13306:2017.* Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), Februar 2018.
- DIN 31051:2019-06 (2019): *Grundlagen der Instandhaltung.* Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), Juni 2019.
- DIN EN 476:2020-09 (2020): *Allgemeine Anforderungen an Bauteile für Abwasserleitungen und -kanäle. Deutsche Fassung EN 476:2020.* Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), September 2020.
- DWA (2006a): *Arbeitsblatt DWA-A 100 Leitlinien der integralen Siedlungsentwässerung (ISiE).* Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef. Dezember 2006.
- DWA (2006b): *Merkblatt DWA-M 149-2 Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden Teil 2: Kodiersystem für die optische Inspektion.* Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef. Dezember 2006 (Korrigierte Fassung: Stand Dezember 2013 (DWA 2013b)).
- DWA (2010a): *Merkblatt DWA-M 150 Datenaustauschformat für die Zustandserfassung von Entwässerungssystemen.* Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef. April 2010 (Korrigierte Fassung: Stand November 2018).

- DWA (2010b): *Merkblatt DWA-M 149-5 Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 5: Optische Inspektion*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef. Dezember 2010.
- DWA (2012): *DWA-Themenband T 4/2012 Leitfaden zur strategischen Sanierungsplanung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef. September 2012.
- DWA (2013a): *Merkblatt DWA-M 145-1 Kanalinformationssysteme - Teil 1: Grundlagen und systemtechnische Anforderungen*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef. Dezember 2013.
- DWA (2013b): *Merkblatt DWA-M 149-2 Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden Teil 2: Kodiersystem für die optische Inspektion*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef. Dezember 2013.
- DWA (2014): *Merkblatt DWA-M 149-8 Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 8: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen (ZTV) - Optische Inspektion*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef. September 2014.
- DWA (2015a): *Merkblatt DWA-M 149-3 Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 3: Beurteilung nach optischer Inspektion*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef. April 2015.
- DWA (2015b): *Arbeitsblatt DWA-A 143-2 Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 2: Statische Berechnung zur Sanierung von Abwasserleitungen und -kanälen mit Lining und Montageverfahren*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef. Juli 2015.
- DWA (2015c): *Arbeitsblatt DWA-A 143-1 Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 1: Planung und Überwachung von Sanierungsmaßnahmen*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef. Februar 2015.
- DWA (2016a): *Merkblatt DWA-M 149-7 Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 7: Beurteilung der Umweltrelevanz*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef. Januar 2016.
- DWA (2016b): *Merkblatt DWA-M 149-6 Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 6: Druckprüfungen in Betrieb befindlicher Entwässerungssysteme mit Wasser oder Luft*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef. August 2016.

- DWA (2017): *Arbeitsblatt DWA-A 143-14 Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 14: Entwicklung einer Sanierungsstrategie*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef. August 2017.
- DWA (2018): *Merkblatt DWA-M 149-1 Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 1: Grundlagen*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef. Mai 2018.
- DWA (2019): *Arbeitsblatt DWA-A 139 Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef. März 2019.
- EG-HWRM-RL (2007): *Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken (EG-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie)*.
- EG-UWWTD (1991): *Richtlinie des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (91/271/EWG) (EG-Kommunalabwasserrichtlinie)* konsolidierte Fassung (ABl. L 135 vom 30.05.1991, S. 40).
- EG-WRRL (2000): *Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (EG-Wasserrahmenrichtlinie)*.
- FGSV (2012): *Empfehlungen für das Erhaltungsmanagement von Innerortsstraßen. E EMI 2012*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV). FGSV Verlag GmbH, Köln 2012.
- FGSV (2015): *Arbeitspapier Nr. 9 zur Systematik der Straßenerhaltung, Reihe K: Kommunale Belange*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV). FGSV Verlag GmbH, Köln 2015.
- FGSV (2018): *Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen. ZTV ZEB-StB*. Ausgabe 2006 (korrigierter und geänderter Nachdruck 2018). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV). FGSV Verlag GmbH, Köln 2018.
- Fischer Teamplan (o.J.): Fischer Teamplan Ingenieurbüro GmbH. URL: <https://www.fischer-teamplan.de/it-dienstleistung/tpsanierung/> zuletzt geprüft am 06.08.2020.
- Hochstrate, K. (1999): *Substanzwertorientierte Zustandsklassifizierung von Kanälen – Das Bietigheimer Modell*. KA Korrespondenz Abwasser Abfall, Februar 1999.

- ImmoWertV (2010): *Verordnung über die Grundsätze für die Ermittlung der Verkehrswerte von Grundstücken (Immobilienwertermittlungsverordnung - ImmoWertV)* vom 19.05.2010 (BGBl. I S. 639).
- Kloé, K.; Bödefeld, J. (2012): *Bauwerksinspektion an Verkehrswasserbauwerken*. Bautechnik (05.2012). Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin. DOI: 10.1002/bate.201200016.
- Kühni, Katrin; Bödefeld, Jörg; Kunz, Claus (2008): *EMS-WSV - Ein Erhaltungsmanagementsystem für Verkehrswasserbauwerke*. Bautechnik (08.2008). Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin. DOI: 10.1002/bate.200810039. (08.2008)
- LAWA; DWA; DVGW (Hg.) (2012): *Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien)*. 8. überarbeitete Auflage. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser. Herausgabe in Kooperation mit DWA und DVGW. Herausgeber und Vertrieb: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef. Juli 2012.
- Le Gauffre, P.; Joannis, C.; Vasconcelos, E.; Breyse, D.; Gibello; Desmulliez, J. (2007): *Performance Indicators and Multicriteria Decision Support for Sewer Asset Management*. American Society of Civil Engineers. Journal of Infrastructure Systems (02.2007). doi: 10.1061/(ASCE)1076-0342(2007)13:2(105).
- Lichtenberg, U.; Wolf, M. (2018): *Strategische Sanierungsplanung als Ausgangspunkt zur Kanalnetzsanierung*. KA Korrespondenz Abwasser Abfall, November 2018.
- Maibaum, N. (2009): *Grundzüge der Immobilienbewertung*. Vorlesung am Lehrstuhl für Finanzcontrolling Universität Passau. Passau, 03.02.2009. URL: <https://docplayer.org/6059450-Grundzuege-der-immobilienbewertung.html>, zuletzt geprüft am 06.08.2020.
- Marschke, L.; Schmidt, T. (2006): *Stadtumbau und Stadttechnik - Teil 4: Anlagenbewertung vor dem Hintergrund sich verändernder Märkte und Unternehmensformen*. wwt - Wasserwirtschaft – Wassertechnik, Mai 2006.
- NORVAR (2007): *Dataflyt Klassifisering av avløpsledninger*. NORVAR-rapport 150, ISBN 978-82-414-0278-4. NORVAR BA, Hamar (Norwegen), Juni 2007.
- Schönfelder, U.-T. (2010): *Verfahren zur Ermittlung des Abnutzungsvorrats von Baustoffen als Grundlage für Instandhaltungsstrategien am Beispiel der Gebäudehülle*. Dissertation. Technische Universität Dortmund, Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen. Dortmund, 2010.
- Schönfelder, U.-T. (2011): *Definition von Bauelementqualitäten mittels ERAB Verfahren. Objektiv prüfbare Kennzahlen für das Service Level Agreement „Instandhaltung“*. In: Facility Management. Februar 2011.

- Schönfelder, U.-T. (2012): *Zustandsermittlung von Immobilien mittels Verfahren ERAB. Grundlagen für Instandhaltungsstrategien*. Werner Verlag, Dortmund, 2012.
- Stein, D.; Stein, R. (2019): *STATUSKanal - Objektbewertung (Haltungsbewertung)*. 4. Auflage, Band 5. Hg. v. Prof. Dr.-Ing. D. Stein und Dr.-Ing. R. Stein. Instandhaltung von Kanalisationen, 2019.
- StGB (1998): *Strafgesetzbuch (StGB)* vom 13.11.1998 (BGBl. I S. 3322), zuletzt geändert durch Gesetz vom 25.06.2021 (BGBl. I S. 2099), zuletzt geprüft am 20.07.2020.
- SW-RL (2012): *Richtlinie zur Ermittlung des Sachwerts (Sachwertrichtlinie - SW-RL)* vom 5. September 2012 (BAnz AT 18.10.2012 B1).
- WSV (2010): *Bauwerksinspektion VV-WSV 2101*. Verwaltungsvorschrift der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (VV-WSV). 2009, mit Änderungen vom September 2010.
- WHG (2009): *Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG)* vom 31.07.2009 (BGBl. I S. 2585), zuletzt geändert durch Artikel 253 der Verordnung vom 19.06.2020 (BGBl. I S. 1328), zuletzt geprüft am 20.07.2020.
- Wikipedia (2020a): *Bausubstanz*. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Bausubstanz>, zuletzt aktualisiert am 27.08.2020, zuletzt geprüft am 23.10.2020.
- Wikipedia (2020b): *Substanz*. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Substanz>, zuletzt aktualisiert am 08.09.2020, zuletzt geprüft am 23.10.2020.
- Wolf, M. (2006): *Untersuchungen zu Sanierungsstrategien von Abwasserkanalnetzen und deren Auswirkungen auf Wertentwicklung und Abwassergebühren*. Mitteilungen Heft 95/2006. Hg. v. Universität der Bundeswehr München. Institut für Wasserwesen, 2006.
- Wolf, M. (2007): *Untersuchungen zu Sanierungsstrategien von Abwasserkanalnetzen und deren Auswirkungen auf Wertentwicklung und Abwassergebühren*. KA Korrespondenz Abwasser Abfall, November 2007.
- WRc Publications (2013): *Manual of Sewer Condition Classification (MSCC)*. 5th Edition: WRc Publications, Oktober 2013.