

Risikobasiertes Planen von Maßnahmen des Hochwasserrisikomanagements mittels genetischer Algorithmen

Niklas Schwiersch

Zusammenfassung

Die mit einem Hochwasserereignis verbundenen Kosten können im Zuge des ganzheitlichen Hochwasserrisikomanagements (HWRM) entweder gegenwärtig durch die Umsetzung vorbeugender Hochwasserschutzmaßnahmen (Zuverlässigkeitskosten) oder künftig bei der Hochwasserbewältigung getragen werden. Vor dem Hintergrund, dass sich das Hochwasserrisiko nicht eliminieren lässt, trägt das HWRM im zweitgenannten Fall Risikokosten. Für die Bewusstseinsbildung und Maßnahmenplanung bedarf ein ganzheitliches HWRM geeigneter Werkzeuge, um Risiko- und Zuverlässigkeitskosten im Zuge der Planung zu optimieren. In der Folge lassen sich aus dem volkswirtschaftlichen Optimum Anforderungen hinsichtlich der Bauwerkszuverlässigkeit und der Versagenswahrscheinlichkeit ableiten. Für die methodische Umsetzung einer solchen Optimierung bieten sich numerische Optimierungsverfahren, wie genetische Algorithmen, an. Dieser Beitrag zeigt exemplarisch die Implementierung und Auswertung einer Optimierung von Risiko- und Zuverlässigkeitskosten am Beispiel des landseitigen Böschungsbruchs eines homogenen Flussdeichs.

1 Einführung und Motivation

Hochwasser lassen sich als natürliche Ereignisse nicht verhindern. Vielmehr ist davon auszugehen, dass sie als Folge des Klimawandels sowohl in ihrer Anzahl als auch in ihrer Intensität zunehmen. Dies ist die logische Folge eines intensivierten Wasserkreislaufs, für welchen sich bereits die Zunahme von Niederschlägen gleichsam global und regional beobachten lässt (Arbeitskreis KLIWA, 2021; IPCC, 2022). Wegen der zahlreichen und zunehmenden anthropogenen Nutzungen in Überflutungsflächen stellen Hochwasser eine Gefährdung für den Menschen und die Umwelt dar (Jüpner, 2018; Schüttrumpf, 2017). In Deutschland hat dies zuletzt das Hochwasser im Juli 2021 vor Augen geführt.

Im ganzheitlichen Ansatz des Hochwasserrisikomanagements (HWRM) werden die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Hochwasserereignisses $P(E)$ und dessen Konsequenzen $C(E)$ im Hochwasserrisiko HWR erfasst (vgl. Gl. 1).

$$HWR = P(E) \cdot C(E) \quad [1]$$

Tritt eine Überflutung als Folge von strukturellem oder funktionalem Versagen einer technischen Hochwasserschutzmaßnahme auf, so lässt sich HWR anhand der Versagenswahrscheinlichkeit P_f bestimmen (Plate, 1993).

$$HWR = P_f \cdot C(E) \quad [2]$$

Folglich leiten sich aus Gl. 2 grundsätzlich zwei Steuerungsgrößen für das Hochwasserrisiko ab: die Versagenswahrscheinlichkeit und die Konsequenzen. Vor dem Hintergrund, dass das Ziel eines ganzheitlichen HWRM die Minimierung der mit Hochwasser verbundenen, volkswirtschaftlichen Gesamtkosten C_{ges} ist, sind im Zuge der technischen Planung und der Raumordnung gleichermaßen P_f und $C(E)$ in einem Einzugsgebiet zu steuern.

Dieser Beitrag fokussiert auf die Einstellung von Versagenswahrscheinlichkeiten von Hochwasserschutzmaßnahmen und präsentiert hierfür eine Methodik zur numerischen Optimierung von Zuverlässigkeits- und Risikokosten.

2 Methodik

2.1 Versagenswahrscheinlichkeit und Steuerungsgrößen

Dass es keine absolute Standsicherheit gibt, zeigen vereinzelt auftretende Versagensfälle, wie sie z. B. in Özer et al. (2020) oder Heyer (2011) statistisch ausgewertet sind. So führen u. a. Imperfektionen, räumlich unterschiedliche Niederschläge oder auch Vereinfachungen im Zuge der Modellbildung zu Ungewissheiten bei der Ausprägung von Hochwasserereignissen, den Festigkeitseigenschaften von Baustoffen und der Genauigkeit ingenieurtechnischer Analyseergebnissen. In der Folge sind sowohl die Einwirkung S als auch der Widerstand R Zufallsvariablen. Infolgedessen besteht, so klein sie auch sein mag, die Wahrscheinlichkeit eines Versagens. Diese lässt sich über die stochastische Auswertung der Zuverlässigkeit $f(z)$ bestimmen. Unter Verwendung probabilistischer Methoden werden dazu die Einwirkungen und Widerstände als Zufallsvariablen in den Grenzzuständen berücksichtigt (DWA, 2022). Aus der sich folglich als Zufallsvariable ergebenden Zuverlässigkeit z (vgl. Gl. 3) wird schließlich P_f als Integral über den sogenannten Versagensraum bestimmt. Für diese Analyse wird z über den negativen Wertebereich integriert (vgl. Gl. 4), weil die Einwirkung dann den Widerstand übersteigt.

$$z = R - S \quad [3]$$

$$P_f = P(z < 0) = \int_{-\infty}^0 f(z) dz \quad [4]$$

Grenzzustände liegen z. B. technischen Nachweisen zugrunde und sind als mathematische Beschreibungen von Versagensmechanismen zu verstehen. So sind das Gleiten, das Kippen und das Verformen eines Bauwerks bzw. Bauteils Beispiele für Versagensmechanismen. Zur Quantifizierung der globalen Versagenswahrscheinlichkeit sind die aus den einzelnen Mechanismen resultierenden Versagenswahrscheinlichkeiten in einen sinnvollen Zusammenhang zu setzen. Hierzu dienen Analysen mittels Fehlerbäumen oder Ereignisablaufdiagrammen, welche durch die Analyse von einer Vielzahl an einzelnen Versagensmechanismen einen ganzheitlichen Blick auf ein Bauwerksversagen befördern.

2.2 Gesamtkosten des Hochwasserrisikomanagements

Werden ausschließlich monetäre Konsequenzen in die Risikoquantifizierung nach Gl. 2 einbezogen, so ergibt sich HWR ebenfalls als monetäre Größe und beschreibt somit eine Funktion für die Risikokosten C_{ris} nach Gl. 5. Risikokosten entsprechen den kontinuierlich zu bildenden, finanziellen Rückstellungen, welche nötig sind, um die mit künftigen Hochwasserereignissen verbundenen Kosten im Eintrittsfall decken zu können.

$$C_{ris} = HWR = P_f \cdot C \quad [\text{EUR}] \quad [5]$$

Unter der Voraussetzung, dass Investitionen in Maßnahmen des HWRM eine positive Korrelation mit ihrer Zuverlässigkeit aufweisen, lassen sich komplementär zu C_{ris} zusätzlich Zuverlässigkeitskosten C_{zuv} [EUR] bestimmen. Diese sind wiederum reale, mit der Maßnahmenumsetzung verbundene Kosten. Letztlich stehen Risiko- und Zuverlässigkeitskosten in einer wechselseitigen Abhängigkeit. So bedingen hohe Zuverlässigkeitskosten höhere

Zuverlässigkeiten, geringere Versagenswahrscheinlichkeiten und folglich geringere Risikokosten und umgekehrt. Die Summe beider Einzelkosten ergibt die Gesamtkosten C_{ges} (vgl. Gl. 6).

$$C_{ges} = C_{ris} + C_{zuv} \quad [\text{EUR}] \quad [6]$$

2.3 Kostenoptimierung mittels genetischer Algorithmen

Im Rahmen einer volkswirtschaftlichen Optimierung stellt sich die Frage: Bis zu welchem Investment (Kosten) vergrößert sich die Wirksamkeit der Mittelverwendung (Nutzen)? Um diese Frage zu beantworten, bedarf es zunächst der Klärung des Begriffs Optimum. Die Funktion der Gesamtkosten $C_{ges}(z)$ besitzt an der Stelle z^* das Optimum $C_{ges}(z^*)$. An dieser Stelle ist die Steigung von $C_{ges}(z)$ gleich Null, sodass sich das Optimum anhand der Bedingung nach Gl. 7 bestimmen lässt. Eine schematische Darstellung der optimierten Gesamtkosten C_{ges}^* zeigt Abb. 1.

$$C'_{ges}(z^*) = 0 \quad [\text{EUR}] \quad [7]$$

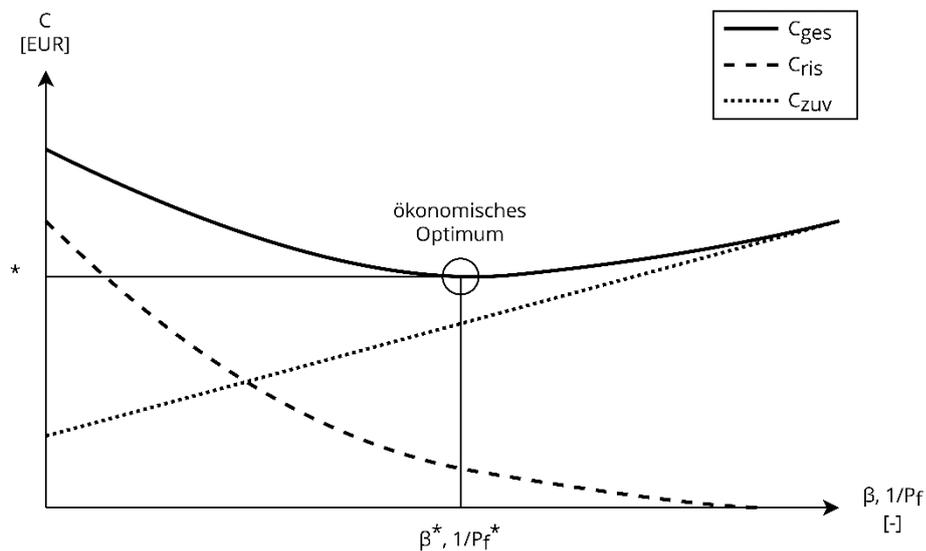


Abb. 1 Ökonomisches Optimum der Gesamtkosten als Ergebnis einer Abwägung zwischen Zuverlässigkeits- und Risikokosten

Infolge des mitunter mehrdimensionalen Charakters von C_{ges} entspricht die Gesamtkostenfunktion einer Hyperebene, welche neben dem globalen Minimum bzw. Maximum eine Vielzahl lokaler Minima bzw. Maxima aufweisen kann. Die globalen Optima zu identifizieren ist dann auf analytischem Weg schwerlich möglich, weshalb es sich anbietet, HWR-Optimierungen durch numerische Verfahren, wie z. B. genetischer Algorithmen, zu unterstützen.

Genetische Algorithmen zielen darauf ab, zufällig eine optimierte Lösung herbeizuführen. Dafür bedienen sie sich Mechanismen, die in der natürlichen Evolution beobachtete Prozesse nachahmen (Tang et al., 1996). Hierzu wird der Untersuchungsraum durch Untersuchungsintervalle der Eingangsvariablen (z. B. Zuverlässigkeits- und Risikokosten) definiert. Im nächsten Schritt werden n zufällige Realisierungen initialisiert (nullte Generation), deren Ergebniswerte auf der Zielfunktion eine Bewertung in Bezug auf das Optimierungsproblem erlauben. Aus den n Lösungen wird eine üblicherweise als Eltern bezeichnete Gruppe ausgewählt. Deren Konfigurationen (Werte der Eingangsvariablen bzw. „Gene“) werden wiederum - in Anlehnung an die evolutionären Prozesse - als Chromosomen benannt. Als Folge der Rekombination von

Eltern-Chromosomen (Crossover) und der zufälligen Veränderung einzelner Gene (Mutation) entsteht eine als Kinder bezeichnete Gruppe neuer Lösungsvorschläge. Während das Crossover die iterative Suche nach einem Optimum (vgl. Abb. 2) auf einen in vorangegangenen Iterationsschritten als aussichtsreich identifizierten Teil des Untersuchungsraums eingrenzt, öffnet die Mutation den Pool möglicher Lösungen. Schließlich ergibt sich die approximierete, optimale Lösung durch das Erreichen eines Abbruchkriteriums (z. B. Erfüllung von Gl. 7, relative Abweichung der Ergebnisse untereinander oder Anzahl an Iterationen).

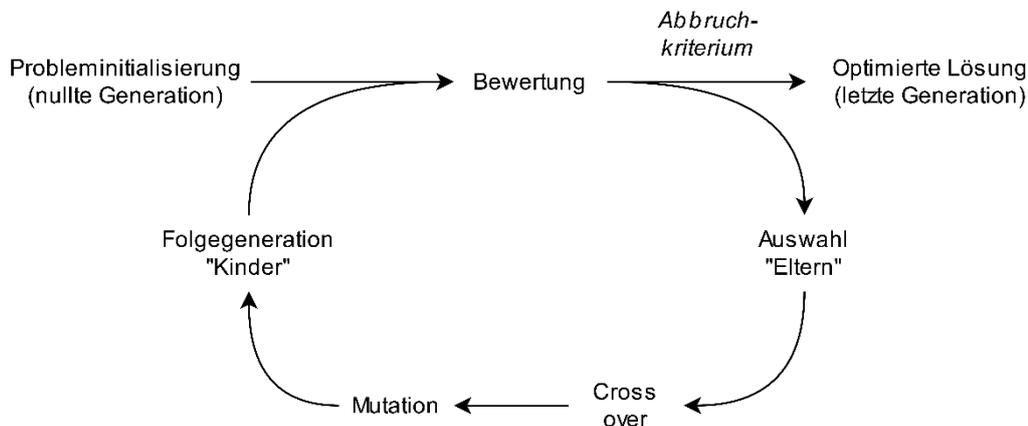


Abb. 2 Ablauf der iterativen Optimierung mit Hilfe eines genetischen Algorithmus

Für die Performanz eines genetischen Algorithmus sind die Auswahl der Eltern, die Art des Crossovers und die Mutation daher elementare Steuerungsgrößen. Die Auswahl der Eltern ahmt das Überleben des Stärkeren in der Natur nach. Gängige Auswahlverfahren sind die Glücksradauswahl, die Turnier-Auswahl, die Auswahl nach Rang oder die zufällige Auswahl (Winston, 2010). Einen Überblick zu Vor- und Nachteilen der einzelnen Auswahlverfahren gibt Tang et al. (1996). Die Rekombination der Eltern-Chromosomen zur Erzeugung von Lösungsvorschlägen des nächsten Iterationsschritts kann mittels One-Point-, Two-Point und Uniform Crossover erfolgen. Während die Anwendung von One- und Two-Point-Crossover vorwiegend für binäre Systeme (Parameterwerte „Null“ und „Eins“) üblich ist, empfiehlt sich für kontinuierliche Größen das Uniform Crossover. Die Mutation ermöglicht die zufällige Veränderung von Lösungskandidaten und kann für binäre Systeme mittels Bit Flap, Swap Mutation, Scramble Mutation oder Inverse-Mutation umgesetzt werden. Für kontinuierliche Größen empfiehlt sich Parametermanipulation über eine Mutationsrate. Die Überführung einer Ausgangs- in eine Folgegeneration zeigt Abb. 3 exemplarisch.

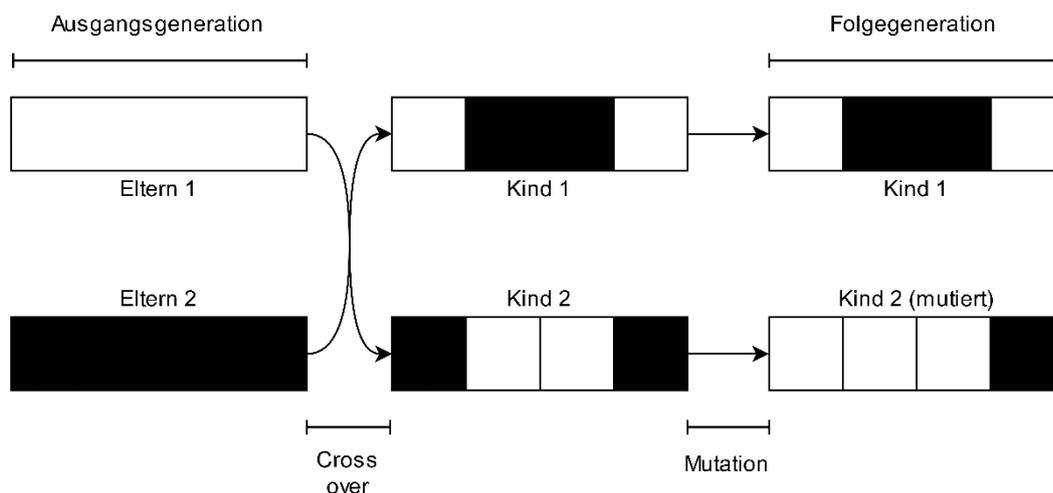


Abb. 3 Überführung zweier Eltern-Chromosomen mittels (Two-Point) Crossover und (Bit Flap) Mutation zu einer Kindergeneration

Dem Anwendungsbeispiel aus Kapitel 3 liegen die Glücksradauswahl, das Uniform Crossover und die Implementierung einer Mutationsrate zugrunde.

3 Anwendungsbeispiel “homogener Flussdeich”

3.1 Landseitiger Böschungsbruch

Deichversagen ist die Folge unterschiedlicher Versagensmechanismen. Einen Überblick zu deichbezogenen Versagensmechanismen gibt Bachmann (2012). Der landseitige Böschungsbruch wird als häufigster geostatischer Versagensmechanismus für dieses Anwendungsbeispiel ausgewählt. Wie in Schwiersch und Stamm (2022) gezeigt, stellen die landseitige Böschungsneigung, der Erwartungswert und der Variationskoeffizient des inneren Reibungswinkels sowie der Erwartungswert der Porosität eine geometrische und drei materialtechnische Steuerungsgrößen des Mechanismus dar.

3.2 Kostenfunktionen

Da es sich bei Flussdeichen um linienhafte Infrastruktur handelt, werden an dieser Stelle gleichsam die Risiko- und Zuverlässigkeitskosten linienbezogen analysiert. Dafür wird das Schadenspotential einer Überflutungsfläche auf die zugehörige Deichlinie projiziert. In der Folge ergeben sich ebenfalls die Gesamtkosten als spezifische Kosten in [EUR/lfdm].

Für dieses Beispiel wurde ein Modell der Zuverlässigkeitskosten auf Grundlage des in Tab. 1 gegebenen Leistungsverzeichnisses (Positionen i sowie überschlägige Einheitspreise P_i) entwickelt. Für das angenommene Modell der Zuverlässigkeitskosten (vgl. Gl. 8) werden anhand eines Referenzdeichquerschnitts die Grundkosten C_0 bestimmt, die über eine Reihe von Koeffizienten κ_i manipuliert werden. Im Einzelnen werden kostenrelevante Einflüsse infolge (1) der landseitigen Böschungsneigung κ_{mL} , (2) der Erwartungswerte vom inneren Reibungswinkel $\kappa_{E\varphi}$ und (3) von der Porosität κ_{En} sowie (4) des Variationskoeffizienten des inneren Reibungswinkels $\kappa_{VarK\varphi}$ zugrunde gelegt.

$$C_{zuv} = C_0 \cdot \kappa_{mL} \cdot \kappa_{E\varphi} \cdot \kappa_{En} \cdot \kappa_{VarK\varphi} \quad [8]$$

Die Grundkosten ergeben sich für den Referenzdeich zu 1.340,54 EUR / m. Zur Modellbildung sind die Koeffizienten κ_i an Veränderungen der Deichkonfiguration gegenüber dem Referenzzustand geknüpft (normierte Vorgehensweise).

So führt eine Veränderung der landseitigen Böschungsneigung zur Veränderung der Deichkubatur, welche sich entsprechend der Querschnittsflächenänderung auf die Zuverlässigkeitskosten auswirkt. Entsprechend der benannten Steuerungsvariablen führt eine flachere Böschungsneigung also zu größeren Zuverlässigkeitskosten und ebenso zu einer geringeren Versagenswahrscheinlichkeit. Die Veränderung der Erwartungswerte sowohl des inneren Reibungswinkels als auch der Porosität beeinflusst das Widerstandsmoment eines betrachteten Gleitkörpers. Hierzu wird angenommen, dass eine Steigerung des jeweiligen Erwartungswerts und somit des Widerstands nur durch Inkaufnahme längerer Transport- bzw. Lieferstrecken möglich ist. Aufgrund von einem gesteigerten Kraftstoffverbrauch sowie zusätzlichen Ungewissheiten im Kontext der Baustellenlogistik geht eine Steigerung der Erwartungswerte also ebenfalls mit einer Kostensteigerung und einer Minderung der Versagenswahrscheinlichkeit einher. Zuletzt wird angenommen, dass sich der Variationskoeffizient des inneren Reibungswinkels durch die örtliche Bauüberwachung beeinflussen lässt. Je größer der Aufwand für die Qualitätsprüfung ist, desto kleiner sind die Parameterstreuung und die Versagenswahrscheinlichkeit.

Tab. 1 Leistungsverzeichnis mit ausgewählten Positionen für die Herstellung eines homogenen Flussdeichs

Position i	Bezeichnung	Überschlägiger Einheitspreis P_i	Preis des Referenzdeichs P_i'
1	Oberboden abtragen und lagern	2,50 EUR/m ³	76,25 EUR/m
2	Oberboden aufnehmen und andecken inkl. Einsaat	1,20 EUR/m ²	38,35 EUR/m
3	Planum Deichlager herstellen	1,00 EUR/m ²	30,50 EUR/m
4	Boden für homogenen Deich liefern und einbauen	15,00 EUR/m ³	1.147,50 EUR/m
5	Oberflächenschutz durch Erosionsschutzmatten	1,50 EUR/m ²	47,94 EUR/m
Grundkosten C_0			1.340,54 EUR/m

3.3 Optimierungsergebnisse für Zuverlässigkeits- und Risikokosten

Die Konfiguration des Referenzdeichs wird unter Anwendung eines genetischen Algorithmus für neun linienbezogene Schadenspotentiale (1 EUR/m, 10 EUR/m, ..., 100 Mio. EUR/m) durchgeführt. Für diese ergeben sich aus den Simulationsläufen die gemittelten Querschnittsoptimierungen nach Abb. 4. Mit dem Schadenspotential steigen die Risiko- und die Zuverlässigkeitskosten und infolgedessen die Gesamtkosten. Es empfiehlt sich für Abschnitte größerer Schadenspotentiale höhere Zuverlässigkeitskosten in Kauf zu nehmen als für solche geringerer. Dies geht gleichsam aus den Trendanalysen aller Steuerungsvariablen hervor. Dem

niedrigsten Schadenspotential ist der Mindestwert der Zuverlässigkeitskosten von 182,53 EUR/m zugeordnet. Dieser hypothetische Fall unterstreicht die methodische Richtigkeit, ignoriert jedoch, dass bei der Abwesenheit von Schadenspotential die Errichtung eines Flussdeichs unwahrscheinlich ist.

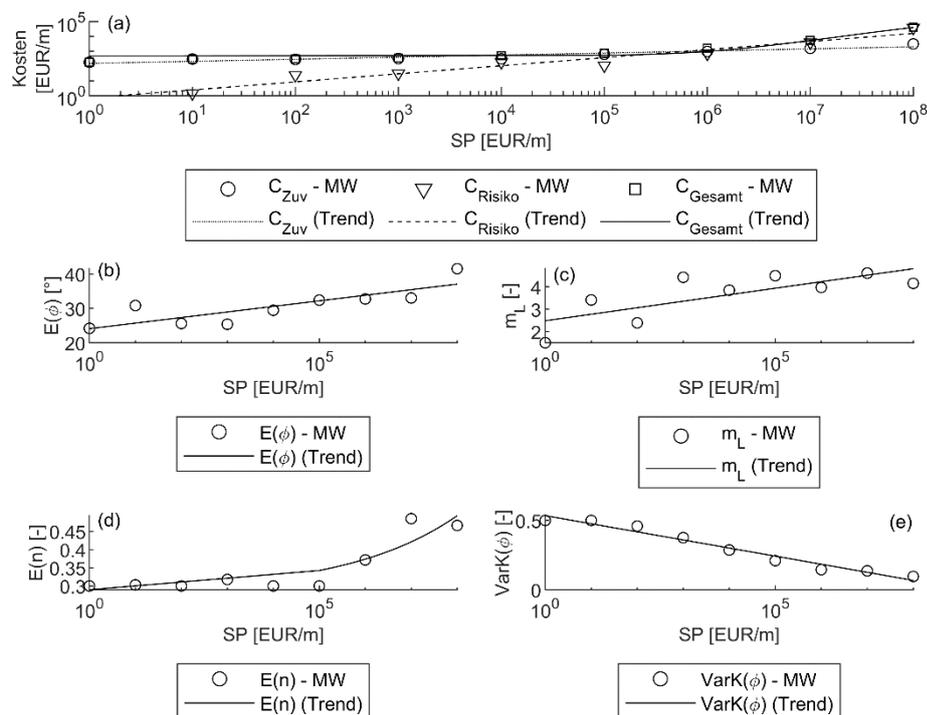


Abb. 4 Optimierungsergebnisse für die Kosten und Steuerungsvariablen für Schadenspotentiale von 1 EUR/m bis 100 Mio. EUR/m

Weiterhin lassen sich aus den Ergebnissen kostenoptimierte Empfehlungen hinsichtlich der Deichzuverlässigkeit ableiten, schließlich korrelieren Zuverlässigkeitskosten und Versagenswahrscheinlichkeit. Aus der Darstellung in Abb. 5 ergeben sich sowohl Anwendungsbereiche einzelner Zuverlässigkeitskosten als auch Empfehlungen für Zuverlässigkeitskosten bei definierten Schadenspotentialen. So bietet sich z. B. die Verwendung des Referenzdeichs für Schadenspotentiale von 1 Mio. EUR/m bis 10 Mio. EUR/m an. Oder, es sollten für Schadenspotentiale von 1 Mio. EUR/m Zuverlässigkeitskosten in Höhe von ca. 700 EUR/m bis 1.100 EUR/m berücksichtigt werden.

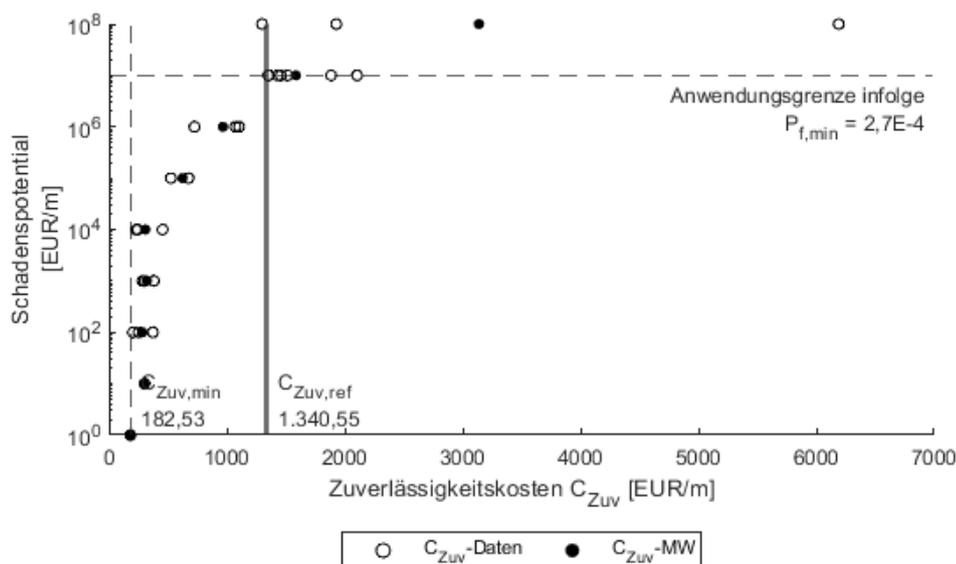


Abb. 5 Optimierte Zuverlässigkeitskosten für Schadenspotentiale von 1 EUR/m bis 100 Mio. EUR/m

4 Diskussion

Mit der in diesem Beitrag beschriebenen Methodik gehen Anwendungsgrenzen und methodische Limitierungen einher, welche es zu berücksichtigen gilt. So besitzt die Entscheidung für oder gegen den Bau eines Flussdeiches weitere als nur eine ökonomische Dimension. Diese ergeben sich beispielsweise aus gesellschaftlichen, moralischen oder umwelttechnischen Belangen.

Darüber hinaus ist die Methodik infolge der Auswertung von Grenzzustandsgleichungen auf die Anwendung für technische Hochwasserschutzmaßnahmen beschränkt und berücksichtigt bislang auch kein Investitionskriterium oder ein Kriterium zur Maßnahmenauswahl. Diese bleiben den Entscheider:innen vorbehalten.

Ebenso vernachlässigt die Methodik zeitliche Veränderung von Eingangsgrößen und Kosten, welche sich ggf. aus den Umwelteinflüssen oder Entwicklungen des Finanzmarktes ergeben können.

Abschließend ist anzumerken, dass die Methodik in den ganzheitlichen HWRM-Ansatz zu integrieren ist. Das heißt, sie sollte bestenfalls zur Erfüllung lokaler Risikoanforderungen aus einer übergeordneten HWRM-Strategie angewandt werden.

5 Fazit und Ausblick

Mit diesem Beitrag wird eine Methodik zur Modellierung und Optimierung von Zuverlässigkeits- und Risikokosten technischer Hochwasserschutzmaßnahmen vorgestellt. Diese dient als Werkzeug im ganzheitlichen HWRM-Ansatz und ermöglicht die Erfüllung von lokalen Anforderungen hinsichtlich der Zuverlässigkeit von technischen Maßnahmen. Sie unterstützt die lokale Maßnahmenplanung, indem sie das örtliche Hochwasserrisiko zu einer Eingangsgröße des Planungsprozesses entwickelt.

In Zukunft gilt es, die für die Anwendung notwendigen Grundlagen zu verbessern. Diese sind im Kontext des Anwendungsbeispiels u. a. die Verteilungen zu bodenmechanischen und hydrologischen Kenngrößen. Dies geschieht für die Ingenieurpraxis bereits durch die

Überarbeitung des DWA M552 und die Arbeiten des DGGT-AK 2.15. Weiterhin ist die Methodik auf nicht-technische Maßnahmentypen zu übertragen und für die Integration globaler Versagenswahrscheinlichkeiten zu erweitern.

Literatur

- Arbeitskreis KLIWA (2021): Klimawandel in Süddeutschland: Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen, Klimamonitoring im Rahmen der Kooperation KLIWA.
- Bachmann, D. (2012): Beitrag zur Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems zur Bewertung und Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen, Dissertation, RWTH Aachen.
- DWA (2022): Merkblatt DWA M520 - Probabilistische Methoden im Wasserbau, Gelbdruck, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- Heyer, T. (2011): Zuverlässigkeitsbewertung von Flussdeichen nach dem Verfahren der logistischen Regression, In: Dresdner wasserbauliche Mitteilungen, Band 46, Dresden.
- IPCC (2022): Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Schweiz.
- Jüpner, R. (2018): Hochwasserrisikomanagement 2030 - ein Ausblick, In: S. Heimerl (Hrsg.): Vorsorgender und nachsorgender Hochwasserschutz: Ausgewählte Beiträge aus der Fachzeitschrift WasserWirtschaft, Springer Vieweg.
- Özer, I. E.; van Damme, M. & Jonkman, S. N. (2020): Towards an International Levee Performance Database (ILPD) and its Use for Macro-Scale Analysis of Levee Breaches and Failures, *Water*, 12(1), 119.
- Plate, E. J. (1993): Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure: Mit 59 Tabellen, Ernst & Sohn.
- Schüttrumpf, H. (2017): Risikoanalysen für Flussdeiche, *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 10(10), 592-595.
- Schwiersch, N. und Stamm, J. (2022): Geometric and material variability of the probability of landward slope failure for homogeneous river levees, *Sustainability*, 14(5)
- Tang, K. S.; Man, K. F.; Kwong, S. & He, Q. (1996): Genetic Algorithms and their Applications, *IEEE Signal Processing Magazine*, November, 22-37.
- Winston, P. H. (2010): Lecture 13: Learning: Genetic Algorithms, MIT Massachusetts Institute of Technology.

Anschrift der Verfasser

Dipl.-Ing. Niklas Schwiersch
Fichtner Water & Transportation GmbH
Sarweystraße 3, D-70191 Stuttgart
niklas.schwiersch@fwt.fichtner.de