

Lebenszykluskosten der Straßeninfrastruktur

Optimierung von Investitionsstrategien
und technischen Maßnahmen, Bau- und Betriebsweisen für
Straßenanlagen in ihrem Lebenszyklus

Habilitationsschrift

Markus Hoffmann

Impressum

Medieninhaber:

Professur für Straßen- und Flugbetriebsflächenbau
Institut für Verkehrswissenschaften
Technische Universität Wien
A - 1040 Wien, Gußhausstraße 28
Telefon: +43 1 58801 - 23301

Redaktion:

Karin Beck

Druck:

Agentur Prokop KG
A-3400 Klosterneuburg, Inkustraße 16

ISBN: 978-3-901912-36-8

Gedruckt auf BIOTOP 3
umweltfreundlich chlorfrei gebleicht

Vorwort

Ein ganzheitliches System zur effizienten Verwaltung von der Straßeninfrastruktur (Road Asset Management) umfasst die erforderlichen Prozesse, Daten sowie wissenschaftlichen Methoden und Grundlagen, die für die strategische Erhaltung bzw. Erneuerung aller physischen Güter des Straßeninventars erforderlich sind. Aufgaben und Ziele eines solchen Systems müssen sein, das für die verkehrliche Erreichbarkeit maßgebliche Serviceniveau, welches die Grundlage der sozialen und ökonomische Entwicklung von Regionen bildet, auf die kosteneffizienteste Weise bereitzustellen. Im Rahmen der Straßenforschung hat sich das Erhaltungsmanagement in den letzten Jahren aufgrund seiner immer höheren (volks-)wirtschaftlichen Bedeutung als ein eigenständiges Forschungsfeld im Zusammenwirken von Ingenieurwissenschaften, Ökonomie und Statistik entwickelt, welches darauf abzielt, geeignete Methoden zur Entscheidungsfindung zu systematisieren und für nationale und lokale Straßenbehörden geeignete, leistungsstarke und objektive Instrumente für ein nachhaltiges Road Asset Management zur Verfügung zu stellen. Für die systematische Verwaltung von Netzen und die Priorisierung erforderlicher Investitionen ist dazu ein langfristiger Lebenszyklusansatz erforderlich.

Die gegenständliche Arbeit von Herrn DI Dr. Hoffmann erfüllt diesen hohen Anspruch durch den gewählten ganzheitlichen Ansatz. Vorgestellt und entwickelt werden darin erstmals alle für ein effizientes Road Asset Management System erforderlichen Instrumentarien. Möglich werden dadurch die Optimierung von Investitionsstrategien und die Planung von technischen Erhaltungsmaßnahmen für Straßenanlagen sowohl auf Netz- als auch auf Projektebene unter Einbeziehung von Lebenszyklusansätzen. Die vorgestellten Ansätze erlauben eine Zustandsprognose sowie die Optimierung von Bauloslänge, Eingriffszeitpunkt und Maßnahmen im Lebenszyklus beliebig komplexer alternder und instandsetzbarer (Verkehrs-) Anlagen unter Einbeziehung des jeweiligen Investitionsumfelds. Die Integration von Zuverlässigkeits- und Zustandstheorie sowie der Überlebensanalyse ermöglichen zudem erstmals die Bestimmung des optimalen Eingriffszeitpunktes bei unvollständigen Daten unter Unsicherheit und Risiko. Die vorgestellten Instrumente sind wissenschaftlich fundiert und durchgängig, weshalb sie die heute gängigen heuristischen Ansätze ersetzen sollen.

Sämtliche im Rahmen der Arbeit entwickelten methodischen Grundlagen, welche auch in hochrangigen, internationalen Journalen und Konferenzen mit „peer review“ publiziert wurden, werden in den jeweiligen Kapitel durch zahlreichen Beispielen umfassend erläutert und für die jeweilige Anwendung konkretisiert. Die Habilitationsschrift erhält damit einen lehrbuchhaften Charakter und sprengt damit bei Weitem den für eine solche wissenschaftliche Arbeit üblichen Rahmen.

Herr DI Dr. Markus Hoffmann konnte sich damit für das Fachgebiet „Straßenerhaltung und Straßeninfrastrukturmanagement“ an der Technischen Universität Wien als Privatdozent habilitieren. An dieser Stelle sei den beiden externen Gutachtern der Habilitationsschrift, Herrn Univ.Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Oeser von der RWTH Aachen und Herrn Univ. Prof. DI Dr. Peter Veit von der TU Graz, sowie allen Mitgliedern der Habilitationskommission ganz herzlich gedankt.

Ronald Blab

Zusammenfassung

Systematische Analysen zu Investitions Umfeld, Randbedingungen und Trends sind notwendige Grundlage für eine ganzheitliche Bewertung von Investitionsvorhaben der Verkehrsinfrastruktur. Ohne überzeugenden Nachweis eines signifikanten Nutzenüberschusses ist es unerheblich, ob ein Vorhaben in sich gut geplant oder gegenüber ausgewählten Alternativen vorteilhaft erscheint. Nur eine umfassende Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Wirtschaft, Infrastruktur und Verkehrsentwicklung schafft dazu eine fundierte Grundlage. Ausgehend von einem theoretischen Erklärungsansatz wird gezeigt, wie Investitionen Geschwindigkeit und Erreichbarkeit im System erhöhen und effizientere zentralere Produktion mit Skalenerträgen und günstigen Produkten ermöglichen. Dieser volkswirtschaftlichen Konsumentenrendite stehen empirisch quantifizierbare Wirkungen wie Kosten des Ausbaus, sekundäre Verlagerungseffekte mit Ballung und Entleerung sowie Umweltfolgen bei abnehmendem Grenznutzen gegenüber.

Der Methodenteil widmet sich der erstmaligen Entwicklung eines durchgängigen, konsistenten mathematischen Ansatzes für die Optimierung des Lebenszyklus beliebig komplexer, ersetzbarer und reparierbarer Anlagen unter Unsicherheit. Der wesentliche Beitrag besteht in der Verknüpfung von Zustands- und Zuverlässigkeitstheorie mit Lebenszyklusansätzen zu einer Klasse stochastischer Prozesse mit stetigem Zustandsverlauf in stetiger Zeit. Diese Prozesse erlauben die Berechnung stochastischer altersabhängiger Zustandsverteilungen und Restlebensdauern für jede stetige, skalierbare Zustandsfunktion und Ausfallsverteilung. Unter Einbeziehung der Überlebensanalyse können übliche Vereinfachungen sowie systematische Abweichungen und Verzerrungen deterministischer stetiger und diskreter stochastischer Ansätze vermieden werden. Die Anwendung des entwickelten Ansatzes in der Zustandsprognose auf Netz- und Projektebene berücksichtigt vorhandene Erfassungsdaten und erlaubt eine mathematisch korrekte Zuordnung zustandsabhängiger Risiken. Die gleichzeitige Modellierung der Zustandsentwicklung von Schäden bzw. Elementen mit den entwickelten Algorithmen ermöglicht eine spezifische Zuordnung und Optimierung von Maßnahmen mit Timing und Bauloslänge, Finanzbedarf, Anlagevermögen und Verfügbarkeit.

Der entwickelte Ansatz wird für den Straßenoberbau „top down“ für die Bestimmung von Erhaltungsstrategie, Finanzbedarf, Restlebensdauer und Anlagevermögen auf Netzebene über einen standardisierten Lebenszyklus Oberbau angewendet. Ausgehend von den Anforderungen und Abläufen des Asset Managements und Analyse bestehender Pavement Management Systeme (PMS) erfolgt weiters eine Umsetzung „bottom up“. Anhand einer umfassenden Analyse von Schadensursachen und Schäden, Zustandsmodellen, -grenzen und -bewertung, Aggregation und Zustandsprognose sowie Maßnahmenkosten und Optimierung werden die methodischen Grenzen bestehender Ansätze analysiert. Darauf aufbauend kann „ceteris paribus“ gezeigt werden, warum PMS - Ansätze mit homogenen Abschnitten und Gewichtung nach dem Prinzip der Kostenwirksamkeitsanalyse nicht optimal sind. Die spezifische Modellierung aller Variablen im entwickelten Ansatz vermeidet die Schwächen dieser Ansätze, führt jedoch zu einer extrem komplexen, dynamisch und nichtlinear wachsenden Problemgröße. Daher wurde für die Lösung ein spezieller Algorithmus entwickelt, der eine unlimitierte Anzahl an Abschnitten oder Anlagen mit linearem Anstieg der Laufzeit behandeln kann. Darüber hinaus wird anhand von Vergleichsrechnungen belegt, dass mit dem neuen Ansatz ein wesentlich effizienterer Mitteleinsatz gegenüber herkömmlichen Ansätzen möglich ist.

Die Anwendung dieses Ansatzes auf Brücken und Tunnels ermöglicht sowohl die Ableitung eines standardisierten Lebenszyklusmodells, als auch die Ermittlung von Anlagevermögen, Finanzbedarf und Verfügbarkeit auf Netzebene „top down“. Grundlegende Fragestellungen zu den Lebenszykluskosten von Trassenalternativen können auf dieser Ebene ebenfalls konsistent beantwortet werden, wodurch Fehlinvestitionen vermieden und eine effiziente Ressourcenallokation ermöglicht wird. Mit der Konzeption eines vollständigen Bauwerks Management Zyklus von Brücken und Tunnels bis auf Elementebene „bottom up“ werden zudem bestehende Lücken geschlossen und die Basis für eine Umsetzung gelegt. Neben unmittelbaren Erkenntnissen aus der Analyse besteht der Nutzen insbesondere in präziseren Schadensansprachen und Prognosen sowie einem Effizienzgewinn mittels harmonisierter Instandsetzungsintervalle und optimierter Instandsetzungsstrategien. Bei entsprechender Umsetzung kann zudem der personelle Aufwand der Betreiber reduziert werden, was Ressourcen für die Umsetzung und systematische Verbesserungen frei macht. Alle wesentlichen methodischen Grundlagen und Ergebnisse sind durch entsprechende Nachweise belegt und hochrangig in internationalen Journalen und Konferenzen mit „peer review“ publiziert.

Summary

Systematic analysis of investment environment, boundary conditions and trends are a necessary prerequisite for a holistic assessment of investments in transport infrastructure. Without sufficient evidence of a significant benefit surplus it does not matter whether a project is well planned or appears favourable compared to selected alternatives. Only a comprehensive theoretical background and investigation of the interactions between economy, infrastructure and traffic developments creates a sound basis for such an analysis. Based on a theoretical explanatory approach it can be shown how investments increase speed and accessibility enabling ever more centralized production with economies of scale and lower product costs as results. These economic returns for consumers are contrasted by quantifiable costs of network expansion and secondary displacement effects from migration towards agglomerations. Apart from environmental consequences the empirical evidence shows a decreasing marginal utility of transport investments.

The methodological part of the research work provides an overview on the developed consistent mathematical approach for the optimization of life cycle costs of any complex, replaceable or repairable system under uncertainty. The essential contribution consists of the combination of condition and reliability theory with life-cycle approaches to a class of stochastic processes with continuous condition development and failure distribution. These processes allow the determination of stochastic time-dependent condition distributions and residual service lives for any continuous, scalable performance function and failure distribution. Including aspects of survival analysis, the simplifications and systematic deviations of deterministic as well as stochastic discrete approaches can largely be avoided. The application of the developed approach in condition prediction on network and asset level considers specific survey data allowing a mathematically sound assignment of condition related risks. The simultaneous modelling of performance functions for failure types, elements, and assets enables a specific allocation and optimization of measures with timing, length of work zones and availability at minimal costs.

Applying the developed approach on road pavements „top down“ allows an assessment of rehab and maintenance strategies as well as a determination of investments needs, remaining service life and residual asset value on network level based on a standardized life cycle. With Asset Management Standards and overview on existing Pavement Management Systems (PMS) a critical analysis of failure causes, condition thresholds, performance models and optimization approaches are presented. Implementing both standard approaches and the developed new approach provides compelling evidence regarding an insufficient use of funds due to methodical weaknesses of common PMS. By avoiding homogeneous sections, subjective weighting factors and efficiency optimization using economies of scale on treatment level these drawbacks can largely be avoided. However, the specific modelling of all variables leads to an extremely complex, nonlinear problem and an exponential growing number of possible solutions with increasing number of failure types, treatments and road sections. The developed unique algorithm allows for solving this problem for optimal treatment type, timing and work-zone length being capable of handling an unlimited number of road sections or road assets on a route. In addition, extensive comparative calculations „ceteris paribus“ show a substantial savings potential in contrast to common approaches.

The application of this new approach to bridges and tunnels enables the derivation of a standardized lifecycle model as well as the determination of investment assets, financing requirements and availability at network level "top down". Principal questions regarding the life cycle costs of planning alternatives can be answered as well at this level allowing to avoid inefficient investments and insufficient use of funds. Based on a comprehensive analysis of existing methods a comprehensive asset management approach for bridges and tunnels on element level "bottom up" is provided as well. With standardized failure type and treatment catalogues as well as additional methodical considerations the gaps in existing approaches regarding a full Asset Management Cycle are closed. Apart from specific findings the main benefits are the possibility to improve condition and reliability prediction based on actual measurements instead of unprecise grading. With appropriate implementation of the presented concepts the workload of road operators can be reduced freeing up resources for an efficient monitoring and improved results. All relevant methodological foundations and results of this work are substantiated by theoretic and empirical evidence being published in high-level international peer-reviewed journals and conferences as well.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	11
1.1	Ausgangslage und Problemstellung.....	11
1.2	Zielsetzung, Inhalte und Abgrenzung der Arbeit.....	13
1.3	Vorgehen und Methodik.....	15
2	Investitionsumfeld, Randbedingungen und Trends	17
2.1	Abgrenzung, Fragestellungen und Hypothesen.....	17
2.2	Grundzusammenhänge von Verkehrsangebot und Nachfrage.....	19
2.2.1	Markttheorie, Allokation und Entscheidung.....	19
2.2.2	Entwicklung von Verkehrswegen und Standorten.....	26
2.2.3	Entwicklung und Einflüsse auf die Verkehrsnutzer.....	30
2.2.4	Zusammenhänge Wirtschaft, Infrastruktur und Verkehr	32
2.2.5	Prognosen, Abweichungen, Irrtümer und Lügen	34
2.3	Verkehrsträger, Verkehr und Modal Split	39
2.3.1	Erreichbarkeit und Wirtschaft der EU.....	39
2.3.2	Verkehrsinfrastruktur und Verkehr in der EU	41
2.3.3	Entwicklung und Verwaltung des hochrangigen Straßennetzes in Österreich....	44
2.3.4	Straßeninfrastruktur und Verkehr in Österreich.....	46
2.4	Investitionen in Verkehrs- und Straßeninfrastruktur	51
2.4.1	Investitionen in die Straßeninfrastruktur international.....	51
2.4.2	Investitionen in die Straßeninfrastruktur in Österreich	54
2.4.3	Preise der Straßeninfrastruktur in Österreich	60
3	Asset Management und Lebenszykluskosten	63
3.1	Begriffe, Prinzipien und Bausteine Asset Management	63
3.1.1	Begriffe und Grundlagen des Asset Managements	63
3.1.2	Management finanzieller und physischer Assets	65
3.1.3	Herausforderung Road Asset Management	68
3.1.4	Lebenszykluskosten im Road Asset Management	73
3.2	Wirtschaftlichkeit und Entscheidungsfindung.....	77
3.2.1	Aspekte wirtschaftlicher Bewertung und Entscheidung	77
3.2.2	Grundlagen und Kriterien der Investitionsplanung.....	81
3.2.3	Methodik und Abläufe NKU und LCC - Verfahren	85
3.2.4	Planungsablauf und Bewertung von Verkehrsvorhaben in der UVP.....	89
3.3	Kostenermittlung und Kostenfunktion.....	92
3.3.1	Kostentheorie und Kostenfunktionen.....	92
3.3.2	Kostenermittlung vor der Umsetzung	96
3.3.3	Kostenermittlung während der Umsetzung.....	99
3.3.4	Kostenermittlung nach der Umsetzung	101
3.4	Kapitalkosten und Zinssatz.....	103

3.4.1	Kapitalzinssatz	103
3.4.2	Preisindizes, Inflation und Kaufkraftparitäten	108
3.4.3	Produktivität und Innovation	112
3.5	Wahrscheinlichkeit, Zuverlässigkeit und Zustand.....	115
3.5.1	Wahrscheinlichkeitsrechnung und Kombinatorik.....	115
3.5.2	Zuverlässigkeitsanalyse von Einzelementen von Anlagen	119
3.5.3	Zuverlässigkeitsanalyse komplexer Systeme und Anlagen	132
3.5.4	Deterministische und stochastische Zustandsentwicklung	141
3.6	Lebensdauer und Survival Analysis	156
3.6.1	Zustandsverlauf, Lebensdauer und Zensur	156
3.6.2	Nicht-parametrische SV - Analyse (Kaplan-Meier)	160
3.6.3	Semi-parametr. SV - Analyse (Cox-PH).....	167
3.6.4	Parametrische SV – Analyse (Exponential, Weibull, Log-Logistisch).....	171
3.6.5	Parametrische SV – Analyse mit Zustandsmodell (HOFFMANN).....	176
3.7	Zustandsprognosen	183
3.7.1	Arten und Anpassung von Prognosemodellen.....	183
3.7.2	Prognose mit Verschiebung und Skalierung.....	186
3.7.3	Prognose mit Regressionsverfahren.....	193
3.7.4	Gegenüberstellung der Prognosen auf Element- und Netzebene.....	214
3.8	Risikoanalyse und Management.....	227
3.8.1	Konzepte und Perspektiven zu Unsicherheit und Risiko	227
3.8.2	Qualitative und semi-quantitative Risikoanalysen.....	229
3.8.3	Quantitative Risikoanalyse	232
3.8.4	Rechtliche Bewertung und Allokation von Risiken.....	239
3.9	Lebenszykluskostenmodelle, Optimierung und Umsetzung	243
3.9.1	Deterministisch stetiges Lebenszykluskostenmodell (BASIS).....	243
3.9.2	Stochastisch-diskretes Lebenszykluskostenmodell (MARKOV)	245
3.9.3	Stochastisch-stetiges Lebenszykluskostenmodell (HOFFMANN).....	247
3.9.4	Algorithmen und Optimierung im Lebenszyklus.....	249
3.9.5	Ermittlung von Zustandsverteilung, Restlebensdauer und Anlagevermögen	256
4	Lebenszykluskosten Straßenoberbau.....	261
4.1	Generelle Lebenszykluskostenanalyse Straßenoberbau	261
4.1.1	Anlagenbestand, Zustand und Investitionen	261
4.1.2	Planungs- und Herstellungskosten.....	266
4.1.3	Betriebskosten.....	267
4.1.4	Instandsetzungskosten.....	269
4.1.5	Zustandsdaten und Instandsetzungsintervalle	270
4.1.6	Standardisierte LCC – Berechnung Asphaltoberbau	274
4.2	Strategische LCC – Ansätze auf Netzebene	278
4.2.1	Abschätzung und Berechnung der Restlebensdauer	278

4.2.2	Abschätzung und Berechnung von Neuwert und Restwert.....	281
4.2.3	Simulation über den Standardlebenszyklus	285
4.3	Pavement Management auf Projektebene.....	288
4.3.1	Übersicht Pavement Management Systeme (PMS)	288
4.3.2	Ziele und Strategien im Pavement Management.....	293
4.3.3	Schadensursachen und Schäden Oberbau	295
4.3.4	Zustandserfassung und Kennzahlen Oberbau	304
4.3.5	Zustandsentwicklung und Zustandsfunktionen.....	312
4.3.6	Zustandsbewertung und Aggregation	317
4.3.7	Zustandsprognose und Lebensdauer	324
4.3.8	Maßnahmenkataloge und Kostenfunktionen.....	326
4.3.9	Maßnahmenplanung und Optimierung	337
4.3.10	Budgetierung, Verfügbarkeit und Prioritäten.....	354
4.3.11	Bauprogramm, Umsetzung und Überwachung	355
4.3.12	Ergebnisanalyse, Feedback und Verbesserung	356
5	Lebenszykluskosten Brücken	357
5.1	Generelle Lebenszykluskostenanalyse von Brücken	357
5.1.1	Anlagenbestand, Zustand und Investitionen	357
5.1.2	Planungs- und Herstellungskosten	360
5.1.3	Betriebskosten.....	361
5.1.4	Instandsetzungskosten.....	362
5.1.5	Instandsetzungsintervalle	364
5.1.6	Standardisierte LCC – Berechnung Brücken	365
5.2	Finanzbedarf, Investitionsstrategien und Verfügbarkeit.....	367
5.2.1	Abschätzung der Restlebensdauer.....	367
5.2.2	Abschätzung von Neuwert und Restwert.....	370
5.2.3	Simulation über den Standardlebenszyklus und Anlagenbestand.....	373
5.3	Bauwerks- Management System Brückenanlagen.....	377
5.3.1	Übersicht Bauwerksmanagementsysteme (BMS).....	377
5.3.2	Ziele und Strategien im BMS – Brücke	380
5.3.3	Schadensursachen und Schäden Brücken	381
5.3.4	Zustandserfassung und Bewertung	411
5.3.5	Zustandsentwicklung und Lebensdauer	415
5.3.6	Zustandsauswertung und Prognose.....	434
5.3.7	Maßnahmenkataloge und Kosten.....	436
5.3.8	Maßnahmenplanung und Optimierung	452
5.3.9	Ergebnisse, Anwendung und weitere Entwicklungen.....	454
6	Lebenszykluskosten Tunnels	457
6.1	Generelle Lebenszykluskostenanalyse Tunnelanlagen.....	457
6.1.1	Anlagenbestand, Zustand und Investitionen	457

6.1.2	Planungs- und Herstellungskosten.....	458
6.1.3	Betriebskosten.....	459
6.1.4	Instandsetzungskosten.....	460
6.1.5	Instandsetzungsintervalle.....	461
6.1.6	Standardisierte LCC – Berechnung Tunnel.....	462
6.2	Finanzbedarf, Investitionsstrategien und Verfügbarkeit.....	464
6.2.1	Abschätzung der Restlebensdauer.....	464
6.2.2	Abschätzung von Neuwert und Restwert.....	466
6.2.3	Simulation über den Standardlebenszyklus.....	468
6.3	Bauwerksmanagementsystem Tunnelanlagen.....	470
6.3.1	Übersicht Tunnelmanagementsysteme (TMS).....	470
6.3.2	Ziele und Strategien im TMS – Tunnel.....	473
6.3.3	Schadensursachen und Schäden Tunnels.....	475
6.3.4	Zustandserfassung und Bewertung.....	494
6.3.5	Zustandsentwicklung und Lebensdauer.....	496
6.3.6	Zustandsauswertung und Prognose.....	502
6.3.7	Maßnahmenkataloge und Kosten.....	504
6.3.8	Maßnahmenplanung und Optimierung.....	515
6.3.9	Ergebnisse, Anwendung und weitere Entwicklungen.....	516
7	Zusammenfassung, Anwendung und Ausblick.....	519
8	Anhang.....	527
8.1	Abbildungsverzeichnis.....	527
8.2	Tabellenverzeichnis.....	540
8.3	Literaturverzeichnis.....	542

2.2.3 Entwicklung und Einflüsse auf die Verkehrsnutzer

Jede Person zieht einen Nutzen aus einer individuellen Kombination verschiedener Mengen nachgefragter Güter und wird dabei bestrebt sein, mit seinen begrenzten Ressourcen ein Maximum an Bedürfnisbefriedigung zu erzielen. Die an einem Standort für die Beschaffungsaktivität in Eigen- und Fremdversorgung notwendige Mobilität ist daher direkt von der Bevölkerung bzw. Standortausstattung abhängig und verändert sich dynamisch, was mittel- bis langfristig zu Reallokation von Bevölkerung und Güterproduktion zwischen Standorten und Märkten gemäß ihrer Eignung und den gebotenen Möglichkeiten führt²⁶. Für nachhaltige Investitionen in langlebige Güter wie die (Straßen-)Verkehrsinfrastruktur ist die Kenntnis dieser Grundzusammenhänge sowie Entwicklungen daher unabdingbar.

Abbildung 9 zeigt eine Auswertung von Daten zur Bevölkerungsentwicklung, der Lebenserwartung, Geburtenrate und Wirtschaftskraft aller Länder der Welt von 1850 bis 2015 auf Basis der Daten von UN, WELTBANK und GAPMINDER. Zwischen 1850 bis 1950 war die Wachstumsrate der Bevölkerung relativ niedrig, hatte ihr Maximum um 1970 erreicht und geht seither wieder zurück. Gemäß der mittleren Prognosevariante der UN von 2015 wird die Weltbevölkerung von 7,35 Mrd. auf 11,21 Mrd. bis zum Jahr 2100 anwachsen. Der Großteil des Wachstums soll auf Afrika entfallen, dessen Population von derzeit 1,19 Mrd. auf 4,39 Mrd. wächst, während die Population in Europa und Asien je nach Migrationspolitik stagniert bzw. zurückgeht und überaltert. Der Hintergrund für das erwartete degressive Wachstum ist vor allem der Rückgang der Geburtenraten von im Schnitt 5-6 Kinder bis 1950 auf rund 3 Kinder im Jahr 2015 mit einem erwarteten weiteren Rückgang auf 2,0-2,1 Kinder je Frau bis zum Jahr 2100. Die mittlere Lebenserwartung ist von rund 30 Jahren um 1850 auf rund 40 Jahre bis 1950 nur sehr langsam und danach stark auf 72 Jahre gestiegen und wächst die letzten Jahrzehnte wieder langsamer, sodass mit durchschnittlich 80 bis 85 Jahren bis 2100 gerechnet wird. Die Kombination von geringeren Geburtenraten und größerer Lebenserwartung führt auch zu einem Anstieg des mittleren Alters der Bevölkerung und einer annähernd geradlinigen kumulativen Altersverteilung der Weltbevölkerung von 0 bis 90 Jahren bis zum Jahr 2100.²⁷

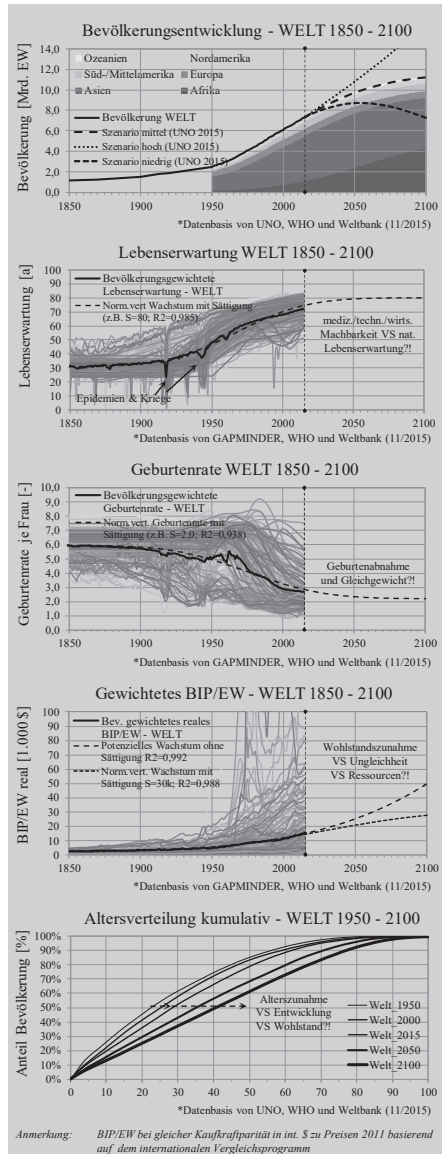


Abbildung 9: Lebenserwartung, Geburtenrate, Altersverteilung und wirtschaftliche Entwicklung der Weltbevölkerung von 1850 bis 2100

²⁶ vgl. BÖKEMANN, D. (1999) S 133 - 150; STIGLITZ, J. E. (1999) S 192 - 224; KRUGMAN, P. (1991)

²⁷ vgl. UNITED NATIONS (2015) sowie eigene Berechnungen auf Basis von WHO, WELTBANK, GAPMINDER - Daten

Die technologische und wirtschaftliche Entwicklung sind wesentliche erklärende Faktoren in Bezug auf die Steigerung der Lebenserwartung, die Reduktion der Geburtenraten und die Entwicklung des Energieverbrauchs (Abbildung 10). Die Auswertung des Wohlstandsniveaus der verfügbaren Daten aller Länder für die Zeitschnitte 1850, 1900, 1950, 2000 und 2015 zeigt, dass es einen systematischen positiven Zusammenhang zwischen Wohlstand und Lebenserwartung gibt (Preston- oder Potenzfunktion). Die Lebenserwartung in jeder Periode steigt bis zur Erreichung eines Mindestwohlstands (ca. 5.000 \$/EW) stark an und wächst dann nur mehr geringfügig. Die Gründe sind vielfältig und werden vor allem auf erreichbare Mindeststandards der Lebensführung und Hygiene sowie Aufbau und allgemeinen Zugang zur jeweils verfügbaren medizinischen Versorgung zurückgeführt. Der medizinische Fortschritt zeigt sich in der vertikalen Verschiebung der Lebenserwartung nach oben bei gleichem Wohlstand für die Zeitschnitte. Die Geburtenrate verläuft genau spiegelverkehrt und sinkt mit zunehmendem Wohlstand und medizinischem Fortschritt stark ab.²⁸

Der Energieverbrauch nimmt mit steigendem Wohlstandsniveau degressiv zu, da dieser den Kauf und die Nutzung unterschiedlichster Technologien erst ermöglicht. Dieser Zusammenhang ist in den betrachteten Perioden aufgrund der Kompensation des zunehmenden Energieverbrauchs der Technisierung durch effizientere Technologien stabil. Dies lässt sich insbesondere an der Entwicklung der CO₂ – Emissionen im Verhältnis zum Wohlstandsniveau zeigen, der ab einem Mindestwohlstandsniveau trotz höherer Produktivität, Technisierung und Mobilität (vgl. Kap. 2.2.4) annähernd konstant bleibt. Zusammengefasst kann daher durch Sicherstellung eines entsprechenden Wohlstandsniveaus für die Bevölkerung, medizinische Grundversorgung und technologische Entwicklungen die Lebenserwartung erhöht, Geburtenraten reduziert und der Überbevölkerung entgegen gewirkt werden. Der Energie- und Ressourcenverbrauch wird dagegen mit Zunahme des Wohlstandsniveaus überall auf der Welt weiter steigen, weshalb die Fragen des Zugangs und der Verteilung derselben stark an Brisanz gewinnen werden. Die Emissionen lassen sich dagegen durch Verwendung nachhaltiger Energiequellen, neuer Technologien sowie gesetzliche Rahmenbedingungen begrenzen.²⁹

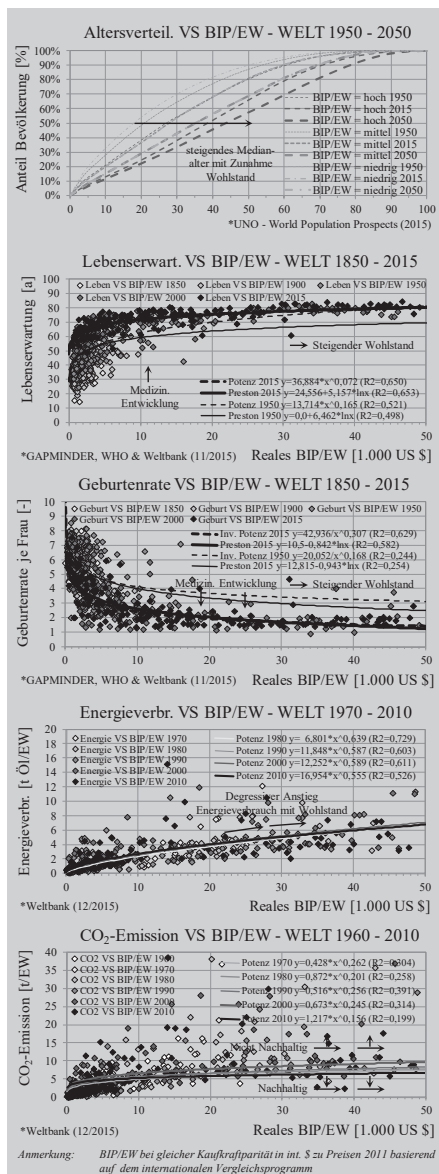


Abbildung 10: Entwicklung von Altersverteilung, Lebenserwartung, Geburtenrate, Energieverbrauch und CO₂ – Emission der Bevölkerung der WELT in Abhängigkeit von ihrer wirtschaftlichen Lage

²⁸ vgl. PRESTON, S.H. (1975); SPENCE, M. et al. (2009)

²⁹ vgl. BENTZEN, J. et al. (1993); TUCKER, M. (1995); RAMANATHAN, R. (2006)

2.2.4 Zusammenhänge Wirtschaft, Infrastruktur und Verkehr

Verkehrsinfrastruktur generell bzw. insbesondere Straßen und Wege stellen eine wesentliche soziale und ökonomische volkswirtschaftliche Ressource dar. Sie strukturieren die Nutzung des Raums und ermöglichen den Zugang zu bzw. den Austausch von Personen und Gütern zwischen Standorten und haben dadurch wesentlichen Einfluss auf die wirtschaftliche Entwicklung. Eine positive wirtschaftliche Entwicklung generiert wiederum die Mittel für weitere Investitionen in (Straßen-)Verkehrsinfrastruktur d.h. diese Größen stehen in steter Wechselwirkung zueinander. Hoch entwickelte Volkswirtschaften sind durch ein hohes Maß an Arbeitsteiligkeit, Spezialisierung, komplexe Wertschöpfungsketten und extensiven Handel sowie dementsprechend ausgebauten Verkehrswege gekennzeichnet. Auch wenn über diese grundsätzlichen Zusammenhänge weitgehend Konsens herrscht, werden die kausalen Zusammenhänge und konkreten Wirkungen von Vorhaben bzw. der erforderlichen Infrastrukturausstattung, dem sich daraus ergebenden Investitionsbedarf und in der Folge entstehenden Nutzen bis heute kontrovers diskutiert. Abgesehen von der begrenzten Datenlage besteht darüber hinaus weder ein Konsens in Bezug auf die anzuwendenden Methoden, noch eine Konvergenz in Richtung „best practises“.³⁰

Nachdem Verkehrsplanung und Investitionsentscheidungen überwiegend national oder regional erfolgen, existieren eine Vielzahl an unterschiedlichen Studien und Ergebnissen zu dem positiven Zusammenhang bzw. den Elastizitäten zwischen Verkehrsnetzen und Wirtschaftswachstum auf dieser Ebene. Die Anzahl transnationaler Studien über längere Zeiträume zu diesen Zusammenhängen ist dagegen sehr begrenzt und die Ergebnisse in der Fachwelt zudem kaum bekannt. Zwei umfangreiche Untersuchungen von Paneldaten haben jedoch gezeigt, dass sowohl die Netzentwicklung gebundener Straßen, als auch die Motorisierung weitgehend dem Wirtschaftswachstum entsprechen und mit zunehmender Ausstattung Sättigungstendenzen auftreten.³¹

Abbildung 11 zeigt die Auswertung der Straßennetzlänge je Einwohner (ungebunden, gebunden, Autobahn) und das zugehörige Wohlstandsniveau je Einwohner zwischen 1990 bis 2011 bzw. 1970 bis 2014 für den überwiegenden Anteil der Weltbevölkerung und Länder der Welt. Die Netzlänge der ungebundenen Straßen streut aufgrund der unterschiedlichen territorialen Gegebenheiten stark, steigt bei geringen Einkommen zuerst deutlich und nimmt ab einem BIP/EW von etwa 5.000 - 10.000 \$ bzw. etwa 7-10 m/EW kaum noch zu. Die Netzlänge gebundener (i.a. asphaltierter) Straßen nimmt dagegen nur geringfügig degressiv entsprechend dem Wohlstandsniveau zu, erreicht bei etwa 10.000 \$ im Mittel etwa 4 m/EW und bei 50.000 \$ ca. 9 m/EW bei etwas geringerer Streuung. Autobahnen und Schnellstraßen entstehen in der Regel erst ab einem gewissen Entwicklungs- und Wohlstandsniveau (BIP/EW > 5.000 \$/EW) und wachsen ebenfalls leicht degressiv mit Zunahme des Wohlstands.

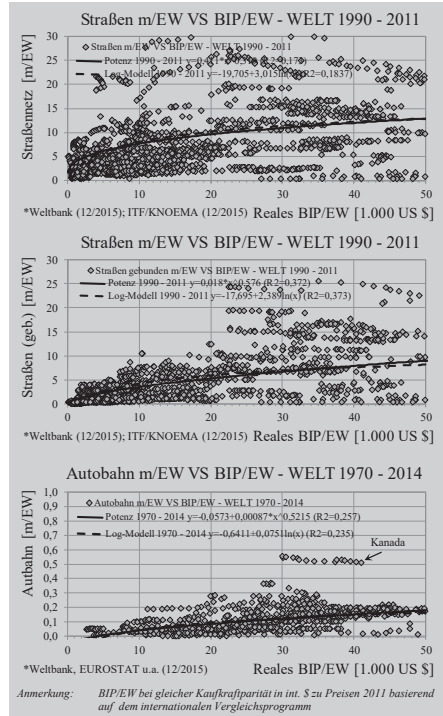


Abbildung 11: Zusammenhang der Entwicklung und Ausstattung mit ungebundenen, befestigten gebundenen Straßen und Autobahnen mit der wirtschaftlichen Lage der einzelnen Länder der WELT

³⁰ vgl. LIMAO, N. et al. (2001); SHORT, J. et al. (2005)

³¹ vgl. INGRAM, G. K. et al. (1999); DARGAY, J. et al. (2007)

Ausgehend von der einschlägigen Literatur und dargestellten Entwicklungen sowie Marktzusammenhängen zeigt sich, dass zusätzliche (Straßen-)Verkehrsinfrastruktur einen abnehmenden Grenznutzen in Bezug auf die Volkswirtschaft analog zu vergleichbaren Produktionsfunktionen aufweist. Die große Streuung ist abgesehen von territorialen Unterschieden und Faktoren der Nachweis, dass der Ausbau von Straßeninfrastruktur nur einer von vielen Faktoren in Bezug auf die Wirtschaftsentwicklung ist. Länder und Regionen, die ein vergleichbares Wohlstandsniveau mit erheblich geringerer Ausstattung erreichen, sind demgemäß entweder durch andere territoriale Faktoren begünstigt bzw. haben eine effizientere Siedlungs- und Verkehrspolitik. Bei anhaltender Migration von ruralen Gebieten in große Agglomerationen und einem zunehmenden Wohlstandsniveau ist jedenfalls davon auszugehen, dass asphaltierte Straßen bzw. insbesondere das Netz der Autobahnen und Schnellstraßen in Schwellen- und Entwicklungsländern mittelfristig noch stark ausgebaut werden wird.

Die Entwicklung der Motorisierung zeigt dagegen eine weitaus konsistentere degressiv zunehmende Entwicklung im Verhältnis zum Wirtschaftswachstum quer über alle Länder der Welt und wächst für ein BIP/EW von 20.000 \$ bis 50.000 \$ nur mehr schwach. Die Gründe dafür sind neben Sättigungstendenzen vor allem in dem Wachstum der Bevölkerung in Metropolen und der zunehmenden Dominanz des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) in diesen ab einem gewissen Wohlstandsniveau zu suchen (Abbildung 12). Die Personen- und Güterverkehrsleistung wächst im Gegensatz dazu fast linear mit der Zunahme des Wohlstandsniveaus und liegt im Schnitt bei etwa 12.000 pkm/EW bzw. 5.500 tkm/EW und Jahr bei einem BIP/EW von 50.000 \$. Die große Streuung bei gleichem Wohlstandsniveau erklärt sich vor allem durch territoriale und andere verkehrstechnische Unterschiede. Da im Straßenverkehr bis heute weitgehend fossile Treibstoffe eingesetzt werden und die Fahrleistung mit dem Wohlstandsniveau weitgehend linear gestiegen ist, sind die CO₂ – Emissionen im Straßenverkehr auch linear bis leicht degressiv gestiegen. Der leicht degressive Verlauf erklärt sich vor allem durch neuere Fahrzeuge und strengere Grenzwerte in wirtschaftlich hoch entwickelten Ländern. Bis alternative Technologien flächendeckend eingesetzt werden, ist daher durch den zunehmenden Wohlstand vor allem in Schwellen- und Entwicklungsländern eine Zunahme der Motorisierung und Emissionen zu erwarten.

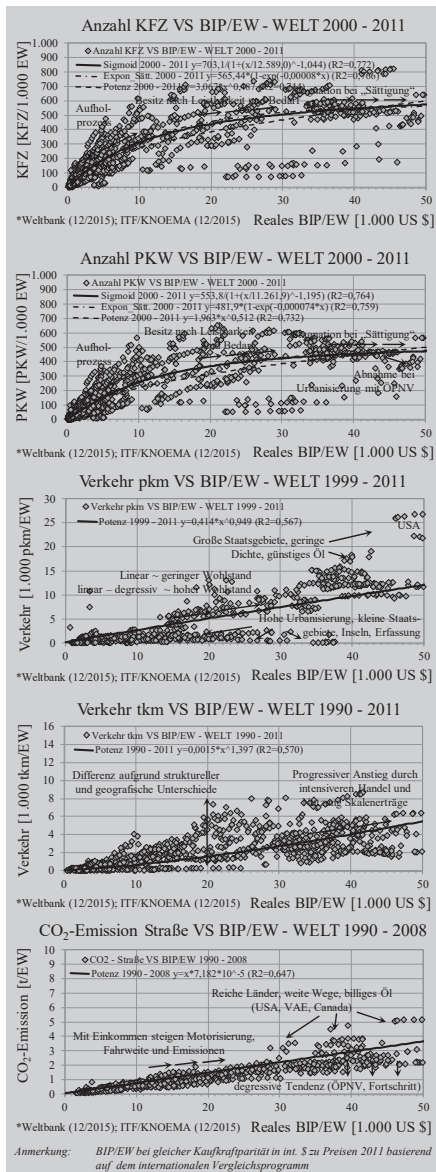


Abbildung 12: Zusammenhang der Motorisierung, des Personen- und Güterverkehrs sowie der CO₂ – Emissionen des Verkehrs mit der wirtschaftlichen Lage der einzelnen Länder der WELT

3.2.3 Methodik und Abläufe NKU und LCC - Verfahren

Als Nutzen-Kosten-Untersuchungen (NKU) werden Verfahren bezeichnet, die eine rationale und transparente Gegenüberstellung und Bewertung von positiven oder negativen Wirkungen von Unternehmungen erlauben. Sie finden in allen Stufen der Planung Verwendung und sind ein etabliertes Instrument in der wirtschaftlichen Rechtfertigung des Einsatzes öffentlicher Mittel in die Verkehrsinfrastruktur. Dazu sind alle ressourcenwirksamen Effekte der geplanten Unternehmung zeitlich und räumlich gemäß dem festgelegten Zielsystem zu einer Gesamtbilanz zu aggregieren. Diese Gesamtbilanz erlaubt keine Aussage, wem Nutzen und Kosten anfallen, sondern kann als ein Maßstab für Einzelentscheidungen bzw. zwischen Handlungsalternativen im Sinn des „öffentlichen Interesses“ eine Anwendung finden. Werden darüber hinaus Teilbilanzen für Wirkungs- oder Betroffenheitssegmente gebildet, so sind auch Aussagen über die Verteilungsgerechtigkeit bzw. Zumutbarkeit möglich⁷⁶.

Vor der Durchführung von NKU ist zu prüfen, ob alle zu beurteilenden Unternehmungen den rechtlichen, vertraglichen und technischen Bestimmungen entsprechen und grundsätzlich geeignet sind, die angestrebten Ziele zu erreichen. Die Vorteile von NKU bestehen u.a. in einer strukturierten Aufbereitung der Entscheidungsgrundlagen in nachvollziehbarer Form durch Offenlegung der angestrebten Ziele und erwarteten Auswirkungen, wodurch im Optimalfall der Ermessensspielraum für suboptimale Lösungen eingeschränkt wird. Die Nachteile von NKU liegen in methodischen Problemen, den subjektiven Interessen der Beteiligten, der begrenzten Möglichkeit alle relevanten Wirkungen zu erfassen und die sich ergebenden komplexen Zusammenhänge objektiv zu vermitteln. Die Nachteile von auf NKU basierenden Entscheidungen werden grundsätzlich durch die Vorteile überwogen, wenn die nachstehenden methodischen Einschränkungen und Erfordernisse ausreichend beachtet werden:

- **Nachhaltigkeitskriterium:** Nachhaltige Ausrichtung der mit der Unternehmung angestrebten Zielsetzungen als Basis für nachhaltige Investitionsentscheidungen
- **Irrelevanzkriterium:** Keine Vernachlässigung von Auswirkungen mit einem signifikanten Einfluss auf das Entscheidungskalkül durch richtige Systemabgrenzung
- **Zuverlässigkeitskriterium:** Beachtung der Grenzen der Messgenauigkeit und die stochastische Streuung der Grundlagendaten in Bezug auf das Entscheidungskalkül
- **Durchschnitts- und Killkriterium:** Transparente Aggregation von Einzelkriterien unter Berücksichtigung von möglichen Killkriterien zur Vermeidung von Informationsverlusten oder Verwässerung negativer Effekte in der Durchschnittsbildung
- **Zumutbarkeitskriterium:** Vermeidung unzumutbarer Negativwirkungen oder unverdienter Positivwirkungen (Windfallprofits) durch Teilbilanzen und soziale Verträglichkeitsprüfung
- **Robustheitskriterium:** Ausreichend sichere Entscheidung innerhalb erwartbarer Änderungen der Umstände auf Basis des Entscheidungskalküls
- **Wirtschaftlichkeitskriterium:** Sicherstellung einer ausreichenden Rendite der Unternehmung auch unter ungünstigen Umständen
- **Transparenzkriterium:** Offenlegung der beteiligten Akteure, Informationsquellen und Daten sowie die der Bewertung zugrundeliegenden Ziele und Gewichtungen
- **Kommunikationskriterium:** Gewährleistung der Verständlichkeit für die Beteiligten durch nachvollziehbare, zugängliche und formal gut aufbereitete Ergebnisse sowie deren Vermittlung

In Nutzen-Kosten-Untersuchungen (NKU) von Investitionen in Straßeninfrastruktur kommen in Österreich regelmäßig die Verfahren der Wirkungsanalyse (WA), Nutzen – Kosten – Analyse (NKA), Nutzwertanalyse (NWA) und Kosten – Wirksamkeitsanalyse (KWA) zur Anwendung. Die Untersuchungen folgen dabei einem stark formalisierten Ablauf mit einer Definition der Systemzustände der zu untersuchen

⁷⁶ vgl. SNIZEK, S. et al. (2001) S10-22; RVS 02.01.22 Nutzen-Kosten-Untersuchungen im Verkehrswesen, 10/2010

chenden Alternativen sowie Festlegung eines Zielsystems und Konkretisierung durch Kriterien und Indikatoren. Danach werden die Auswirkungen in den einzelnen Phasen der Unternehmung (z.B. Bau, Betrieb, Katastrophe, Abbruch) auf die Kriterien und Indikatoren bestimmt und zum jeweiligen Entscheidungskalkül bzw. einer Gesamtbilanz zusammengefasst. In der Gegenüberstellung der Lebenszykluskostenanalyse mit den gängigen Verfahren der NKU zeigt sich die hohe grundsätzliche Übereinstimmung, in der Vorgehensweise der einzelnen Verfahren (Tabelle 3).

In der Wirkungsanalyse (WA) werden alle relevanten Auswirkungen einer Unternehmung sowie möglicher Alternativen qualitativ und quantitativ in Tabellenform zusammengefasst. Die Beurteilung erfolgt ohne Zusammenfassung der einzelnen Kriterien und Indikatoren zu einer entscheidungsrelevanten Maßzahl (Wertsynthese) durch eine Abwägung und verbale Beurteilung. Die Wirkungsanalyse ist somit nichts anderes als eine systematische Sammlung positiver und negativer Wirkungen auf die Ziele und Beurteilungsaspekte eines Vorhabens (z.B. Verkehr, Mensch – Raum – Umwelt, Nutzen – Kosten). Da die abschließende Empfehlung ohne formalisierte Zusammenfassung zu einem Entscheidungskalkül erfolgt, besteht ein hoher Spielraum in Gewichtung und Interpretation der einzelnen Auswirkungen.

In der Nutzwertanalyse (NWA) werden die relevanten Auswirkungen einer Unternehmung in Form von Kriterien und Indikatoren (Mengengerüst) über festgelegte Nutzenfunktionen in Zielerreichungsgrade transformiert. Diese Zielerreichungsgrade werden je nach Bedeutung durch Vergabe von Punkten oder einem Prozentsatz gewichtet und zu einem dimensionslosen Nutzwert oder Zielerreichungsgrad als Entscheidungskalkül addiert. Die Unternehmung mit dem höchsten Nutzwert ist gemäß der Nutzwertanalyse am besten geeignet, die gesteckten Ziele zu erreichen. Der Bewertungsspielraum ergibt sich in erster Linie aus der Festlegung der Nutzenfunktionen und der Gewichtung der einzelnen Beurteilungsaspekte.

Die Kosten-Wirksamkeitsanalyse (KWA) ist ähnlich der Nutzwertanalyse aufgebaut. Im Unterschied zu dieser wird der Nutzwert jedoch ohne Maßnahmenkosten ermittelt. Die Maßnahmenkosten werden stattdessen diskontiert über die Nutzungsdauer des Vorhabens verteilt (Annuität). Das Entscheidungskalkül ergibt sich aus der Division des Nutzwertes durch die diskontierten Kosten in der Dimension Zielerreichungsgrad bzw. Nutzenpunkte je Geld- und Zeiteinheit als Kostenwirksamkeitsquotient (KWQ). In der Entscheidung ist die Unternehmung mit dem höchsten KWQ vorzuziehen. Der Bewertungsspielraum ergibt sich ähnlich der NWA aus den festgelegten Nutzenfunktionen und der Gewichtung mit dem Vorteil, dass eine Bewertung der Zielerreichung im Verhältnis zu den investierten Mitteln erfolgt.

Mit der Nutzen - Kosten - Analyse (NKA) erfolgt eine möglichst vollständige Monetarisierung der relevanten Auswirkungen einer Unternehmung sowohl für die Kosten der Unternehmung, als auch die daraus resultierenden Ergebnisse in Form eines positiven oder negativen „Nutzens“. Für die Entscheidung werden das Nutzen - Kosten - Verhältnis (NKV) als Effizienzkriterium bzw. die Nutzen - Kosten Differenz (NKD) als Ertragskriterium herangezogen. In der Entscheidung ist die Unternehmung mit der höchsten Effizienz bzw. dem größten Ertrag zu bevorzugen. Der Bewertungsspielraum der NKA gegenüber den anderen Verfahren der NKU ist deutlich geringer und liegt in der Auswahl der monetarisierten Kriterien sowie in einer systematischen Über- bzw. Unterschätzung von Nutzen und Kosten. Weitere häufige Mängel in der NKU betreffen die Vernachlässigung der Finanzierungskosten sowie des Anfallszeitpunktes von Nutzen und Kosten mit dem gewählten Zinssatz als wesentlichem Einflussfaktor für das Ergebnis.

In der Lebenszykluskostenanalyse oder „life cycle cost analysis“ (LCC) werden alle relevanten Auswirkungen einer Unternehmung in ihrem Lebenszyklus in Form von Kriterien und Indikatoren monetarisiert. Die monetarisierten Auswirkungen werden nach Anfallszeitpunkt auf einen Entscheidungszeitpunkt (Kapitalwertmethode) diskontiert bzw. die sich aus der Lebensdauer der Unternehmung ergebende Annuität als Entscheidungskalkül ermittelt (Kapitel 0). Mit Teilbilanzen aus Sicht von Investor, Nutzern und Dritten/Umwelt können die Interessen der Akteure abgebildet werden. In der Entscheidung ist bei gleicher Lebensdauer die Unternehmung zu bevorzugen, welche den größten positiven Kapitalwert aufweist. Bei unterschiedlicher Lebensdauer ist das Vorhaben mit der höchsten positiven Annuität zu bevorzugen. In der Monetarisierung kommt der Nachvollziehbarkeit in der Kostenermittlung eine hohe Bedeutung zu, um den Bewertungsspielraum für subjektive Entscheidungen klein zu halten. Für die Diskontierung der monetarisierten Auswirkungen auf einen Entscheidungszeitpunkt ist weiters die Bestimmung des Anfallszeitpunktes der Kosten sowie die Ermittlung der erwarteten Lebensdauer wesentlich.

Tabelle 3: Übersicht und Beschreibung von Nutzen – Kosten - Untersuchungen⁷⁷

Beschreibung	Arbeitsschritte & Formeln	Vorgehen & Beispiel																												
<p>Wirkungsanalyse (WA): In der Wirkungsanalyse (WA) erfolgt eine systematische Darstellung sämtlicher erfassbarer qualitativer und quantitativer Auswirkungen und mit einer verbalen Beurteilung, d.h. ohne eine formalisierte Wertsynthese zu einem einzigen Entscheidungskriterium.</p> <p>Einheit: Keine [-]</p> <p>Legende: +... Verbalisierte positive Wirkung -... Verbalisierte negative Wirkung</p>	<p>Arbeitsschritte:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Definition Systemzustände & Alternativen 2. Festlegung Zielsystem 3. Ableitung Untersuchungskriterien 4. Konkretisierung mit qualitativen/quantitativen Indikatoren 5. Wirkungstabelle zu Planfällen 6. Sensitivitätsanalyse (Stabilität Ergebnisse) 7. Schlussfolgerungen & Empfehlung <p>Formeln & Berechnung: <i>Keine formalisierte Berechnung, sondern freie Abwägung und Empfehlung (vgl. Grundsatz der freien Beweiswürdigung z.B. §45, §60 AVG)</i></p>	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td></td> <td colspan="3">Varianten V₁... V_n</td> </tr> <tr> <td>Indikator I₁</td> <td>+</td> <td>-</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Indikator I₂</td> <td>0</td> <td>-</td> <td>+</td> </tr> <tr> <td>Indikator I₃</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>...</td> <td>...</td> <td>...</td> <td>...</td> </tr> <tr> <td>Indikator I_n</td> <td>+</td> <td>0</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Empfehlung</td> <td colspan="3">besser</td> </tr> </table> <p>Legende: +... besser 0... gleich -... schlechter</p> <p>Beispiel Maßnahmenbewertung: Variante 2 wird Variante 1 trotz der höheren Kosten vorgezogen, da mit dieser eine höhere Verkehrssicherheit erreicht wird.</p>		Varianten V ₁ ... V _n			Indikator I ₁	+	-	0	Indikator I ₂	0	-	+	Indikator I ₃	+	+	0	Indikator I _n	+	0	-	Empfehlung	besser		
	Varianten V ₁ ... V _n																													
Indikator I ₁	+	-	0																											
Indikator I ₂	0	-	+																											
Indikator I ₃	+	+	0																											
...																											
Indikator I _n	+	0	-																											
Empfehlung	besser																													
<p>Nutzwertanalyse (NWA): In der Nutzwertanalyse (NWA) wird jede der unterschiedlichen Wirkungsausprägungen durch Transformation (Nutzenfunktion) auf jeweils eine vergleichbare, dimensionslose Maßzahl, den Zielerreichungsgrad gebracht (normiert). Die Zielerreichungsgrade werden gewichtet addiert und ergeben einen Nutzwert [%].</p> <p>Einheit: Prozent [%], Punkte [-]</p> <p>Legende: I₁... Zustandsindikator i=1...n f(I)₁... Normierungsfunktion Z_i [-] Z_i... Normierter Zustandswert G₁... Gewichtung Indikator i=1...n K_j... Bewertungskriterien j=1...n G_j... Gewichtung Kriterien j=1...n V_k... Varianten k=1...n NW_k... Nutzwert Variante k in [%], [-]</p>	<p>Arbeitsschritte:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Definition Systemzustände & Alternativen 2. Festlegung Zielsystem 3. Ableitung Untersuchungskriterien 4. Konkretisierung mit qualitativen/quantitativen Indikatoren 5. Ermittlung der Zielerträge (Mengengerüst) 6. Zielerreichungsgrade mit Nutzenfunktion (Normierung) 7. Festlegen der Zielgewichte (Gewichtung) 8. Teilnutzwerte aus Zielgewicht und Zielerreichungsgrad 9. Ermitteln Gesamtnutzwert (Wertsynthese) 10. Sensitivitätsanalyse (Stabilität Ergebnisse) 11. Schlussfolgerungen & Empfehlung <p>Formeln & Berechnung: <i>Normierung: Z_i = f(I_i) → z.B. 0 ≤ Z_i ≤ 1</i> <i>Gewichtung K_j = ∑_{i=1}ⁱⁿ Z_i * G_i mit ∑_{i=1}ⁱⁿ G_i = 1</i> <i>Nutzwert NW_k = ∑_{j=1}^{jn} K_j * G_j mit ∑_{j=1}^{jn} G_j = 1</i> <i>Entscheidung V_k mit NW_k = max!</i></p>	<p>Einfaches Beispiel Maßnahmenbewertung:</p> <p>Unfallreduktion V1: I₁=10 UPS → f(I₁)=20/1=50% V2: I₁=15 UPS → f(I₁)=20/1=75%</p> <p>Kosten V1: I₂=3 Mio. → f(I₂)= 1-1/10=70% V2: I₂=5 Mio. → f(I₂)= 1-1/10=50%</p> <p>Gewichtungen G_j: G₁=60%; G₂=40%; → ∑=100%</p> <p>Nutzwert NW₁=0,50*0,6+0,7*0,4=0,58 NW₂=0,75*0,6+0,5*0,4=0,65</p> <p>Entscheidung: NW₁< NW₂ → Variante 2</p>																												
<p>Kosten – Wirksamkeits-Analyse (KWA): In der Kosten-Wirksamkeitsanalyse (KWA) wird wie bei der Nutzwertanalyse, allerdings unter Weglassung der Maßnahmenkosten, aus den gewichteten Zielerreichungsgraden der Nutzwert ermittelt. Dieser wird dann auf die nicht transformierten (also monetär vorliegenden) Maßnahmenkosten bezogen und ergibt einen Kostenwirksamkeitsquotienten.</p> <p>Einheit: Nutzenpunkte je Geldeinheit und Zeiteinheit [- /€*a]</p> <p>Legende: I₁... Zustandsindikator i=1...n f(I)₁... Normierungsfunktion Z_i [-] Z_i... Normierter Zustandswert G₁... Gewichtung Indikator i=1...n K_j... Bewertungskriterien j=1...n G_j... Gewichtung Kriterien j=1...n V_k... Varianten k=1...n NW_k... Nutzwert Variante k in [%], [-] C_k... Kosten Variante k [€] KWQ_k... Kostenwirksamkeitsquotient Variante k [-/€*a]</p>	<p>Arbeitsschritte:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Definition Systemzustände & Alternativen 2. Festlegung Zielsystem 3. Ableitung Untersuchungskriterien 4. Konkretisierung qualit./quantit. Indikatoren 5. Ermittlung der Zielerträge (Mengengerüst) 6. Zielerreichungsgrade mit Nutzenfunktion ohne Maßnahmenkosten (Normierung) 7. Festlegen der Zielgewichte (Gewichtung) 8. Ermitteln von Teilnutzwerten (Wertsynthese) 9. Diskontieren der Maßnahmenkosten 10. Summe der Teilnutzwerte = Gesamtnutzwert 11. Berechnung Kostenwirksamkeitsquotienten aus Nutzwert und Maßnahmenkosten (Wertsynthese) 12. Sensitivitätsanalyse (Stabilität Ergebnisse) 13. Schlussfolgerungen & Empfehlung <p>Formeln & Berechnung: <i>Normierung: Z_i = f(I_i) → z.B. 0 ≤ Z_i ≤ 1</i> <i>Gewichtung K_j = ∑_{i=1}ⁱⁿ Z_i * G_i mit ∑_{i=1}ⁱⁿ G_i = 1</i> <i>Nutzwert NW_k = ∑_{j=1}^{jn} K_j * G_j mit ∑_{j=1}^{jn} G_j = 1</i> <i>Kosten Variante C_k = ∑_{j=1}^{jn} C_j - ∑_{j=1}^{jn} G_j</i> <i>Entscheidung V_k mit KWQ_k = $\frac{NW_k}{C_k}$ = max!</i></p>	<p>Einfaches Beispiel Maßnahmenbewertung:</p> <p>Zielerreichung V₁: K₁=70%; K₂=30%; K₃=90% Zielerreichung V₂: K₁=30%; K₂=90%; K₃=70%</p> <p>Gewichtungen G_j: G₁=20%; G₂=40%; G₃=40% → ∑=100%</p> <p>Nutzwert V₁: NW₁=0,7*0,2+0,3*0,4+0,9*0,4 = 62% Nutzwert V₂: NW₂=0,3*0,2+0,9*0,4+0,7*0,4 = 70%</p> <p>Maßnahmenkosten: C₁ = 3 Mio. €; C₂ = 5 Mio. €</p> <p>Kostenwirksamkeit: KWQ₁=62/3=20,66 [%/Mio. €] KWQ₂=70/5=14,00 [%/Mio. €]</p> <p>Entscheidung: KWQ₁> KWQ₂ → Variante 1</p>																												

⁷⁷ Eigene Darstellung auf Basis von SNIZEK, S. et al. (2001); RVS 02.01.22 (10/2010) u.a.

Nutzen - Kosten - Analyse (NKA):
 In der Nutzen-Kosten-Analyse (NKA) werden Auswirkungen als Geldwert (Monetarisierung) ausgedrückt. Das Entscheidungskriterium ist das Nutzen-Kosten Verhältnis $NKV [-]$ bzw. die Nutzen - Kosten - Differenz NKD als Maßstab für die Effizienz der geplanten Projekte/Maßnahmen im Analysezeitraum.

Einheit: Nutzen-Kosten Verhältnis [-] Differenz Nutzen-Kosten [€]

Legende:
 $I_i...$ Zustandsindikator $i=1...n$
 $K_j...$ Bewertungskriterien $j=1...n$
 $f(I_i, K_j)...$ Monetarisierungsfunktion für Indikatoren $C_{e,i}; C_{a,i}$ & Kriterien $C_{e,j}; C_{a,j}$
 $V_k...$ Varianten $k=1...n$
 $p...$ Diskontierungszinssatz [%]
 $t...$ Zahlungszeitpunkt [a]
 $t_{a,}...$ Fixer Analysezeitraum [a]
 $C_{e,k}...$ Barwert Einzahlungen Variante k [€]
 $C_{a,k}...$ Barwert Auszahlungen Variante k [€]
 $NKV_k...$ Nutzen zu Kosten Verhältnis Variante k [-]
 $NKD_k...$ Nutzen - Kosten Differenz Variante k [€]

Arbeitsschritte:
 1. Definition Systemzustände & Alternativen
 2. Festlegung Zielsystem
 3. Auswahl NKA - relevanter Kriterien
 4. Auswahl NKA - relevanter Indikatoren
 5. Berechnung Indikatorwerte für die maßgebenden Systemzustände (Mengengerüster)
 6. Monetarisierung der Indikatorwerte
 7. Diskontierung der Indikatorwerte
 8. Verknüpfung der Indikatorwerte zum Entscheidungskalkül (Wertsynthese)
 9. Sensitivitätsanalyse (Stabilität Ergebnisse)
 10. Schlussfolgerungen & Empfehlung

Formeln & Berechnung:
Monetarisierung Indikatoren: $C_{e,i}; C_{a,i} = f(I_i)$
Monetarisierung Kriterien: $C_{e,j}; C_{a,j} = f(K_j)$
Variante $V_k \rightarrow$ Nutzen $C_{a,k} = \sum_{j=1}^{j=n} C_{a,j} * (1+p)^{-t}$
Kosten $C_{e,k} = \sum_{j=1}^{j=n} C_{e,j} * (1+p)^{-t}$
Entscheidung V_k mit $NKV_k = \frac{C_{a,k}}{C_{e,k}} = \max!$
Entscheidung V_k mit $NKD_k = C_{a,k} - C_{e,k} = \max!$

Kostenart	Variante V1		Variante V2		Variante V3	
	N1	K1	N2	K2	N3	K3
.....	€	€	€	€	€	€
.....	€	€	€	€	€	€
.....	€	€	€	€	€	€
NKV [-]						
NKD [€]						

Legende: N... Nutzen K... Kosten NKV = NK NKD = N - K

Einfaches Beispiel Maßnahmenbewertung:
 Monetarisierung V1: $C_{e,1} = K_1 = 1,0 \text{ Mio. €}$ $t_1 = 0$
 $C_{e,2} = K_2 = 0,5 \text{ Mio. €}$ $t_2 = 5$
 $C_{e,3} = K_3 = 0,5 \text{ Mio. €}$ $t_3 = 15$
 $C_{a,4} = K_2 = 0,1 \text{ Mio. €}$ p.a.
 $C_{a,2} = K_2 = 0,3 \text{ Mio. €}$ p.a.

Analysezeitraum: z.B. 20 Jahre (fix)
 Zinssatz $p=3\%$ $q=1+p=1,03$
 Nutzen V1: $C_{a,1} = 0,3 * (1,03^{20-1}) / (0,03 * 1,03^{20}) = 4,46 \text{ Mio. €}$
 Kosten V1: $C_{e,1} = 1,0 + 0,5 * 1,03^{10} + 0,5 * 1,03^{15} + 0,1 * (1,03^{20-1}) / (0,03 * 1,03^{20}) = 3,24 \text{ Mio. €}$
 $NKV_1 = 4,46 / 3,24 = 1,37$ $NKD_1 = 4,46 - 3,24 = 1,22$
 z.B. mit Variante V2: $NKV_2 = 1,25$; $NKD_2 = 1,0$
 z.B. Entscheidung: $NKV_1 > NKV_2 \rightarrow$ **Variante 1**

Einfache Lebenszykluskostenanalyse (LCCA):
 In der Lebenszykluskostenanalyse oder Life Cycle Cost Analysis (LCCA) werden alle Auswirkungen eines Vorhabens in seiner gesamten Lebensdauer monetär bewertet. Die LCC - Analyse kann eine Gesamtsicht (z.B. Straßenbetreiber, Nutzer, Dritte/Umwelt) beinhalten bzw. entsprechend eingeschränkt werden (z.B. Kostenseite Betreiber bzw. Investor).

Einheit: Barwert [€] Annuität [€/a] Interner Zinssatz [%]

Legende:
 $I_i...$ Zustandsindikator $i=1...n$
 $K_j...$ Bewertungskriterien $j=1...n$
 $f(I_i, K_j)...$ Monetarisierungsfunktion für Indikatoren $C_{e,i}; C_{a,i}$ & Kriterien $C_{e,j}; C_{a,j}$
 $V_k...$ Varianten $k=1...n$
 $p...$ Diskontierungszinssatz [%]
 $t...$ Zahlungszeitpunkt [a]
 $x_{a,}...$ Dauer Lebenszyklus [a]
 $C_{e,k}...$ Barwert Einzahlungen Variante k [€]
 $C_{a,k}...$ Barwert Auszahlungen Variante k [€]
 $C_{A,k}...$ Annuität Variante k im Lebenszyklus [-]

Arbeitsschritte:
 1. Definition Systemzustände & Alternativen
 2. Festlegung Zielsystem
 3. Auswahl LCC - relevanter Kriterien
 4. Auswahl LCC - relevanter Indikatoren
 5. Berechnung Indikatorwerte für die maßgebenden Phasen im Lebenszyklus (Menge, Dauer etc.)
 6. Monetarisierung der Indikatorwerte
 7. Diskontierung der Indikatorwerte und Analyse Zahlungsströme
 8. Verknüpfung der Indikatorwerte zum Entscheidungskalkül und Ermittlung Amortisationszeitpunkt (Wertsynthese)
 9. Sensitivitätsanalyse (Stabilität Ergebnisse)
 10. Schlussfolgerungen & Empfehlung

Formeln & Berechnung:
Monetarisierung Indikatoren: $C_{e,i}; C_{a,i} = f(I_i)$
Monetarisierung Kriterien: $C_{e,j}; C_{a,j} = f(K_j)$
Variante $V_k \rightarrow$ Nutzen $C_{a,k} = \sum_{j=1}^{j=n} C_{a,j} * (1+p)^{-t}$
Kosten $C_{e,k} = \sum_{j=1}^{j=n} C_{e,j} * (1+p)^{-t}$
Annuität V_k mit $C_{A,k} = (\sum_{j=1}^{j=n} C_{a,k} + \sum_{j=1}^{j=n} C_{e,k}) * \frac{p * q^x}{(q^x - 1)}$
Entscheidung V_k mit $C_{A,k} = \max!$
Bedingung V_k mit $C_{A,k} > 0!$

LEGENDE:
 $\Sigma C...$ Kosten- bzw. Nutzensumme $C_{a,}...$ Annuität Kosten bzw. Nutzen
 $C_p...$ Barwert Kosten bzw. Nutzen $x_{a,}...$ Lebensdauer

Einfaches Beispiel Maßnahmenbewertung:
 Planung & Bau V1: $C_{e,1} = K_1 = 2,0 \text{ Mio. €}$ $t_1 = 0$
 Instandsetzung 1 V1: $C_{e,2} = K_2 = 0,6 \text{ Mio. €}$ $t_2 = 10$
 Instandsetzung 2 V1: $C_{e,3} = K_3 = 0,8 \text{ Mio. €}$ $t_3 = 18$
 Abbruch V1: $C_{a,1} = K_4 = 0,4 \text{ Mio. €}$ $t_4 = 25$
 Betrieb & Admin V1: $C_{e,4} = K_5 = 0,1 \text{ Mio. €}$ p.a.
 Einnahmen V1: $C_{a,2} = K_2 = 0,4 \text{ Mio. €}$ p.a.

Dauer Lebenszyklus V1: 25 Jahre (Bau - Abbruch)
 Zinssatz $p=3\%$ $q=1+p=1,03$
 Nutzen V1: $C_{a,1} = 0,4 * (1,03^{25-1}) / (0,03 * 1,03^{25}) = 6,97 \text{ Mio. €}$
 Kosten V1: $C_{e,1} = 2,0 + 0,6 * 1,03^{10} + 0,8 * 1,03^{18} + 0,4 * 1,03^{25} + 0,1 * (1,03^{25-1}) / (0,03 * 1,03^{25}) = 4,85 \text{ Mio. €}$
 Annuität V1: $C_{A,1} = (6,97 - 4,85) * (0,03 * 1,03^{25}) / (1,03^{25} - 1) = 0,122 \text{ Mio. €/a}$
 z.B. mit Variante V2: $C_{A,1} = 0,130 \text{ Mio. €/a}$
 z.B. Entscheidung: $C_{A,2} > C_{A,1} \rightarrow$ **Variante 2**

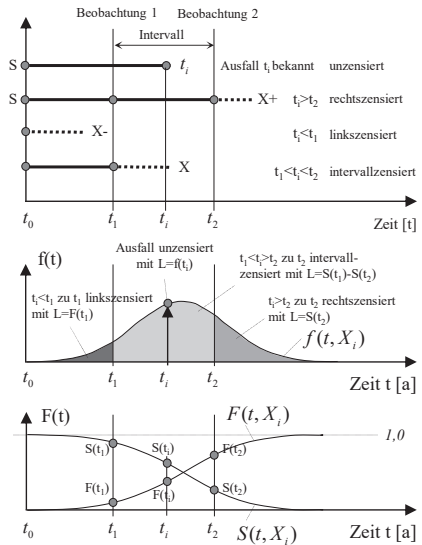
3.6.4 Parametrische SV – Analyse (Exponential, Weibull, Log-Logistisch)

In der Klasse der parametrischen Überlebensmodelle ist die Verteilung von Überlebenswahrscheinlichkeit und Fehlerrate durch die Wahl des verwendeten Modells bis auf die Parameter vollständig spezifiziert. Je nach Entwicklung der Ausfallrate kann das Modell Exponential (konstant), Weibull (konstant, zunehmend, abnehmend), Log-Normal oder Log-Logistisch (zuerst zunehmend und dann abnehmend) etc. gewählt werden. Im Gegensatz zum KM – SV oder COX – SV muss daher eine Annahme über die resultierende Verteilung getroffen werden. Inwieweit diese Annahmen zutreffen, kann über Vorinformation (Vorhergehende Untersuchungen, Laborversuche etc.), Anpassung der Modelle an Ergebnisse nicht-parametrischer oder semiparametrischer Überlebensanalysen bzw. mittels statistischer Tests überprüft werden. Wesentliche Vorteile parametrischer SV – Modelle sind der kontinuierliche Verlauf, die vollständige Spezifikation auch über den Bereich beobachteter Daten hinaus sowie der Möglichkeit zur Verwendung in Simulationen oder weiterführenden Berechnungen¹³⁴.

Die Parameterschätzung für die spezifizierten Modelle erfolgt üblicherweise auf Basis des Zusammenhangs von Ausfallsdichte $f(t)$ gleich spontaner Ausfallsrate $h(t)$ mal Überlebenswahrscheinlichkeit über die Maximum Likelihood Methode (MLE,) bei der die Parameter so gewählt werden, dass die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der beobachteten Ereignisse maximiert wird. Die Schätzung der Parameter mittels MLE ist vollständig analytisch und kann für unzensierte sowie jede Form zensierter Daten angewendet werden. Der Vorteil liegt in unverzerrten Schätzern mit zunehmender Größe des Datensatzes mit annähernd normalverteilter Varianz als Basis für die Ermittlung von Konfidenzintervallen oder statistischer Tests. Im Gegensatz zur Methode der kleinsten Quadrate (OLS) kann MLE zudem auf fast jedes Modell oder Art von Daten angewendet werden. Problematisch ist die Methode jedoch bei sehr geringer Anzahl an Beobachtungen, da die Schätzer dann stark verzerrte, zufallsbasierte Ergebnisse liefern können¹³⁵.

Gemäß Abbildung 112 kann die Wahrscheinlichkeit (Likelihood) eines Ereignisses zu einem Zeitpunkt t_i (z.B. Ausfall) durch die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f(t_i)$ ausgedrückt bzw. für eine

Maximum Likelihood (MLE) Parameterschätzung der Überlebenswahrscheinlichkeit zensierter Daten



Likelihood **unzensiert** ($t_j = t_i$ und $\delta_w = 1$, sonst $\delta_w = 0$):

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n [S(t_i) \times h(t_i)]^{\delta_{w_i}} \rightarrow \ln L(\theta) = \sum_{i=1}^n \delta_{w_i} \times \ln f(t_i)$$

Likelihood **rechtszensiert** ($t_j > t_i$ und $\delta_{w_i} = 1$, sonst $\delta_{w_i} = 0$):

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n \left[\int_{t_i}^{\infty} f(t) dt \right]^{\delta_{w_i}} = \prod_{i=1}^n S(t_i)^{\delta_{w_i}} \rightarrow \ln L(\theta) = \sum_{i=1}^n \delta_{w_i} \times \ln S(t_i)$$

Likelihood **linkszensiert** ($t_j < t_i$ und $\delta_{w_i} = 1$, sonst $\delta_{w_i} = 0$):

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n \left[\int_0^{t_i} f(t) dt \right]^{\delta_{w_i}} = \prod_{i=1}^n F(t_i)^{\delta_{w_i}} \rightarrow \ln L(\theta) = \sum_{i=1}^n \delta_{w_i} \times \ln F(t_i)$$

Likelihood **intervallzensiert** ($t_i - \Delta t < t_j < t_i$ und $\delta_{w_i} = 1$, s. $\delta_{w_i} = 0$):

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n \left[\int_{t_i - \Delta t}^{t_i} f(t) dt \right]^{\delta_{w_i}} \rightarrow \ln L(\theta) = \sum_{i=1}^n \delta_{w_i} \times \ln [S(t_i - \Delta t) - S(t_i)]$$

Likelihood **gemischte Daten** (total likelihood):

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n [f(t_i)^{\delta_{w_i}} \times S(t_i)^{\delta_{w_i}} \times F(t_i)^{\delta_{w_i}} \times [S(t_i - \Delta t) - S(t_i)]^{\delta_{w_i}}]$$

Legende:

L, \dots	Funktion likelihood	i, \dots	Beobachtung aus Sample n
θ, \dots	Parametervektor	δ_{w_i}, \dots	Indikator $j \in \{u, r, l, v\}$

Abbildung 112: Prinzip der Maximum Likelihood Parameterschätzung (MLE) für unzensierte und zensierte Überlebensdaten für die parametrische SV - Analyse

¹³⁴ KLEINBAUM, D. G. et al. (2012) S97-160; LIU, X. (2012) S144-200; MACHIN, D. et al. (2006) S91-119

¹³⁵ NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>, Zugriff am 24.04.2014

Vielzahl an Ereignissen n durch das Produkt L_i aller $f(t_i)$ faktorisiert werden. Der Logarithmus von L_i entspricht dann der Summe der Dichtefunktion aller unzensierten Ereignisse. Im Fall rechtszensierter Daten d.h. einem späteren am Ende der Beobachtungen zu t_i unbekanntem Ausfall kann nur eine Aussage über die Überlebenswahrscheinlichkeit $S(t_i)$ bis zum Zeitpunkt der Zensur gemacht werden. Erfolgt der Ausfall hingegen vor dem Beginn der Beobachtungen, wird analog die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t_i)$ herangezogen. Bei intervallzensierten Daten d.h. einem unbekanntem Ausfallszeitpunkt zwischen zwei Beobachtungen ergibt sich die „Likelihood“ aus der Differenz der Überlebenswahrscheinlichkeiten $S(t_1) - S(t_2)$ zu diesen Zeitpunkten. Über die (numerische) Maximierung des $\log L_i$ ergeben sich in der Folge die für die Beobachtungen wahrscheinlichsten Parameter in Abhängigkeit vom gewählten Modell.

Für die Ermittlung der Modellparameter für spätere Berechnungen oder Simulationen stehen grundsätzlich mehrere Methoden zur Verfügung. Eine Möglichkeit ist die direkte Parameterschätzung mittels Methode der kleinsten Quadrate (OLS) an Ergebnisse aus nicht-parametrischer Survival Analyse (Kap. 3.6.2) oder semiparametrischer Survival Analyse (Kap. 3.6.3). Abbildung 113 zeigt die Anpassung von Weibull- und Exponentialverteilung an die Ergebnisse aus den vorhergehenden Kapiteln. Der Vorteil dieser Methode liegt in der mathematisch einfachen Anwendung für fast jede Dichtefunktion (Kap. 3.5.2). Informationen zur Güte der Anpassung kann aus Vorinformationen bzw. statistisch über Bestimmtheitsmaß, Chi-Quadrat Statistik, Akaike-Informationskriterium, Kolmogorov-Smirnov-Statistik etc. gewonnen werden. Sind mehrere stetige Einflussgrößen auf die Lebensdauer zu berücksichtigen, die nicht dichotomisch oder kategorisch behandelt werden können, weist diese Herangehensweise den Nachteil auf, dass für jede Änderung der Eingangsgrößen die Parameter neu zu schätzen sind. Zudem können Informationen verloren gehen, da Einflussgrößen nur indirekt berücksichtigt und nicht im Modell direkt parametrisiert sind.

Eine vor allem für Zuverlässigkeitsanalysen häufig verwendete Möglichkeit z.B. in der Weibull – Analyse ist die Kalkulation von Rangstatistiken oder Verwendung des Kaplan–Meier Schätzers für alle Ereigniszeitpunkte. Durch Linearisierung der Verteilung über einen doppelten Logarithmus können die Einflussgrößen in Form einer Geradengleichung parametrisiert werden. Die Parameter dieser Gleichung können mittels einfacher Regression samt Konfidenzintervall (Kap. 3.7.3) direkt bestimmt werden (OLS). Durch Resubstitution sind die Parameter der ursprünglich verwendeten Dichtefunktion in (linearer) Abhängigkeit der Einflussgrößen bestimmbar. Mit der linearisierten Darstellung über den doppelten Logarithmus der Überlebenswahrscheinlichkeit und dem Logarithmus der Zeit kann auch eine optische Überprüfung der Modellwahl erfolgen. Diese Eigenschaft wurde in der Vergangenheit auch vielfach für eine zeichnerische Ermittlung der Modellparameter mittels „Wahrscheinlichkeitspapier“ verwendet.

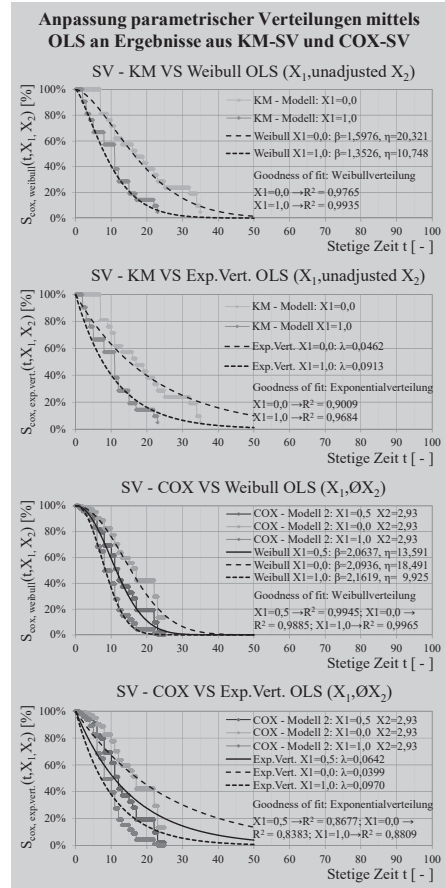


Abbildung 113: Ordinary Least Squares (OLS) Parameterschätzung für Weibull- und Exponentialverteilung für Kaplan-Meier bzw. COX Survival Analyse

In Abbildung 114 wird die rechnerische Ermittlung der Parameter der Weibull – Überlebenswahrscheinlichkeit für dieselben Daten wie zuvor gezeigt. Die auf Basis der Log-Rangstatistik berechnete mittlere Lebensdauer von 17,08 Jahren (Median=15,41 Jahre) basiert auf der Rangfolge der Lebensdauern und nicht der Zeit bis zu Ausfall oder Zensur, was vor allem bei einer geringen Anzahl an Fällen bzw. einer nicht gleichförmig über den Wertebereich des Datensets verteilten Zensur zu Verzerrungen der Parameter führen kann. Im Vergleich dazu ergibt die Parameterschätzung über Linearisierung der KM – Überlebenswahrscheinlichkeiten ohne Zensur und Anpassung des Weibull – Modells mittels OLS eine mittlere Lebensdauer von 18,00 Jahren (Median=16,02 Jahre). Gemäß dem nicht-parametrischen KM – Modell unter Berücksichtigung der Zensur (vgl. Kap. 3.6.2) ergibt sich für diesen Fall kein Mittelwert, da 9 von 21 Fällen zensiert sind, aber ein höherer Medianwert von 21,94 Jahren sowie keine Aussage über das Alter von 35 Jahren hinaus (S=44,8%). Im semi-parametrischen COX – PH Modell (vgl. Kap. 3.6.3) liegt der Medianwert mit 22,05 Jahren nur geringfügig darüber. Das an das KM – Modell mit Zensur über OLS angepasste Weibull – Modell ergibt hingegen eine mittlere Lebensdauer von 45,75 Jahren bei einem Medianwert von 26,88 Jahren.

Generell unterschätzt die mittels Log-Rangstatistik oder OLS ermittelte Lebensdauer die tatsächliche Lebensdauer umso stärker, je höher der Anteil rechtszensierter Daten ist, da die Zensur bzw. die Lebensdauer nach dem Zeitpunkt der Zensur im Gegensatz zu den Modellen mit Zensur (z.B. KM mit Zensur oder Cox) nicht berücksichtigt ist. Bei der Anpassung an linearisierte Daten mittels OLS können vor allem bei geringer Fallzahl ebenfalls Verzerrungen aufgrund der Linearisierung auftreten. Die Überschätzung der Lebensdauer für das mittels OLS gefittete Weibull – Modell (für das KM – Modells mit Zensur) gegenüber den Ergebnissen ohne Fitting bzw. dem COX – Modell oder der Parameterschätzung mittels MLE ist im konkreten Fall vor allem der geringen Fallzahl sowie der Datenstruktur und den sich daraus ergebenden Modellparametern ($\beta=0,8372 < 1,0$) sowie dem in der Folge asymptotischen Verlauf der Überlebenswahrscheinlichkeit geschuldet. Generell ist daher zum Test der Sensitivität der Ergebnisse die Anwendung unterschiedlicher Überlebensmodelle zu empfehlen¹³⁶.

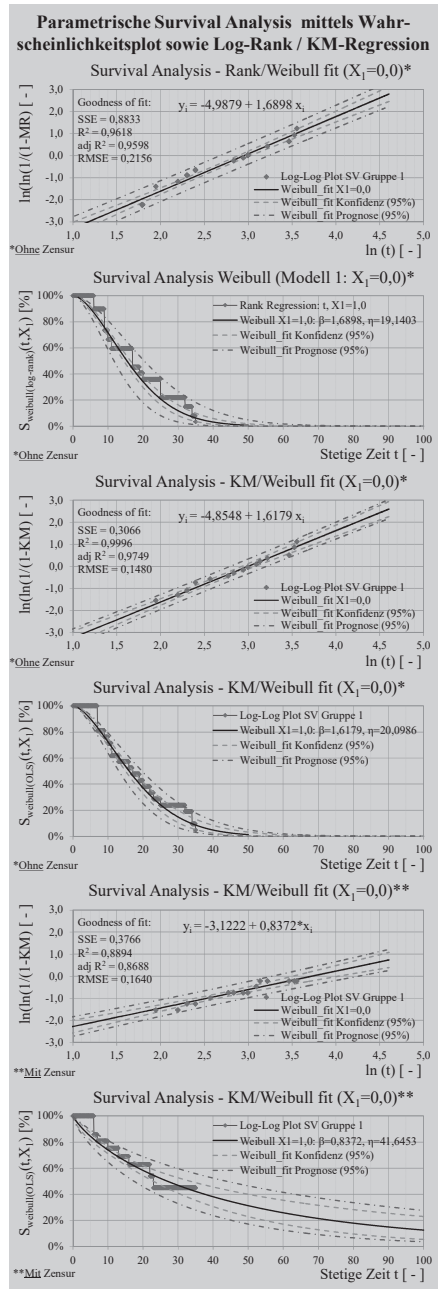


Abbildung 114: Parametrische Analyse mit Wahrscheinlichkeitsplot bzw. Linearisierung und Log-Rang bzw. KM - Regression und OLS ohne bzw. mit Zensur

¹³⁶ GUO, S. (2010) S98-115

Die parametrische Survival Analyse mittels Maximum Likelihood Schätzer (MLE) der Parameter basiert ebenfalls auf dem doppelten Logarithmus der Überlebenswahrscheinlichkeit und Parametrisierung der Geradengleichung für die Einflussgrößen gemäß Tabelle 18 im „Proportional Hazard (PH)“ und „Accelerated Failure Time (ATF)“ Modell. Unter der PH - Annahme ist das Verhältnis der spontanen Ausfallraten $h(t, X_i)$ für eine gegebene Größe der Einflussvariablen bzw. zwischen Gruppen über die Zeit konstant, wobei die Ausfallrate selbst konstant bleiben kann (Exponential) aber nicht muss (Weibull). Im beschleunigten Alterungsmodell (AFT) wird die Veränderung der Zeit bis zum Ausfall in Abhängigkeit der Einflussgrößen beschrieben, wobei das Verhältnis der Zeit bis zum Ausfall eines gleichen Anteils konstant bleibt. Die Ermittlung der Parameter erfolgt mittels MLE, wobei sich die Likelihood des Eintritts der einzelnen Ereignisse gemäß Abbildung 112 auf Basis der kodierten Einflussgrößen ergibt. Durch Maximierung der Log - Likelihood können die Parameter der Geradengleichung β_i (PH-Modell) bzw. α_i (AFT-Modell) sowie Resubstitution die Parameter der verwendeten Modelle (λ, p) bestimmt werden.

Abbildung 115 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen für PH und AFT Modelle auf Basis der Exponential- und Weibullverteilung sowie dem log-logistischen AFT - Modell ohne bzw. mit Maßnahmen (TRT=0 bzw. 1). Der Median der Lebensdauer für den Fall mit Maßnahmen ergibt sich zu 27,65 Jahre (Exponential) bzw. 25,72 (Weibull) sowie 23,52 (Log-Logistisch) und ist gemäß den AFT - Modellen um den Faktor 4,6 bzw. 3,55 sowie 3,54 mal so hoch im Vergleich zum Fall ohne Maßnahmen. Für den Vergleich von Weibull- und Exponentialmodell kann untersucht werden, ob der Parameter p signifikant von 1,0 abweicht, da für diesen Fall beide Modelle übereinstimmen (was jedoch hier nicht der Fall ist). Aufgrund der hohen Übereinstimmung mit KM und COX - Modellen sowie dem Akaike Informationskriterium (AIC) zeigt das log-logistische Modell die beste Anpassung im Bereich der Beispilsdaten und ist außerhalb stark modellabhängig. Bei Erweiterung um Zustandsmodelle ergeben sich zusätzliche Möglichkeiten der Analyse, die in Kap. 3.6.5 angeführt sind. Für weiterführende Erklärungen zur parametrischen Survival Analyse wird auf die einschlägige Literatur verwiesen¹³⁷.

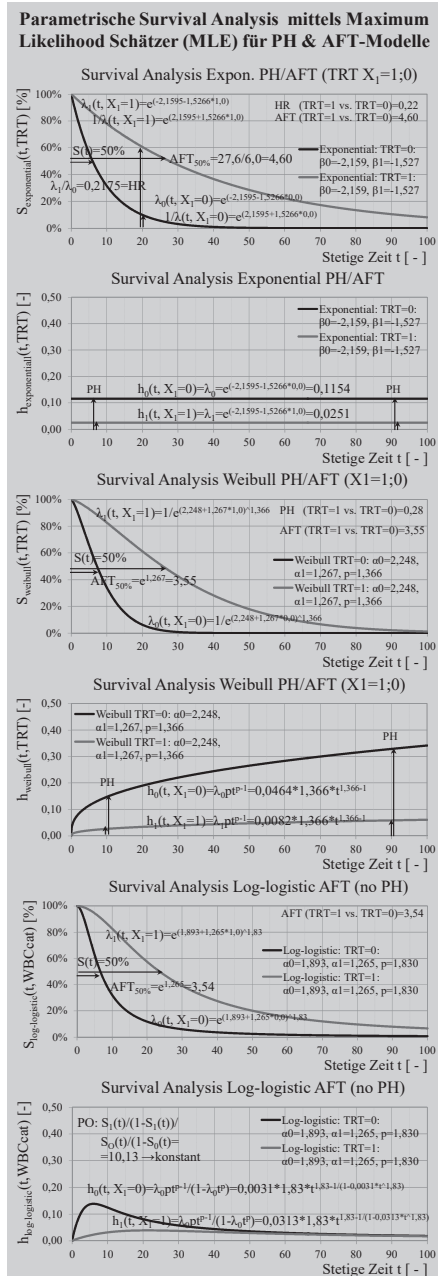


Abbildung 115: Maximum Likelihood Parameterschätzung (MLE) für Exponential-, Weibull & Log-logistische PH/AFT Modelle der Survival Analyse

¹³⁷ KLEINBAUM, D. G. et al. (2012) S97-160; LIU, X. (2012) S144-200; MACHIN, D. et al. (2006) S91-119

Tabelle 18: Kurzzusammenfassung parametrische SV - Analyse (Weibull, Exponential, Log-Logistic)¹³⁸

Beschreibung	Formeln	Beispiele & Anwendung																																																																																																																																																																																																																																																												
<p>Parametrische Survival Analysis Modelle (für zensierte Daten) und erklärende Variablen:</p> <p>Im Gegensatz zu in ihrer Form unspezifizierten (KM-SV) oder in Bezug auf die Relation der Risiken spezifizierten (COX-SV) Modellen ist die Form parametrischer Modelle durch eine Ausfallverteilung (mit Parameter in Abhängigkeit der Einflussgrößen) vollständig spezifiziert. Häufig in der SV verwendete Modelle sind Exponential, Weibull, Log-logistisch, Lognormal oder generalisierte Gammaverteilungen. Kann die Form der Dichtefunktion $f(t)$, der kumulierten Überlebenswahrscheinlichkeit $S(t)$ oder der spontanen Fehlerrate $h(t)$ aufgrund von Vorinformationen, vergleichbaren Untersuchungen oder Modellannahmen zutreffend bestimmt werden, ist das parametrische SV - Modell vollständig über den gesamten Wertebereich im Gegensatz zu KM-SV oder COX-SV bestimmt. Mit parametrischen Modellen können sowohl proportionale Risikoefflüsse (Multiplikativ nach Überlebenswahrscheinlichkeit) sowie beschleunigte Alterung (Multiplikativ nach Überlebenszeit) in Form von „accelerated failure time (AFT)“ - Modellen abgebildet werden.</p> <p>Beispiel:</p> <p>Zuverlässigkeitsanalyse unter Dauerbeanspruchung, Modellierung der stochastisch verteilten Lebensdauer mit/ohne Einflussgrößen etc.</p> <p>Legende:</p> <p>$t...$ Bestimmter Zeitpunkt [-] $T...$ Lebensdauer bzw. Dauer bis Ereignis [-] $t(t)...$ Zeitpunkte mit Anlagenausfall [-] $k...$ Unterscheidbare Zeitpunkte an denen Anlagen ausfallen [-] $h(t)...$ Basisfunktion Ausfallrate aller erklärenden Größen $x_i=0$ mit >0 $X_i...$ Erklärende Zufallsvariablen $e...$ Eulersche Zahl ($e=2,7182818$) $\beta_i...$ Regressionsfaktoren (konstant) $f(t)...$ Dichtefunktion Ausfälle $S(t)...$ Wahre Überlebensfunktion mit Angabe der Wahrscheinlichkeit bis zu Zeitpunkt t zu überleben $h(t)...$ Spontane Ausfallrate pro Zeiteinheit bei Überleben bis zum Zeitpunkt t $H(t)...$ Kumulatives Hazard =$-\log S(t)$ HR_{t_i} Hazard Ratio (Verhältnis der Ausfallraten) $L_i...$ Partielle Wahrscheinlichkeit (likelihood) für das Ereignis i $L_p(\beta)...$ Partielle Wahrscheinlichkeit β $\delta_i...$ Zensurvariable (1 = Event; 0 = Zensur) $R(t)...$ Elemente/Anlagen unter Risiko zu Zeitpunkt t</p>	<p>Allgemeine Form:</p> $S_i(t, X_i) = P(T, X_i) = \int_0^t f(u) du \rightarrow$ $S_i(t, X_i) = \exp\left(-\int_0^t f(u) du\right) = \frac{f(t, X_i)}{h(t, X_i)}$ <p>Exponentielle Survival Analysis:</p> $S(t, X_i) = e^{(-\lambda t)} \rightarrow$ $h_i(t, X_i) = \frac{f(t, X_i)}{S(t, X_i)} = \lambda e^{(-\lambda t)} = \lambda$ $PH: \lambda(t, X_i) = e^{(\beta_0 + \beta_i X_i)}$ $HR(X_i) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_i X_i}}{e^{\beta_0 + \beta_i 0}} = e^{\beta_i X_i} \rightarrow \text{proportional}$ $\rightarrow t = [-\ln(S(t))] e^{\beta_0 + \beta_i X_i}$ <p>Weibull Survival Analysis:</p> $S(t, X_i) = \exp(-\lambda t^p) \rightarrow$ $\ln[-\ln(S(t))] = \ln(\lambda) + p \ln(t) \rightarrow \text{Geradengl.}$ $PH: \lambda = e^{(\beta_0 + \beta_i X_i)} \rightarrow$ $HR = \frac{e^{\beta_0 + \beta_i X_i} \cdot p t^{p-1}}{e^{\beta_0 + \beta_i 0} \cdot p t^{p-1}} = e^{\beta_i X_i} \rightarrow \text{proportional}$ $\rightarrow t = [-\ln(S(t))]^{1/p} e^{\beta_0 + \beta_i X_i}$ <p>Log - Logistische Survival Analysis:</p> $S(t, X_i) = \frac{1}{1 + \lambda t^p} \rightarrow 1 - S(t, X_i) = \frac{\lambda t^p}{1 + \lambda t^p}$ $ODDS: \frac{1 - S(t)}{S(t)} = \frac{P(T \leq t)}{P(T > t)} = \lambda t^p \rightarrow$ $\ln(\lambda) + p \ln(t) \rightarrow \text{Geradengleichung}$ $\ln\left[\frac{1 - S(t)}{S(t)}\right] \text{ VS } \ln(t) \text{ linear with Steigung } -p$ $PO: \lambda = e^{(\beta_0 + \beta_i X_i)} \rightarrow t = \left[\frac{1 - S(t)}{S(t)}\right]^{1/p} e^{\beta_0 + \beta_i X_i}$ <p>Beschleunigte Alterungsmodelle (Accelerated Failure Time Models AFT):</p> $S_2(t) = S_1(t) \text{ für } t \geq 0 \rightarrow \gamma = \text{Multiplikator}$ <p>mit $\gamma = e^{\alpha X_i} \rightarrow S_2 = S_1([\alpha^{\gamma} X_i])$</p> $\rightarrow t = [-\ln(S(t))]^{1/\gamma} \frac{1}{\lambda^{1/\gamma}}$ $AFT: \frac{1}{\lambda^{1/\gamma}} = e^{(\alpha_0 + \alpha_i X_i)} \rightarrow t = [-\ln(S(t))]^{1/\gamma} e^{\alpha_0 + \alpha_i X_i}$ $\rightarrow \text{Exponential } p = 1; \text{ Weibull } p > 0$ $S(t; X_i) = \frac{1}{1 + \lambda t^p} = \frac{1}{1 + (\lambda^{1/p} t)^p}$ $\rightarrow t = \left[\frac{1 - S(t)}{S(t)} - 1\right]^{1/p} \frac{1}{\lambda^{1/p}}$ $AFT: \frac{1}{\lambda^{1/p}} = e^{(\alpha_0 + \alpha_i X_i)} \rightarrow t = \left[\frac{1}{S(t; X_i)} - 1\right]^{1/p} e^{\alpha_0 + \alpha_i X_i}$ $\rightarrow \text{log-logistic}$	<p>Modell nach Gruppenstatus (TRT=$X_i=1;0$)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>t</th> <th>TRT</th> <th>D</th> <th>Likelihood</th> <th>Exp</th> <th>Ln L</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0.10281</td><td></td><td>-2.27487</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0.10281</td><td></td><td>-2.27487</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>1</td><td>0.09161</td><td></td><td>-2.39026</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>1</td><td>0.09161</td><td></td><td>-2.39026</td></tr> <tr><td>3</td><td>0</td><td>1</td><td>0.08162</td><td></td><td>-2.50564</td></tr> <tr><td>4</td><td>0</td><td>1</td><td>0.07273</td><td></td><td>-2.62102</td></tr> <tr><td>4</td><td>0</td><td>1</td><td>0.07273</td><td></td><td>-2.62102</td></tr> <tr><td>5</td><td>0</td><td>1</td><td>0.06480</td><td></td><td>-2.73641</td></tr> <tr><td>5</td><td>0</td><td>1</td><td>0.06480</td><td></td><td>-2.73641</td></tr> <tr><td>6</td><td>1</td><td>1</td><td>0.02157</td><td></td><td>-3.83652</td></tr> <tr><td>6</td><td>1</td><td>1</td><td>0.02157</td><td></td><td>-3.83652</td></tr> <tr><td>6</td><td>1</td><td>1</td><td>0.02157</td><td></td><td>-3.83652</td></tr> <tr><td>6</td><td>1</td><td>0</td><td>0.86035</td><td></td><td>-0.15042</td></tr> <tr><td>7</td><td>1</td><td>1</td><td>0.02103</td><td></td><td>-3.86159</td></tr> <tr><td>8</td><td>0</td><td>1</td><td>0.04584</td><td></td><td>-3.08256</td></tr> <tr><td>8</td><td>0</td><td>1</td><td>0.04584</td><td></td><td>-3.08256</td></tr> <tr><td>8</td><td>0</td><td>1</td><td>0.04584</td><td></td><td>-3.08256</td></tr> <tr><td>8</td><td>0</td><td>1</td><td>0.04584</td><td></td><td>-3.08256</td></tr> <tr><td>9</td><td>1</td><td>0</td><td>0.79802</td><td></td><td>-0.22563</td></tr> <tr><td>10</td><td>1</td><td>1</td><td>0.01951</td><td></td><td>-3.93679</td></tr> <tr><td>10</td><td>1</td><td>0</td><td>0.78726</td><td></td><td>-0.2507</td></tr> <tr><td>11</td><td>0</td><td>1</td><td>0.75899</td><td></td><td>-0.27577</td></tr> <tr><td>11</td><td>0</td><td>1</td><td>0.03243</td><td></td><td>-3.42871</td></tr> <tr><td>11</td><td>0</td><td>1</td><td>0.03243</td><td></td><td>-3.42871</td></tr> <tr><td>12</td><td>0</td><td>1</td><td>0.02889</td><td></td><td>-3.5441</td></tr> <tr><td>12</td><td>0</td><td>1</td><td>0.02889</td><td></td><td>-3.5441</td></tr> <tr><td>13</td><td>1</td><td>1</td><td>0.01810</td><td></td><td>-4.012</td></tr> <tr><td>15</td><td>0</td><td>1</td><td>0.02044</td><td></td><td>-3.89025</td></tr> <tr><td>16</td><td>1</td><td>1</td><td>0.01679</td><td></td><td>-4.08721</td></tr> <tr><td>17</td><td>1</td><td>0</td><td>0.65300</td><td></td><td>-0.42618</td></tr> <tr><td>17</td><td>0</td><td>1</td><td>0.01623</td><td></td><td>-4.12102</td></tr> <tr><td>19</td><td>1</td><td>0</td><td>0.62106</td><td></td><td>-0.47632</td></tr> <tr><td>20</td><td>1</td><td>0</td><td>0.60569</td><td></td><td>-0.50139</td></tr> <tr><td>22</td><td>1</td><td>1</td><td>0.01444</td><td></td><td>-4.23763</td></tr> <tr><td>22</td><td>0</td><td>1</td><td>0.00911</td><td></td><td>-4.69794</td></tr> <tr><td>23</td><td>1</td><td>1</td><td>0.01408</td><td></td><td>-4.2627</td></tr> <tr><td>23</td><td>0</td><td>1</td><td>0.00812</td><td></td><td>-4.81333</td></tr> <tr><td>25</td><td>1</td><td>0</td><td>0.53433</td><td></td><td>-0.62674</td></tr> <tr><td>32</td><td>1</td><td>0</td><td>0.44833</td><td></td><td>-0.80223</td></tr> <tr><td>34</td><td>1</td><td>0</td><td>0.42640</td><td></td><td>-0.85237</td></tr> <tr><td>35</td><td>1</td><td>0</td><td>0.41585</td><td></td><td>-0.87744</td></tr> </tbody> </table> <p>PH - Form: $\beta_0 = -2.1595$ s.e. = 0.2182 $p < 0.001$ $\beta_1 = -1.5266$ s.e. = 0.3984 $p < 0.001$ $HR = e^{-1.5266 \cdot 1.195} = 0.2173$ $\lambda = \exp(\beta_0 + \beta_1 \cdot TRT) = 0.0251; 0.1154$ $\sum \ln L = \text{max!}$ (für β_0, β_1)</p> <p>Survival Analysis Expon. AFT (TRT Xi=1,0) plot showing survival probability over time for two groups. The AFT parameters are gamma=27.6/6.0=4.60. The plot shows two curves: Exponential TRT=0 (beta0=-2.159, beta1=1.527) and Exponential TRT=1 (beta0=-2.159, beta1=-1.527). The AFT parameters are gamma=27.6/6.0=4.60.</p>	t	TRT	D	Likelihood	Exp	Ln L	1	0	1	0.10281		-2.27487	1	0	1	0.10281		-2.27487	2	0	1	0.09161		-2.39026	2	0	1	0.09161		-2.39026	3	0	1	0.08162		-2.50564	4	0	1	0.07273		-2.62102	4	0	1	0.07273		-2.62102	5	0	1	0.06480		-2.73641	5	0	1	0.06480		-2.73641	6	1	1	0.02157		-3.83652	6	1	1	0.02157		-3.83652	6	1	1	0.02157		-3.83652	6	1	0	0.86035		-0.15042	7	1	1	0.02103		-3.86159	8	0	1	0.04584		-3.08256	8	0	1	0.04584		-3.08256	8	0	1	0.04584		-3.08256	8	0	1	0.04584		-3.08256	9	1	0	0.79802		-0.22563	10	1	1	0.01951		-3.93679	10	1	0	0.78726		-0.2507	11	0	1	0.75899		-0.27577	11	0	1	0.03243		-3.42871	11	0	1	0.03243		-3.42871	12	0	1	0.02889		-3.5441	12	0	1	0.02889		-3.5441	13	1	1	0.01810		-4.012	15	0	1	0.02044		-3.89025	16	1	1	0.01679		-4.08721	17	1	0	0.65300		-0.42618	17	0	1	0.01623		-4.12102	19	1	0	0.62106		-0.47632	20	1	0	0.60569		-0.50139	22	1	1	0.01444		-4.23763	22	0	1	0.00911		-4.69794	23	1	1	0.01408		-4.2627	23	0	1	0.00812		-4.81333	25	1	0	0.53433		-0.62674	32	1	0	0.44833		-0.80223	34	1	0	0.42640		-0.85237	35	1	0	0.41585		-0.87744
t	TRT	D	Likelihood	Exp	Ln L																																																																																																																																																																																																																																																									
1	0	1	0.10281		-2.27487																																																																																																																																																																																																																																																									
1	0	1	0.10281		-2.27487																																																																																																																																																																																																																																																									
2	0	1	0.09161		-2.39026																																																																																																																																																																																																																																																									
2	0	1	0.09161		-2.39026																																																																																																																																																																																																																																																									
3	0	1	0.08162		-2.50564																																																																																																																																																																																																																																																									
4	0	1	0.07273		-2.62102																																																																																																																																																																																																																																																									
4	0	1	0.07273		-2.62102																																																																																																																																																																																																																																																									
5	0	1	0.06480		-2.73641																																																																																																																																																																																																																																																									
5	0	1	0.06480		-2.73641																																																																																																																																																																																																																																																									
6	1	1	0.02157		-3.83652																																																																																																																																																																																																																																																									
6	1	1	0.02157		-3.83652																																																																																																																																																																																																																																																									
6	1	1	0.02157		-3.83652																																																																																																																																																																																																																																																									
6	1	0	0.86035		-0.15042																																																																																																																																																																																																																																																									
7	1	1	0.02103		-3.86159																																																																																																																																																																																																																																																									
8	0	1	0.04584		-3.08256																																																																																																																																																																																																																																																									
8	0	1	0.04584		-3.08256																																																																																																																																																																																																																																																									
8	0	1	0.04584		-3.08256																																																																																																																																																																																																																																																									
8	0	1	0.04584		-3.08256																																																																																																																																																																																																																																																									
9	1	0	0.79802		-0.22563																																																																																																																																																																																																																																																									
10	1	1	0.01951		-3.93679																																																																																																																																																																																																																																																									
10	1	0	0.78726		-0.2507																																																																																																																																																																																																																																																									
11	0	1	0.75899		-0.27577																																																																																																																																																																																																																																																									
11	0	1	0.03243		-3.42871																																																																																																																																																																																																																																																									
11	0	1	0.03243		-3.42871																																																																																																																																																																																																																																																									
12	0	1	0.02889		-3.5441																																																																																																																																																																																																																																																									
12	0	1	0.02889		-3.5441																																																																																																																																																																																																																																																									
13	1	1	0.01810		-4.012																																																																																																																																																																																																																																																									
15	0	1	0.02044		-3.89025																																																																																																																																																																																																																																																									
16	1	1	0.01679		-4.08721																																																																																																																																																																																																																																																									
17	1	0	0.65300		-0.42618																																																																																																																																																																																																																																																									
17	0	1	0.01623		-4.12102																																																																																																																																																																																																																																																									
19	1	0	0.62106		-0.47632																																																																																																																																																																																																																																																									
20	1	0	0.60569		-0.50139																																																																																																																																																																																																																																																									
22	1	1	0.01444		-4.23763																																																																																																																																																																																																																																																									
22	0	1	0.00911		-4.69794																																																																																																																																																																																																																																																									
23	1	1	0.01408		-4.2627																																																																																																																																																																																																																																																									
23	0	1	0.00812		-4.81333																																																																																																																																																																																																																																																									
25	1	0	0.53433		-0.62674																																																																																																																																																																																																																																																									
32	1	0	0.44833		-0.80223																																																																																																																																																																																																																																																									
34	1	0	0.42640		-0.85237																																																																																																																																																																																																																																																									
35	1	0	0.41585		-0.87744																																																																																																																																																																																																																																																									

¹³⁸ Eigene Darstellung u. a. auf Basis von KLEINBAUM, D. G. et al. (2012) S97-160; LIU, X. (2012) S144-200; MACHIN, D. et al. (2006) S91-119

4.3 Pavement Management auf Projektebene

4.3.1 Übersicht Pavement Management Systeme (PMS)

Ein neuer Straßenoberbau ermöglicht die schnelle und sichere Abwicklung des Verkehrs sowie eine effiziente Abtragung von Verkehrslasten in den Untergrund. Während der Bestandsdauer ist der Straßenoberbau jedoch Beanspruchungen aus Verkehr und Witterung ausgesetzt, die nach Dimensionierung, Bauweise, Art der Ausführung sowie tatsächlichen Beanspruchung zu einer fortschreitenden Schädigung bzw. Auftritt von Schadensmerkmalen führen. Der zeitliche Fortschritt der Schädigung nach Art, Ausmaß und Schwere der auftretenden Schadensmerkmale zeigt maßgebende Beanspruchungen, hat Auswirkungen auf Erreichbarkeit, Verkehrssicherheit und verbleibende Restlebensdauer. Die Anwendung von Instandhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen kann den Schadensfortschritt verzögern, den Zustand verbessern und die Restlebensdauer erhöhen. Für einen effizienten Einsatz knapper Ressourcen ergeben sich aus Sicht des Betreibers auf Netzebene die Fragen nach Zustandsverteilung, Anlagevermögen, Restlebensdauer, Verfügbarkeit und Finanzbedarf für optimierte Investitionsstrategien (Kap. 4.1, Kap. 4.2). Auf Projektebene sind die Fragen nach Zustand, Maßnahmenwahl, Eingriffszeitpunkt, Bauloslänge, Verkehrsführung, Risiko und Projektkosten zu beantworten (Kap. 4.3).

Die Beantwortung dieser Fragen kann entweder manuell auf Basis von Erfahrungen und Schätzwerten für den konkreten Einzelfall bzw. darauf aufbauend kumulativ auf Netzebene oder systematisch (teil-automatisiert) mit Hilfe entsprechender Methoden und Systeme erfolgen. Ein Pavement Management System (PMS) erlaubt im besten Fall eine Beantwortung dieser Fragen auf Basis eines Lebenszyklusmodells. Ausgehend von Kap. 3.1.4 umfasst ein solches System die Phasen Planung, Bau, Betrieb und Instandsetzung bis zu Abbruch und Entsorgung. Aus Sicht der Erhaltung umfasst ein solches System die Erfassung von Anlagenbestand und Zustandsverteilung, Zustandsbewertung und Prognose, Maßnahmenkosten, Wirkung und Lebensdauer, Optimierung der Investitionsstrategien, Bauprogramm und Budget, Ausschreibung und Umsetzung bis hin zu Ergebnisprüfung und systematischem Benchmarking (Abbildung 214). Eine Gesamtbetrachtung unter Einbeziehung der Auswirkungen auf Nutzer (Verfügbarkeit, Unfallrisiko, Staukosten etc.) und Umwelt (Lärm, Schadstoffe, Unfallkosten) gewinnt in Europa ebenfalls an Bedeutung.¹⁸⁶

Die ersten Ansätze heutiger Standards im PMS stammen aus den USA ausgehend von den AASHO Road Tests ab 1955, systematischen abschnittswisen Zustandserfassungen und aggregierter Ratings (PSI, PSR) ab 1960 bis hin zu Beschreibungen und Systematisierung bestehender Ansätze ab 1970¹⁸⁷. Mit Entwicklung der ersten PCs ab 1981 wurde es möglich, die erforderlichen Berechnungen im PMS auch kostengünstig außerhalb von Forschungszentren durchzuführen. Wesentliche Meilensteine in der weiteren Entwicklung des PMS waren die u.a. von der Weltbank finanzierten Highway Design and Maintenance Standards HDM III (1987) und HDM IV (2000) bzw. HDM IV 2.0 (2006) mit hoher Verbreitung aufgrund geringer Kosten¹⁸⁸. Parallel dazu haben sich eine Reihe anderer PMS - Ansätze auf Basis ähnlicher Methoden mit regionaler, nationaler und internationaler Verbreitung und unterschiedlichem Entwicklungsstand wie z.B. PAVER™ (CSU), dTIMS (Deighton), AgileAssets (AgileAssets, Inc.) etabliert.¹⁸⁹ Im deutschsprachigen Raum wurden zuerst Zustandserfassungen (zwischen 1980 bis 1990) und erst später Pavement Management Systeme (zwischen 1990 bis 2000) wie z.B. ViaPMS eingeführt bzw. adaptiert.¹⁹⁰

Die üblichen Schritte in einem PMS sind Bestands- und Zustandserfassung, Zustandsbewertung und Prognose, Maßnahmenplanung, Optimierung mit Kosten und erforderlichem Investitionsbudget auf Projekt- und Netzebene. Die Abstimmung mit erforderlichen Neu- und Ausbaumaßnahmen, Kunstbauten im Bestand („cross asset“) sowie lokalen Erfordernissen erfolgt meist manuell durch Personal des Betreibers und/oder externe Konsulenten. Das Budget ist üblicherweise vorgegeben, wodurch es zu Verschiebung bzw. Vorziehung von Maßnahmen kommen kann. Ausgewählte Projekte und Maßnahmen werden je nach

¹⁸⁶ vgl. LINK, H. et al. (1999, 2009); HERRY, M. et al. (2003); EC 2011, KORZHENEVYCH, A. et al. (2014)

¹⁸⁷ vgl. HARB (1956); CAREY JR, W.N. et al. (1960); HAAS, R. C. G et al. (1970); HUDSON, W. R. et al. (1976)

¹⁸⁸ vgl. WATANATADA, T. et al. (1987); KERALL, H. G. R. et al. (2006)

¹⁸⁹ vgl. MIZUSAWA, D. (2009); HAAS, R. et al. (1994, 2015)

¹⁹⁰ vgl. WENINGER-VYUCUDIL, A. (2003); HOFFMANN, M. (2006); WENINGER-VYUCUDIL, A. et al. (2009)

Projektvolumen und Vergaberichtlinien (Richtlinie 2014/24/EU; BVerG 2006) einzeln bzw. gebündelt (Rahmenverträge) ausgeschrieben und in Sonderfällen (z.B. Gefahr im Verzug) direkt vergeben. Die Vergabe kann bei festgelegten Anforderungen nach geringstem Angebotspreis bzw. dem insgesamt besten Angebot erfolgen. Die Umsetzung und Überwachung der Baumaßnahmen bis zur Übernahme der Leistungen erfolgt gemäß nationalen Richtlinien und den festgelegten Vertragsbedingungen meist ebenfalls durch Personal des Betreibers bzw. externe Konsulenten. Die Einpflege der Daten aus umgesetzten Projekten schließt den PMS - Zyklus und erlaubt ein systematisches Benchmarking und Feedback (Abbildung 214).

Wesentliches Kennzeichen üblicher PMS ist die abschnittsweise visuelle Zustandserfassung bzw. die Bildung kurzer Messabschnitte (z.B. 25-50 m) aus kontinuierlichen Messungen (z.B. Längsebeneheit) bzw. kürzeren Messintervallen (z.B. Griffigkeit alle 10-15 cm). In einem nächsten Schritt werden diese Messabschnitte einer Erfassung zu längeren homogenen Abschnitten mit ähnlichem Zustand und typischen Längen von 1-5 km zusammengefasst. Je Schadensmerkmal steht so genau ein Zustandswert bzw. zusammen mit einem gemittelten Alter der Asphaltdecke zwei Zustandswerte für die Prognose zur Verfügung, was eine einfache Berechnung mittels Verschiebung oder Skalierung der Masterfunktion erlaubt. Tatsächlich sind diese Vereinfachungen ein Artefakt aus den Anfängen des PMS vor 1970 bzw. der Verfügbarkeit leistungsfähiger Computer. Trotz der stetigen Entwicklungen der Messsysteme hin zu höherer Erfassungsfrequenz und genaueren Messwerten werden diese Methodik und ihre Folgen in der Literatur weitgehend ignoriert und in der Praxis kritiklos übernommen. Wie in Kap. 3.7 bzw. Kap. 4.3.7 gezeigt, führen diese Vereinfachungen jedoch zu erheblichem Informationsverlust, systematischen Verzerrungen der Prognosen auf Abschnitts- und Netzebene bzw. minimieren den Nutzen moderner Messsysteme.¹⁹¹

Ebenfalls aus den Anfängen des PMS stammt die bis heute verwendete Methode einer leicht abgewandelten Kosten-Wirksamkeits-Analyse KWA (vgl. Kap. 3.2.3), die eine gleichzeitige Berücksichtigung unterschiedlicher Schadensmerkmale im Vergleich zu den Maßnahmenkosten pro Jahr erlaubt. Da die Messwerte der einzelnen Schadensmerkmale in unterschiedlichen Einheiten vorliegen und nicht direkt aggregiert werden können, erfordert die KWA eine Transformation (Bewertungsschlüssel) in dimensionslose Größen (z.B. Noten, Punktesysteme). Diese können dann mittels Gewichtung oder anderen Verknüpfungsregeln zu Teil- oder Gesamtzustandswerten aggregiert werden. Die Differenzfläche zwischen der zeitlichen Entwicklung dieses Gesamtzustandes ohne bzw. mit Maßnahmen wird dabei vereinfacht als „Nutzen“ der Maßnahmen angesehen. Die optimale Strategie ergibt sich dann aus der Maßnahmenfolge mit der höchsten Effektivität aus dem Verhältnis von „Nutzen“ zu Kosten pro Jahr im Betrachtungszeitraum. Der Budgetbedarf errechnet sich entweder direkt aus der Umsetzung der resultierenden Maßnahmen bzw. der Abschichtung der Maßnahmen nach Prioritäten bzw. aus der Multiplikation des „Nutzens“ mit der Anzahl der Nutzer am Streckenabschnitt und entsprechender Reihung¹⁹². Im deutschsprachigen Raum wurden Methodik und Software mit entsprechenden Anpassungen zwei bis drei Jahrzehnte später weitgehend übernommen. Abbildung 215 gibt eine vereinfachte Übersicht am Beispiel des Systems ViaPMS, dass in dieser Form seit ca. 2003 in Österreich auf Straßen A+S sowie in einigen Bundesländern auf Straßen B+L im Einsatz ist.¹⁹³

Ebenso wie die Methode der homogenen Abschnitte hatte die verwendete KWA oder Marginal Cost Effectiveness (MCE) das Ziel die Komplexität zu reduzieren und die Datenmenge bzw. Aufgabe für damalige Möglichkeiten handhabbar zu machen. Trotz ihrer weiten Verbreitung wird die Verwendung der KWA bzw. MCE in der Literatur mit wenigen Ausnahmen trotz ihrer offensichtlichen Schwächen nicht kritisch hinterfragt. Die Benotung und Aggregation der mit dem Schädigungsmechanismus verknüpften Schadensmerkmale ermöglicht zwar einen guten Überblick über Abschnitte in relativ gutem bzw. schlechtem Zustand und erleichtert die Optimierung, verwischt jedoch die Schadensursache und erschwert die Maßnahmenzuordnung. Hinzu kommt, dass die Zustandsgrenzen oft willkürlich gesetzt sind (Kap. 4.3.6) und dadurch die Lebensdauer ohne Notwendigkeit aus Sicht von Betreiber und Nutzer reduzieren (Kap. 4.3.7). In der Prognose und Optimierung auf den aggregierten Gesamtzustand werden jedoch die Zustandsgrenzen für jede beliebige Gewichtung permanent überschritten (Kap. 3.5.3, Kap. 3.8.3). Dies wird im Straßenoberbau (Kap. 4.2.2) im Schnitt zu einem späteren Einsatz der Maßnahmen und etwas geringeren Kosten führen,

¹⁹¹ vgl. HOFFMANN, M. et al. (2016a, 2017a); DONEV, V. et al. (2016a, 2017a)

¹⁹² vgl. HAAS, R. C. G et al. (1970); HUDSON, W. R. et al. (1976); HAAS, R. et al. (1994, 2015); AASHTO (2012)

¹⁹³ vgl. WENINGER-VYUDIL, A. (2003); WENINGER-VYUDIL, A. et al. (2009); HOFFMANN, M. & BLAB, R. (2012a)

was im Fall des Oberbaus meist unkritisch ist. Wird diese Methodik jedoch auf kritische Anlagen wie z.B. Brücken oder Tunnels angewandt, sind einzelne Ausfälle vor dem Eingriffszeitpunkt nicht zu vermeiden, da die Lebensdauer serieller Systeme im Schnitt unter der mittleren Lebensdauer des kurzlebigsten Elementes liegt und sich mit jedem weiteren kritischen Element verringert. Die Anwendung von Gewichtungsansätzen auf kritische Anlagen negiert Wahrscheinlichkeits- bzw. Zuverlässigkeitstheorie und kann daher gemäß Kap. 3.8.4 als grob fahrlässig eingestuft werden. Gegenläufig dazu ist der „Nutzen“ (Differenzfläche zwischen den Kurven) in der KWA tendenziell umso höher, je früher Maßnahmen zum Einsatz kommen, wogegen die Lebenszykluskosten bei optimaler Ausschöpfung der Lebensdauer ein Minimum werden. Wie in Kap. 4.3.9 gezeigt, führt die KWA „ceteris paribus“ zu einem suboptimalen Mitteleinsatz.¹⁹⁴

Auf Basis der in Kap. 3 dargestellten Methoden ist es jedoch möglich, die Schwachstellen bestehender Pavement Management Systeme mit den in der Folge im Detail dargestellten Ansätzen weitgehend zu beheben. Dazu ist es erforderlich, die Datensensur bei der Ableitung der Masterfunktionen zu berücksichtigen (Kap. 3.6) und alle Erfassungsdaten auf Basis von kurzen stationären Messabschnitten in die Prognosen mit Regressionsverfahren einzubeziehen (Kap. 3.7). Die Zuordnung von Maßnahmen am Messabschnitt erfolgt auf Basis einer Entscheidungsmatrix bzw. eines Entscheidungsbaums spezifisch für alle Schadensmerkmale. Die Optimierung nach Bauloslänge und Timing erfolgt auf Maßnahmenebene mittels Skalenerträgen größerer Baulose durch Zusammenfassung benachbarter Messabschnitte auf Basis eines vollständigen Lebenszykluskostenansatzes (Kap. 3.9). Aufgrund der Komplexität der Optimierungsaufgabe ist ein spezieller genetischer Algorithmus in Verbindung mit „Cut & Merge“ Techniken erforderlich. Dafür entfällt die Notwendigkeit von homogenen Abschnitten und aggregierten Zustandsnoten. Dies ermöglicht weiters eine Optimierung der Streckenverfügbarkeit und der Auswirkungen auf Nutzer und Umwelt, was für bemaute Straßen essenziell ist. Darüber hinaus ist der in Abbildung 216 dargestellte Ansatz auch insofern einzigartig, als er eine „cross asset“ Optimierung beliebig komplexer alternder Systeme erlaubt.

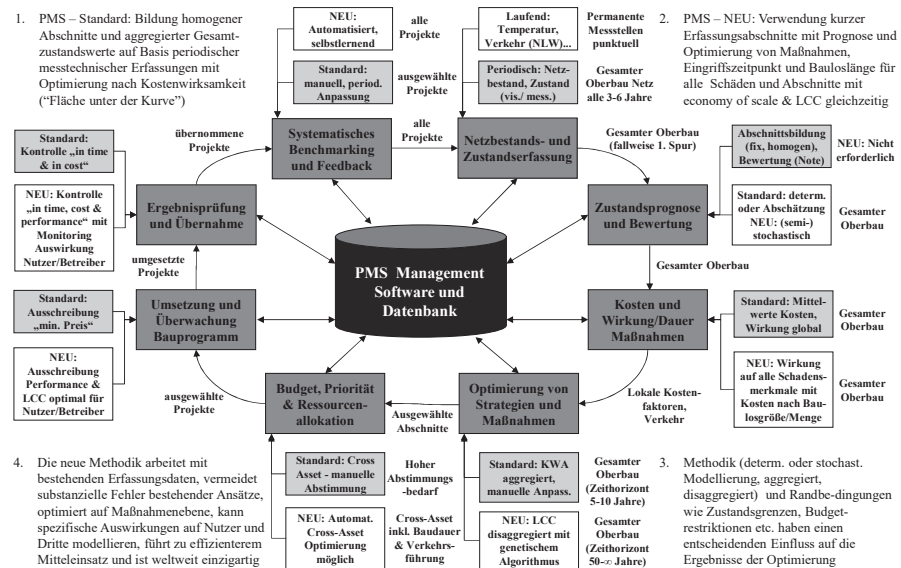


Abbildung 214: Überblick Pavement Management Zyklus auf Netz- und Projektebene mit Kurzbeschreibung bestehender Standards und Innovationen auf Basis des neu entwickelten ganzheitlichen LCC - Ansatzes

¹⁹⁴ vgl. HOFFMANN, M. (2006, 2013c); HOFFMANN, M. et al. (2014c, 2016a,b 2017a); DONEV, V. (2014); DONEV, V. et al. (2016a, 2017a, b)

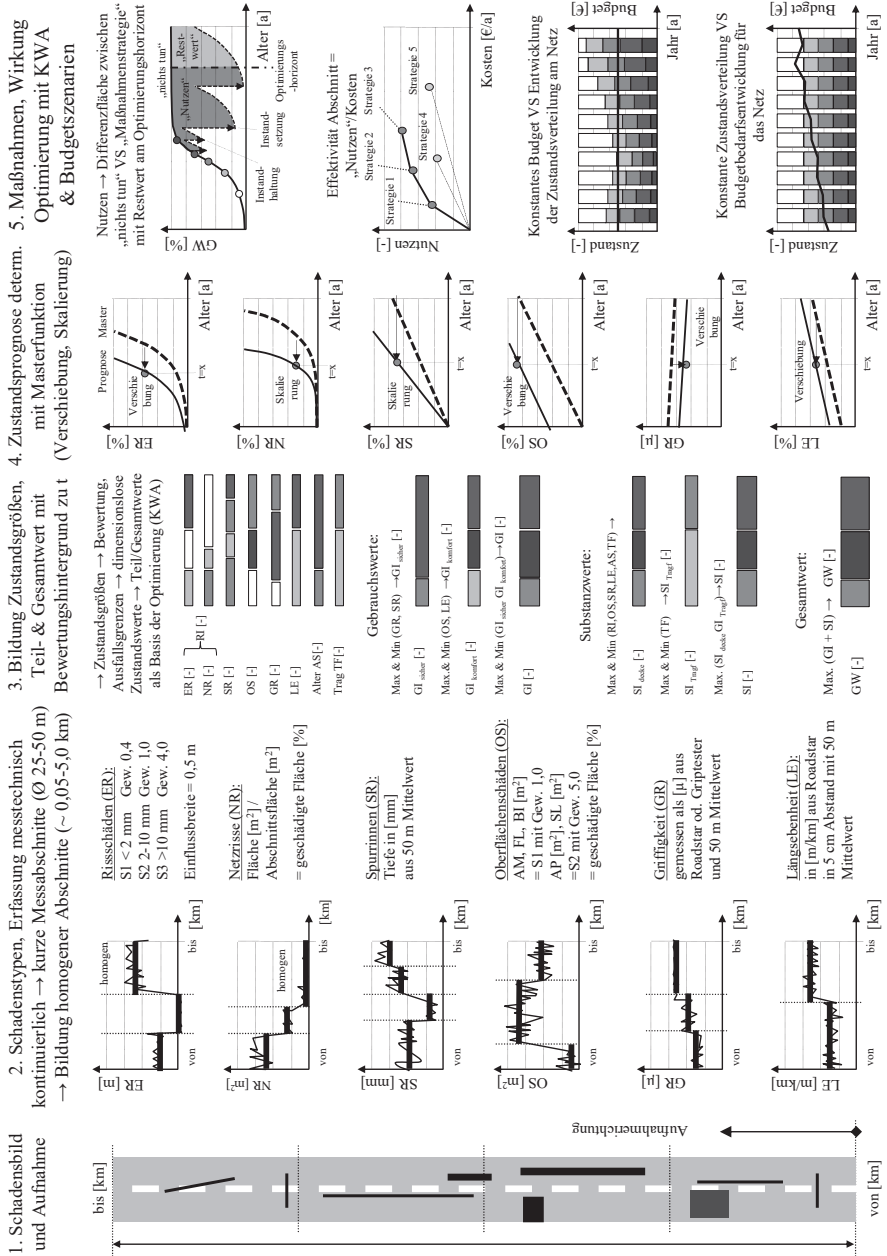


Abbildung 215: Überblick konventionelle Pavement Management Ansätze in Österreich (System ViaPMS)





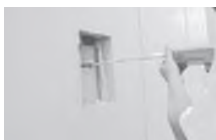
Tabelle 53: Schadensmerkmale VS Instandhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen an Brücken-/Elementen

		Neu, Ersatz, Lage			Instands, Beton, Bewehrung, Material						Erläuterungen und Hinweise		
		1. Neubau Brücke/Element	2. Ersatz Element	3. Lage (Hebung/Aukerung/Stab.)	3. Verstärkung (mit Instandsetzung)	4. Ersatz Beton & Bewehrung	5. Statisch relevante Instands, Beton/Bewehrung	6. Statisch nicht relevante Instands, (Beton/Bew.)	7. Instands, Risse (Kraftschlüssig)	8. Instands, Risse (Abdichtung)		9. Oberflächenschutz / Anstrich	
SCHÄDEN VS MASSNAHMENMATRIX BRÜCKENANLAGEN (Mit technischer Wirkung – und regelmäßiger Anwendung)		Elementenspezifische Instandsetzung											
1. Unterbau	1.1 Gründung - Lage (Verdrrehung, Setzung) - Struktur (Bruch, Tragfähigkeit) - Auskolkung, Unterspülung - Trennung vom Bauwerk - Abtrag, Fehlstellen	X	X	X								Gründungsschäden sind sehr selten nachträglich bzw. Neubau behebbar. Möglich sind weiters Unterfangung, Anhebung des Bauwerks mittels Pressen und Einbau von Ersatzgründungen. Abtrag/Fehlstellen treten i.a. oberirdisch auf und werden lokal durch entsprechende Maßnahmen saniert.	
	1.2. Widerlager, Flügel, Auflagerbank - Lage (Verdrrehung, Setzung) - Struktur (Bruch, Tragfähigkeit) - Auskolkung, Unterspülung - Böschungssicherung/Entwäss. - Abtrag, Fehlstellen Beton - Risse, Korrosionsschäden	X	X	X								Schäden in Bezug auf Lage und Struktur sind ebenfalls eher selten und meist nur durch einen Neubau oder Ersatz behebbar. Lageänderungen können in geringem Ausmaß später behoben werden. Risse, Fehlstellen oder Schäden an der Mauerwerksverblendung sind dagegen durch entsprechende Instandsetzung sanierbar.	
	1.3. Stützen und Pfeiler - Lage (Verdrrehung, Setzung) - Struktur (Bruch, Knicken) - Auskolkung, Unterspülung - Böschungssicherung/Entwäss. - Abtrag, Fehlstellen Beton - Risse, Korrosionsschäden	X	X	X								Seltene Schäden an Struktur und Lage sind durch Entlastung mit Hilfskonstruktion und Austausch (bzw. Anhebung und Verstärkung) behebbar. Auskolkung und Unterspülung ist durch Sicherungen zu verhindern. Abtrags-/Riss- und Korrosionsschäden sind zuzunehmen durch die üblichen Instandsetzungsmaßnahmen (Beton) zu sanieren.	
	1.4. Schleppplatte - Lage (Verdrrehung, Setzung) - Struktur (Bruch) - Risse, Korrosionsschäden	X	X									Können geringfügige Schäden oder Setzungen nicht durch Angleichung des Straßenbelags ausgeglichen werden, erfolgt meist ein Ersatz dieses Elements spätestens bei der nächsten Instandsetzung der Brücke.	
2. Überbau	2.1 Wellrohdurchlass - Standsicherheit (Deformation) - Korrosion, Ausbrüche (Blech) - Schäden Böschungssicherung	X	X	X						X	X	Deformationen der Querschnittsgeometrie deuten auf eine Überlastung und erfordern meist einen Austausch. Lokale Schäden oder Ausbrüche können durch kraftschlüssig verbundene Bleche und Korrosionsschutz saniert werden.	
	2.2 Gewölbe/Bogen - Lage (Verdrrehung, Setzung) - Standsicherheit (Gefläge, Steine) - Mörtel/Gefügeschäden - Risse, Aussinterungen	X	X		X		X	X	X	X	X	X	Schäden der Lage sind ohne Ersatz kaum behebbar, im Gegensatz zu Schäden an Steinen und Gefüge, die meist durch Ausbesserung und/oder eine Verstärkung (Zusatzgewölbe) beherrschbar sind. Risse/offene Fugen werden i.a. verpresst bzw. neu hergestellt.
	2.3 Platten-/Plattenbalken/Rahmen - Lage (Verdrrehung, Setzung) - Standsicherheit (Risse, Bruch) - Überlastung (Schub/Biegung) - Korrosion, Abplatzungen - Betondeckung, Aussinterungen - Risschäden allgemein - Schäden Vorspannung	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Schäden der Lage sind i.a. durch Anhebung und Neueinstellung der Lagerung behebbar. Probleme mit der Standsicherheit sowie zu hohe Durchbiegung erfordern hingegen meist einen Ersatz oder Verstärkung des Überbaus (Aufbeton, Lamellen, externe Vorspannung) bis zum Umbau als Rahmen. Lokale Schäden an Beton und Bewehrung können hingegen durch einfache Ausbesserung behoben werden.

	2.4 Kastenquerschnitte - Lage (Verdrehung, Setzung) - Standsicherheit (Risse, Bruch) - Überlastung (Schub/Biegung) - Korrosion, Abplatzungen - Betondeckung, Aussinterungen - Risschäden allgemein - Schäden Vorspannung	X	X	X	X								X	X	X	Die Schäden an Kastenquerschnitten sind denen an Platten-/Plattenbalken grundsätzlich ähnlich. Durch die Auflösung des Vollquerschnitts können die Schäden jedoch innerhalb und außerhalb des Kastens auftreten. Kästen sind steifer, weshalb sich ein Versagen nicht durch ein biegeweiches Verhalten ankündigt. Reichen die üblichen Ausbesserungen nicht, ist vielfach ein Ersatz notwendig (Vorspannung, Kasten).	
	2.5 Verbundbrücken - Lage (Verdrehung, Setzung) - Standsicherheit (Dübel, Risse) - Überlastung (Beulen etc.) - Korrosion, Abplatzungen Beton - Bruch Verbände - Risschäden Anschlussbereiche - Korrosion, Risse Träger/Kasten	X	X	X	X									X	X	X	Differenzierung zwischen Stahl- und Betonbau sowie Gesamtsystem. Ein mögliches Versagen kündigt sich durch Spannungsrisse und Beulen der Stege an. Schäden an Trägern und Hohlkasten können durch Aufschweißen von Blechen oder Verstärkung behoben werden. Die Fahrbahnplatte kann komplett ausgetauscht (Verbund, Korrosion Kopfdübel) oder mittels Aufbeton verstärkt werden. Sonstige Schäden wie o.a.
3. Lager	3.1 Elastomerlager - Risse (Elastomer), Wasserzutritt - Korrosion Platten - Beeinträchtigung Beweglichkeit - Schädigung Sockel/sonst. Teile	X	X	X									X	X	X	Große Risse und frei liegenden, korrodierte Bleche erfordern i.a. einen Austausch. Risse und Oberflächenschäden werden mittels Anstriches/Spachtelung mit kaltvulkanisiertem Elastomer bzw. durch Abschalen und Warmvulkanisation saniert.	
	3.2 Rollen-/Kipplager - Risse, Bruch von Lagerteilen - Korrosion Zylinder, Leiste, Platten - Beeinträchtigung Beweglichkeit - Schädigung Sockel/sonst. Teile	X	X	X										X	X	X	Bei Rissen oder Bruch von Lagerteilen erfolgt meist ein Austausch (z.B. durch Elastomerlager). Instandsetzung erfolgt über Anhebung des Überbaus, Zerlegung und Sandstrahlen, Aufbringen Korrosionsschutz, Sanieren Sockel/Pfeiler/Widerlager und Wiedereinbau.
	3.3 Topflager - Risse, Bruch von Lagerteilen - Korrosion Stahltopf-/Deckel - Beweglichkeit (Austritt Kissen) - Schädigung Sockel/sonst. Teile	X	X	X										X	X	X	Bei strukturellen Schäden erfolgt meist ein Austausch des gesamten Lagers oder der beschädigten Lagerteile. Schäden an Sockel/Pfeiler und Widerlager durch konventionelle Betoninstandsetzung.
	3.4 Kalottenlager - Risse, Bruch von Lagerteilen - Verschleiß PTFE, Spalthöhe - Korrosion Kalotte/Gleitplatte - Beeinträchtigung Beweglichkeit - Schädigung Sockel/sonst. Teile	X	X	X										X	X	X	Strukturelle Schäden sind meist auf Naturereignisse oder falsche Dimensionierung/Ausführung zurückzuführen und erfordern i.a. einen Austausch. Bei Verschleiß Ausbau und Instandsetzung im Werk. Sockel/Pfeiler/Widerlager wie oben sanieren.
4. Fahrbahnübergangskonstruktion	4.1 Lamellenkonstruktion - Mechanische Beschädigung - Blockierte Dehnwege - Schäden Anker/Fahrbahn - Korrosion/undichte Profile - Schadhafte Entwässerung	X	X	X			X	X	X	X			X	X	X	Bei Austausch älterer Konstruktionen ist der gesamte Ankerbereich zu erneuern, was bei neuen geschraubten FÜK nicht nötig ist. Blockierte Dehnwege und Schäden bei Fahrbahn-/Ankerbereich sowie Mängel an der Entwässerung können lokal behoben werden. Korrodierte & undichte Profile sind auszutauschen.	
	4.2 Fingerkonstruktionen - Mech. Schäden (z.B. Finger) - Blockierte Dehnwege, Versatz - Schäden Ankerbereich/FB - Korrosion/undichte Profile - Schadhafte Entwässerung	X	X	X				X	X	X	X			X	X	X	Robuste Konstruktion. Nach Ausmaß mechanischer Schäden Nachjustierung und Teilaustausch sowie Sanierung angrenzender Bereiche. Häufig Sekundärschäden aufgrund Verschmutzung und undichtem Entwässerungssystem, weshalb eine laufende Kontrolle und Reinigung wichtig ist.
	4.3 Mattenkonstruktionen - Mech. Schäden (Matte, Anschl.) - Überwölbung, Verquetschung - Schäden Ankerung/Fahrbahn	X	X	X				X	X	X	X			X			Durch Verschraubung mit Unterkonstruktion bei (üblichen) mechanischen Schäden leicht austauschbar. Kleine Schäden in Anker/Fahrbahn verspachteln/vergießen, bei großen Schäden Erneuerung.
	4.4 Elastische Belagsdehnfugen - Risse, Ausbrüche Dehnfuge	X	X											X			Durch dichte Ausfüllung ohne bewegliche Teile meist mechan. Beschädigung mit einfachem Austausch (mit/ohne Belag) bzw. Öffnen von Anschlussflanken zum Belag.
5. Abdichtung und Entwässerung	5.1 Tragwerksabdichtung - Schäden groß (bek./unbekannt) - Schäden kleinflächig (Ort bekannt)	X	X										X	X		Sind die Schäden kleinflächig und örtlich bekannt, kann ein lokaler Austausch erfolgen. In allen anderen Fällen ist ein voller Austausch nötig (Folgeschäden).	
	5.2 Abdichtungsentwässerung & Tagwasserabläufe - Ausführungsängel - Funktionsausfall - Folgeschäden (Ausblühungen, Nassstellen, Korrosion etc.)	X	X											X		Zusinterung, Verlegung und lokale Nassstellen sind durch lokale Instandsetzung beherrschbar. Sind Schäden nicht lokalisierbar oder schwer instand zu setzen, wird ein lokaler Ersatz oder komplette Erneuerung erforderlich.	





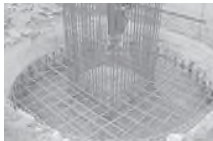
	5.3 Abläufe & Entwässerung - Ausführungsmangel (zu kurz) - Gebrochene Rohre/Befestigung - Korrosion/Sinterung/Verlegung - Mangel Abdichtung/Anschlüsse - Beschädigung Ausbrüche Schacht - Verschmutzung Einläufe	X	X										X	Ausführungsmängel, gebrochene Rohre und Befestigungen bis hin zu Ausbrüchen an Rohren und Schächten sind meist erkennbar und umgehend durch Instandsetzung oder Erneuerung zu sanieren. Undichtigkeiten oder Verlegungen sind an Nasstellern und Ausblühungen erkennbar und nach Möglichkeit zu lokalisieren und lokal instand zu setzen.
6. Randbalken	6.1 Randbalken - Mangel Ankerung (Absturzfef.) - Betonschäden, Korrosion - Risschäden - Lockere Bordsteine - Fugenschäden - Abplatzung, Ausbrüche Gehw. - Bewuchs, Schmutz Gehw. (betriebliche Instandhaltung)	X	X				X	X	X	X	X	X	X	Mängel in der Ankerung bis hin zu Absturzgefahr sowie weitreichende Betonschäden und (Anker-)Korrosion führen in der Regel zu einem lokalen Ersatz bzw. Austausch der Randbalken. Lokale Schäden an Beton, Fugen und Oberfläche werden entweder durch aperiodische Instandhaltung- oder im Zuge periodischer Instandsetzung behoben. Bewuchs und Verschmutzung sind umgehend zu beseitigen.
7. Ansoerftung	7.1 Gefänder, Leit-/Schutzleitricht. - Bruch, Schädigung Elemente - Mangel Ankerung - Korrosion Leitschienen Stahl - Korrosion/Abplatzung Leitwände Beton - Schäden Beschichtung/Anstrich	X	X				X	X					X	Aus Sicherheitsgründen erfolgt bei Bruch, Ankerungsmängeln oder substanzeller Schädigung je nach Ausmaß meist ein lokaler Austausch oder Gesamtersatz. Bei lokalen Schäden/Korrosion kann eine Entrostung und Anstrich (Stahl) oder kleinflächige Reparatur (Beton) erfolgen.
	7.2 Lärmschutzwände (LSW) - Schäden Ankerung, Steher - Schäden Paneel - Schäden Spritzschutz - Schäden Beschichtung/Anstrich	X	X										X	Um einen Absturz der LSW zu verhindern, sind entsprechende Schäden an der Ankerung oder Paneelen umgehend zu beseitigen. Ein Austausch der gesamten LSW erfolgt meist aufgrund substantieller Schäden oder bei einer generellen Instandsetzung.
	7.3 W.Stege, Beleuchtung, Schilder - Schäden Ankerung, Bruch Teile - Korrosion Streben, Stufen etc. - Mechan. Schäden Schilder - Schäden Beleuchtung	X	X										X	Für Arbeitssicherheit und Kontrolle ist eine permanente Begehbarkeit sicherzustellen. Schäden an Wartungsstegen und Zugängen werden i.a. durch Austausch behoben. Bei Schildern und Beleuchtung erfolgt entweder eine lokale Reparatur oder Austausch.
Erläuterung:	In der Tabelle geht es in erster Linie um eine Übersicht der Schadensmerkmale gemäß dem entwickelten Schadenskatalog und Gegenüberstellung mit möglichem Ersatz, Instandsetzungs- und Instandhaltungsmaßnahmen als Basis für eine vertiefte Maßnahmenplanung und Gegenüberstellung möglicher Investitionsalternativen. In Hinblick auf ihre Wirkung kann eine generalisierte Einteilung der Maßnahmen in Neubau, Ersatz und Verstärkungsmaßnahmen an der Gesamtanlage und einzelnen Elementen, der lokalen Instandsetzung von Beton, Bewehrung und/oder sonstigen Materialien sowie für das einzelne Element oder den Anlagenteil spezifische andere Maßnahmen unterschieden werden. In den Maßnahmenkatalogen erfolgt nachstehend eine detailliertere Betrachtung typischer Maßnahmen nach Art, Kosten und erwarteter Wirkdauer. Für Schäden und Maßnahmen an 8. Fahrbahnbelag wird auf Kapitel 4.3.8 der Arbeit verwiesen...													
Legende:	X... Maßnahme ist technisch anwendbar (ohne Berücksichtigung Wirtschaftlichkeit)													

Tabelle 54: Maßnahmenkatalog und Standards allgemeine Instandsetzung von Betonflächen an Brücken ³²¹

MASSNAHMEN-KATALOG Betonflächen an Brücken (allgemein) (Übersicht Anwendung, Arbeitsschritte, Kosten & Wirkung)	Typische Anwendung	Arbeitsschritte & Umsetzung	Kosten & Wirkung	Varianten (sofern nicht anders angegeben)		
				Variante 1 (klein)	Variante 2 (mittel)	Variante 3 (groß)
1. Ausbessern mittels Reparaturmörtel 	<ul style="list-style-type: none"> Ausbessern von kleinflächigen Fehlstellen und Wiederherstellen der Betonoberfläche Kleinflächiger Ersatz von karbonisierten oder chloridhaltigen Betonoberflächen 	1. Herstellen glatter Kanten 2. Abschrammen von fehlerhaftem Beton 3. Wasserstrahlen 4. Herstellen Verbindungsdübeln / Entrosteten Bewehrung 5. Reinigen, vornässen und Auftragen einer Haftbrücke 6. Aufbringen Reparaturmörtel	Kosten [€/m ²] Dauer [a] Bauzeit [d] Menge [m ²]	55-65 20-30 1-2 0-20	50-60 20-30 1-3 20-50	45-55 20-30 >2 >50
2. Ausbesserung mittels Spritzmörtel/Spritzbeton 	<ul style="list-style-type: none"> Ausbessern von großflächigen Fehlstellen und Wiederherstellen der Betonoberfläche flächige Verstärkung der Betondeckung Großflächiger Ersatz von karbonat-/chloridhaltige Betonoberflächen 	1. Herstellen glatter Kanten 2. Abschrammen von fehlerhaftem Beton 3. Wasserstrahlen 4. Herstellen Verbindungsdübeln / Entrosteten Bewehrung 5. Reinigen und vornässen 6. Aufbringen Spritzmörtel/Spritzbeton	Kosten [€/m ²] Dauer [a] Bauzeit [d] Menge [m ²]	60-70 20-30 1-2 0-100	55-65 20-30 1-3 100-500	50-60 20-30 >2 >500
3. Ausbesserung mittels selbstverdichtendem Beton 	<ul style="list-style-type: none"> Ausbessern großflächiger, tieferreichender Fehlstellen und Wiederherstellen der Betonoberfläche flächige Verstärkung der Betondeckung Großflächiger Ersatz von karbonat-/chloridhaltige Betonoberflächen Verstärkung Innenschale 	1. Herstellen glatter Kanten 2. Abschrammen von fehlerhaftem Beton 3. Wasserstrahlen 4. Herstellen Verbindungsdübeln / Entrosteten Bewehrung 5. Reinigen und vornässen 6. Herstellung der Schalung für Beton 7. Einbringen selbstverdicht. Beton	Kosten [€/m ²] Dauer [a] Bauzeit [d] Menge [m ²]	50-60 20-30 1-2 0-100	45-55 20-30 1-3 100-500	40-50 20-30 >2 >500
4. Bewehrung entrostet* (sowie Korrosionsschutz) 	<ul style="list-style-type: none"> Bei karbonisierten oder chloridhaltigen Betonoberflächen Bei frei liegender, korrodierter Bewehrung * Anwendung meist als Teil anderer Maßnahmen	1. Abbruch von geschädigtem Beton 2. Entrosteten der Bewehrung 3. Entfernen von losen Teilen und Staub 4. Auftragen von Korrosionsschutz und Haftbrücke	Kosten [€/m ²] Dauer [a] Bauzeit [d] Menge [m ²]	90-100 40-50 1-3 0-100	85-95 40-50 2-4 100-500	80-90 40-50 >3 >500
5. Nachträglicher Bewehrungseinbau oder Austausch* 	<ul style="list-style-type: none"> Herstellen von Anschlüssen an bestehende Bewehrung Austausch von stark korrodierter Bewehrung Verstärkung bestehender Bewehrung * Anwendung meist als Teil anderer Maßnahmen	1. Abbruch von geschädigtem Beton 2. Herstellung eines Bohrloches 3. Reinigen des Bohrloches 4. Einsetzen des Bewehrungsstabes und verfüllen mittels Injektionsmörtels 5. Wiederherstellung der Betonüberdeckung	Kosten [€/t] Dauer [a] Bauzeit [d] Baulos [t]	1750-2000 50-80 2-5 0-1,0	1700-1900 50-80 3-10 1,0-5,0	1600-1800 50-80 >5 >5,0

³²¹ Konzeption und eigene Darstellung u.a. auf Basis ANTUNOVIC, N. (2011); GLAVAS, P. (2011); Amt Stmk. LR – Referat Brückenbau, ASFİNAG, STRABAG sowie Bildern von MAPEI, SİKA, TPE, UNİTRACC, STOCRETEC etc.

Tabelle 55: Maßnahmenkatalog und Standards Brückenunterbau (Gründungen, Widerlager, Stützen & Pfeiler) ³²²

MASSNAHMEN- KATALOG Brückenunterbau (Übersicht Anwendung, Arbeitsschritte, Kosten & Wirkung)	Typische Anwendung	Arbeitsschritte & Umsetzung	Kosten & Wirkung	Varianten (sofern nicht anders angegeben)		
				Variante 1 (klein)	Variante 2 (mittel)	Variante 3 (groß)
1. Neubau/Ersatz Flachgründung 	Zu Flachgründungen gehören Fundamentplatte, Einzelfundamente unter Einzelstützen und Streifenfundamente <ul style="list-style-type: none"> • Bei tragfähigem Untergrund • Abmessungen gemäß Dimensionierung • Herstellung aus Beton (bewehrt/unbewehrt) 	1. Aushub des Untergrunds 2. Schalung herstellen 3. Kies-/Saubereitsschicht einbauen 4. Bewehrungskorb versetzen 5. Beton einbringen & verdichten 6. Abdeckung, Aushärten Beton und Nachbearbeitung *Kosten für Aufstandsfläche [m ²] bzw. Betonkubatur [m ³]	Kosten [€/m ² ; m ³] Dauer [a] Bauzeit [d] Menge [m ² ; m ³]	250-350 230-260 80-120 5-10 1	220-320 220-240 80-120 7-12 1	200-300 200-220 80-120 10-15 1
2. Neubau/Ersatz Großbohrpfahl (Ø 90, 120, 150 cm) 	Häufigste Gründungsart von Brücken bei nicht tragfähigem Untergrund (bis 50 m Tiefe) <ul style="list-style-type: none"> • Anstehender Untergrund nicht ausreichend tragfähig • Hohe Lastabtragung mit Einbau unter nahezu allen Bedingungen • Einbau vertikal oder schräg bewehrt und unbewehrt 	1. Aushub Bohrloch mit Bohrschnecke 2. Verrohrung/Suspension Bohrloch 3. Einbringen Bewehrungskorb 4. Betonierung des Bohrpfahls von unten nach oben (selbstverdichtend) 5. Aushärtung und Nachbearbeitung *Anzahl Pfähle in Abhängigkeit Fundamentgröße und Last	Kosten [€/lfm; m ³] Dauer [a] Bauzeit [d/Stk.] Menge [lfm; m ²]	700-900 250-300 80-120 1-5 1	650-850 230-270 80-120 1-5 1	650-850 220-250 80-120 1-5 1
3. Neubau/Ersatz Kleinbohrpfahl (Ø <30 cm) 	Vorwiegende Anwendung bei Nachgründung und Lagekorrektur von Anlagen <ul style="list-style-type: none"> • Einbau kompaktes Gerät bei beengten Verhältnissen • Einbau mit Verrohrung als Tragglied (Vollstab) • Alternativ Bewehrungskorb und Verpressung mit Beton oder Zementmörtel 	1. Aushub Bohrloch mit Bohrschnecke 2. Verrohrung/Suspension Bohrloch 3. Einbringen Bewehrungskorb 4. Betonierung des Bohrpfahls von unten nach oben (selbstverdichtend) 5. Aushärtung und Nachbearbeitung *Anwendung auch zur Hangsicherung und Böschungssanierung	Kosten [€/lfm] Dauer [a] Bauzeit [d/Stk.] Menge [lfm]	200-300 80-120 0,5-2 1	170-250 80-120 0,5-2 1	150-200 80-120 0,5-2 1
4. Neubau, Ersatz Rammpfähle (i.a. Fertigteile Beton, Stahl) 	Üblicherweise Anwendung bei nicht stand sicherem Untergrund, im Grundwasser oder fließendem Gewässer <ul style="list-style-type: none"> • Lastübertragung durch Reibung an Pfahlmantel • Verwendung von Fertigpfählen (Stahl, Beton) • Baugrubensicherung mit Platten oder Paneeelen 	1. Einrammen der Fertigteile in entsprechendem Abstand 2. Kies-/Saubereitsschicht einbauen 3. Schalung Fundamentplatte platzieren 4. Bewehrungskorb versetzen	Kosten [€/lfm] Dauer [a] Bauzeit [d/Stk.] Menge [lfm]	200-300 80-120 0,3-2 1	170-250 80-120 0,3-2 1	150-200 80-120 0,3-2 1
5. Neubau, Ersatz Brunnengründung (Ø 150 – 1.000 cm) 	Anwendung wie bei Bohrpfählen mit größerem Durchmesser <ul style="list-style-type: none"> • Anstehender Untergrund nicht ausreichend tragfähig • Hohe Lastabtragung mit Einbau unter nahezu allen Bedingungen • Die Sicherung des Brunnens verbleibt als „verlorene“ Schalung der Gründung 	1. Aushub Brunnen 2. Sicherung mit Betonfertigteilen 3. Bewehrungskorb versetzen (falls nötig) 4. Beton einbringen & verdichten 5. Abdecken, Aushärten Beton und Nachbearbeitung	Kosten [€/m ²] Dauer [a] Bauzeit [d] Menge [m ²]	230-260 80-120 10-15 1	220-240 80-120 15-20 1	200-220 80-120 20-30 1

³²² Konzeption und eigene Darstellung u.a. auf Basis ANTUNOVIC, N. (2011); GLAVAS, P. (2011); Betonkalender 2014 – S179-236 sowie Daten und Bilder von Amt Stmk. LR – Referat Brückenbau, ASFINAG, STRABAG, KELLER Grundbau etc.

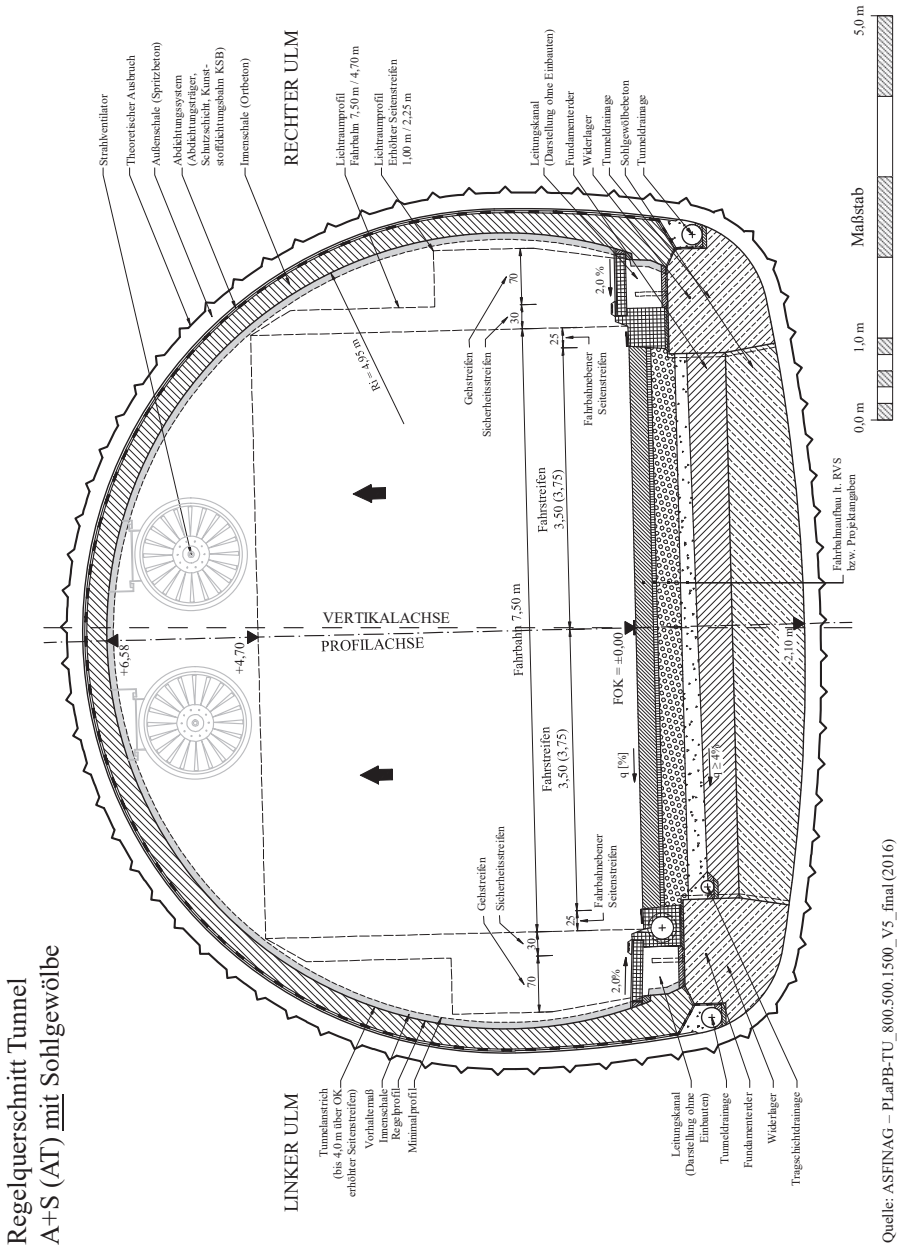


Abbildung 306: Beispielhafte Darstellung des Regelquerschnitts eines Straßentunnels auf Straßen A+S in Österreich mit Söhlgewölbe und Fahrbahn Aufbau ohne Querschnittserweiterung und Pannenbucht

Tabelle 62: Schadensmerkmale an der Tunnelinnenschale³⁶¹

Tunnelinnenschale: Schadensbilder, Ursachen, Folgen, Erfassung, Verlauf						
		Blockende				
		Blockanfänge				
<p>LEGENDE:</p> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <p> 1. Kleinflächige Oberflächenschäden unter 0,5 m²</p> <p> 2. Großflächige Oberflächenschäden über 0,5 m²</p> <p> 3. Tiefreichende Oberflächenschäden hinter die Bewehrung</p> <p> 4. Kiesnester</p> <p> 5. Hohlstellen und Betonabplatzungen</p> <p> 6. Unterschreitung der Mindestbetondeckung</p> <p> 7. Ausgebrochene Kanten im Bereich von Fugen und Nischen</p> <p> 8. Risse trocken ab 0,3 mm Breite in bewehrten Innenschalen</p> <p> 9. Risse trocken ab 1,0 mm Breite in bewehrten Innenschalen</p> </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <p> 10. Risse wasserführend</p> <p> 11. Netzrisse in der Innenschale</p> <p> 12. Einzel- und Netzrisse mit Ausbeulung und/oder Versatz</p> <p> 13. Flächig feuchte Stellen</p> <p> 14. Mangelnde Betonfestigkeit (Druck, Haftzug)</p> <p> 15. Korrodierte Bewehrung ohne/mit größeren Abplatzungen</p> <p> 16. Undichte Blockfugen</p> <p> 17. Undichte Arbeits- bzw. Dehnfugen</p> <p> 18. Mangelhafte/fehlende Tunnelbeschichtung</p> <p> 19. Ausblühungen und Auswitterungen</p> </td> </tr> </table>					<p> 1. Kleinflächige Oberflächenschäden unter 0,5 m²</p> <p> 2. Großflächige Oberflächenschäden über 0,5 m²</p> <p> 3. Tiefreichende Oberflächenschäden hinter die Bewehrung</p> <p> 4. Kiesnester</p> <p> 5. Hohlstellen und Betonabplatzungen</p> <p> 6. Unterschreitung der Mindestbetondeckung</p> <p> 7. Ausgebrochene Kanten im Bereich von Fugen und Nischen</p> <p> 8. Risse trocken ab 0,3 mm Breite in bewehrten Innenschalen</p> <p> 9. Risse trocken ab 1,0 mm Breite in bewehrten Innenschalen</p>	<p> 10. Risse wasserführend</p> <p> 11. Netzrisse in der Innenschale</p> <p> 12. Einzel- und Netzrisse mit Ausbeulung und/oder Versatz</p> <p> 13. Flächig feuchte Stellen</p> <p> 14. Mangelnde Betonfestigkeit (Druck, Haftzug)</p> <p> 15. Korrodierte Bewehrung ohne/mit größeren Abplatzungen</p> <p> 16. Undichte Blockfugen</p> <p> 17. Undichte Arbeits- bzw. Dehnfugen</p> <p> 18. Mangelhafte/fehlende Tunnelbeschichtung</p> <p> 19. Ausblühungen und Auswitterungen</p>
<p> 1. Kleinflächige Oberflächenschäden unter 0,5 m²</p> <p> 2. Großflächige Oberflächenschäden über 0,5 m²</p> <p> 3. Tiefreichende Oberflächenschäden hinter die Bewehrung</p> <p> 4. Kiesnester</p> <p> 5. Hohlstellen und Betonabplatzungen</p> <p> 6. Unterschreitung der Mindestbetondeckung</p> <p> 7. Ausgebrochene Kanten im Bereich von Fugen und Nischen</p> <p> 8. Risse trocken ab 0,3 mm Breite in bewehrten Innenschalen</p> <p> 9. Risse trocken ab 1,0 mm Breite in bewehrten Innenschalen</p>	<p> 10. Risse wasserführend</p> <p> 11. Netzrisse in der Innenschale</p> <p> 12. Einzel- und Netzrisse mit Ausbeulung und/oder Versatz</p> <p> 13. Flächig feuchte Stellen</p> <p> 14. Mangelnde Betonfestigkeit (Druck, Haftzug)</p> <p> 15. Korrodierte Bewehrung ohne/mit größeren Abplatzungen</p> <p> 16. Undichte Blockfugen</p> <p> 17. Undichte Arbeits- bzw. Dehnfugen</p> <p> 18. Mangelhafte/fehlende Tunnelbeschichtung</p> <p> 19. Ausblühungen und Auswitterungen</p>					
Merkmale & Beispiele	Schadensursachen	Schadensfolgen	Dimensionen & Verlauf			
<p>1. Kleinflächige Oberflächenschäden unter 0,5 m²</p>	<p>Mögliche Schadensursachen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mangelhafter Ausführungs- und / oder Betonqualität • Chlorideinwirkung infolge des Winterdienstes • Geringe Betondeckung • Mechanische Einwirkung 	<p>Schadensfolgen Substanz:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abblättern der Tunnelbeschichtung • Betonabplatzungen • Korrosion der Bewehrung • Reduktion Dauerhaftigkeit <p>Schadensfolgen Nutzer:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Geringe Auswirkungen Sicherheit 	<p>Schadensausmaß:</p> <ul style="list-style-type: none"> • [%] Block ↔[m²/Block] <p>Schadensschwere:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tiefe des Schadens [mm] <p>Schadensverlauf:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Linear bis leicht progressiv 			
<p>2. Großflächige Oberflächenschäden über 0,5 m²</p>	<p>Mögliche Schadensursachen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mangelhafter Ausführungs- und / oder Betonqualität • Chlorideinwirkung infolge des Winterdienstes • Geringe Betondeckung • Mechanische Einwirkung 	<p>Schadensfolgen Substanz:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abblättern der Tunnelbeschichtung • Betonabplatzungen • Korrosion der Bewehrung • Reduktion Dauerhaftigkeit <p>Schadensfolgen Nutzer:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mittlere Auswirkungen Sicherheit 	<p>Schadensausmaß:</p> <ul style="list-style-type: none"> • [%] Block ↔[m²/Block] <p>Schadensschwere:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tiefe des Schadens [mm] <p>Schadensverlauf:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Leicht bis mittel progressiv 			
<p>3. Tiefreichende Oberflächenschäden hinter die Bewehrung</p>	<p>Mögliche Schadensursachen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mangelhafter Ausführungs- und / oder Betonqualität • Mechanische Einwirkung • Hohlräume 	<p>Schadensfolgen Substanz:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abblättern der Tunnelbeschichtung • Betonabplatzungen • Korrosion der Bewehrung • Reduktion Tragfähigkeit <p>Schadensfolgen Nutzer:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hohe Auswirkungen Sicherheit 	<p>Schadensausmaß:</p> <ul style="list-style-type: none"> • [%] Block ↔[m²/Block] <p>Schadensschwere:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tiefe des Schadens [mm] <p>Schadensverlauf:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mittel bis hoch progressiv 			

³⁶¹ Konzeption und eigene Darstellung Abwicklung Tunnelinnenschale mit Schäden auf Basis von HOFFMANN, M. et al. (2012a); WEINMAR, A. (2014) S50-67 u.a. auf Basis Amt Stmk. LR – Referat Tunnelbau, ASFINAG, STRABAG etc.