

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Huber, Nils P.; Weichert, Roman**

## **Probabilistische Methoden im Wasserbau – eine Möglichkeit für Fischaufstiegsanlagen?**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/110551>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Huber, Nils P.; Weichert, Roman (2021): Probabilistische Methoden im Wasserbau – eine Möglichkeit für Fischaufstiegsanlagen?. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Die Variabilität natürlicher Prozesse – Eine Herausforderung bei der Planung von Fischaufstiegsanlagen. 7. Kolloquium zur Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstraßen 18. und 19. November 2021 Onlineveranstaltung. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 35-51.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



## **Probabilistische Methoden im Wasserbau – eine Möglichkeit für Fischaufstiegsanlagen?**

Prof. Dr.-Ing. Nils P. Huber, Bundesanstalt für Wasserbau  
Dr. sc. tech. Roman Weichert, Bundesanstalt für Wasserbau

### **Einleitung**

Die Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit an den Bundeswasserstraßen ist mit einer Vielzahl an grundsätzlichen und komplexen Fragestellungen bereits innerhalb der zentralen Fachgebiete Ökologie und Ingenieurwesen verknüpft. Deren Überlagerungen in jedem individuellen Anwendungsfall im Zuständigkeitsbereich der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes resultiert in einem breiten Spektrum an Herausforderungen. Für die Planung und Bemessung von Fischaufstiegsanlagen (FAA) liegt mit dem DWA-Merkblatt 509 und den ergänzenden, über das Infozentrum Wasserbau (IZW) verfügbaren Empfehlungen für Standorte an Bundeswasserstraßen ein Bemessungsstandard vor, der einen Umgang mit einigen dieser Herausforderungen ermöglicht. Für die Bewältigung verbleibender Herausforderungen in der Schnittstelle Ökologie und Ingenieurwesen liegt häufig nur ein eingeschränktes Wissen und nur begrenzt Erfahrungen vor, auch wenn diese durch Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie im Rahmen von Umsetzungsprojekten stetig erweitert werden. Dieses Defizit resultiert letztlich in so genannten Unsicherheiten, die letztlich aus der Zufälligkeit natürlicher Prozesse (so genannte aleatorische Unsicherheiten) und aus unserem mangelnden Wissen über die in der Natur ablaufenden Prozesse und damit zwangsläufig aus unseren stets unzureichenden Modellvorstellungen und Modellansätzen (so genannte epistemische Unsicherheiten) resultieren.

Auch unter Unsicherheiten Empfehlungen zur Gestaltung und zum Betrieb von FAA zu treffen, ist eine bedeutende Herausforderung. Zentrales Ziel bei der Errichtung und dem Betrieb von FAA ist, wie bei allen wasserbaulichen Anlagen, die Erfüllung der Erwartungen hinsichtlich eines ordnungsgemäßen Betriebs und an die Funktionsfähigkeit aller relevanten Komponenten zu erfüllen. Mit den oben genannten Unsicherheiten bei FAA geht eine Wahrscheinlichkeit für ein zumindest teilweises Versagen der Funktionsfähigkeit einher.

Ein naheliegender Weg zum Umgang mit Unsicherheiten und den Ursachen für das Versagen von FAA ist es, Aussagen über bestimmte Prozesse unter Nutzung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen und den daraus ableitbaren Wahrscheinlichkeiten zu treffen. Hierauf fußende probabilistische Methoden sind vielfältig und in einem breiten Spektrum im Zusammenhang mit der Planung und dem Betrieb von FAA einsetzbar.

### **Versagen der Funktion einer Fischaufstiegsanlage**

Für die weiteren Ausführungen im vorliegenden Beitrag soll der Begriff des Versagens der Funktionsfähigkeit einer FAA veranschaulicht werden. Hierfür bietet sich zunächst die Perspektive eines individuellen Fisches an. Ein Versagen tritt demnach dann ein, wenn dieser Fisch die FAA nicht in einer für die Fischart akzeptablen Zeitdauer und einem akzeptablen Energieaufwand erfolgreich passieren kann.

Der Aufstieg eines Individuums lässt sich über die Aneinanderreihung einzelner, vom Fisch zu bewältigender Aufstiegsaufgaben betrachten (Bild 1). Jede Aufgabe ist dabei mit Bemessungsvorgaben verknüpft, wie z. B. Regeln zur Lage und Gestaltung des Einstiegs oder der Bemessung von Engstellen (DWA 2014). Für ein Versagen des Aufstiegs reicht es bereits aus, dass lediglich eine der Aufstiegsaufgaben nicht erfolgreich gelöst wird. Die Wahrscheinlichkeit für ein Versagen ist damit eng gekoppelt an die Wahrscheinlichkeit für ein Scheitern eines Individuums an den einzelnen Aufstiegsaufgaben. Und selbst wenn alle Einzelaufgaben erfolgreich gelöst werden und der Fisch vom Unterwasser ins Oberwasser aufgestiegen ist, kann ein Versagen dann vorliegen, wenn die gesamthaft benötigte Zeit zu lang oder die eingesetzte Energie zu groß war und zum Beispiel die Passage einer weiteren Stauanlage nicht mehr rechtzeitig möglich ist.



Bild 1: Einzelaufgaben im Rahmen eines Fischaufstiegs (Foto: Wehr Geesthacht an der Elbe, Stefan Lühr)

Die Wahrscheinlichkeiten, dass die Einzelaufgaben nicht gelöst werden können, hängen von einer Vielzahl an Einflussgrößen ab und sind derzeit grundsätzlich nicht seriös bestimmbar. So spielen neben biologischen Einflussgrößen, wie z.B. Fischart, Alter, Größe, individuelle und momentane Leistungsfähigkeit, Motivation, auch die zum Zeitpunkt des Aufstiegsversuchs vorherrschenden Randbedingungen abiotischer Größen wie Hydraulik, Temperatur, Morphologie, Trübung, Lärm etc. eine Rolle.

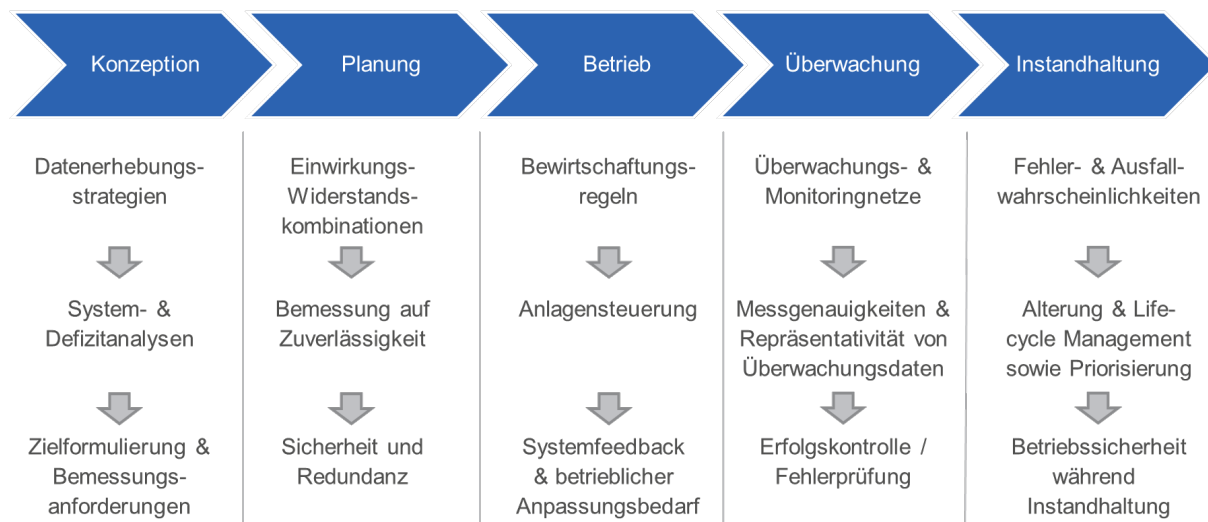
Funktionsfähige Fischaufstiegsanlagen sind, neben anderen Aspekten, zentrale Bausteine, um das Ziel selbsterhaltener Fischpopulationen zu erreichen. Die Erfüllung des derart formulierten artspezifischen Ziels wird nicht am Misserfolg eines einzelnen Fisches bei der Passage einer FAA gemessen. Ein Versagen des Bauwerks FAA in seiner angedachten Funktion ist erst dann gegeben, wenn, über einen längeren Zeitraum betrachtet, nicht hinreichend viele Fische eine FAA passieren können. Über eine ausreichende Anzahl an Individuen ergibt sich demnach die Versagenswahrscheinlichkeit als relative Häufigkeit, d. h. als Verhältnis der Anzahl der Fische, welche eine FAA nicht passieren, zur Gesamtzahl der diesen Versuch unternehmenden Individuen.

Ergänzend dazu muss die Relevanz der betrachteten FAA im Kontext der für den Erhalt der Population relevanten Elemente des Gesamtsystems beurteilt werden, z. B. wie viele Stauanlagen sind zu überwinden, um verschiedene lebensnotwendige Habitate miteinander zu verbinden.

## Einblicke in probabilistische Methoden im Wasserbau

Die Probabilistik umfasst die wahrscheinlichkeitsbasierte Beschreibung von Zufälligkeiten und unter anderem darin begründeten Unsicherheiten und bildet neben der Statistik einen Pfeiler auf dem Gebiet der Stochastik.

Einen Einblick in die Anwendungsmöglichkeiten probabilistischer Methoden im Wasserbau liefert DWA (2022). Auch im Bereich der ökologischen Durchgängigkeit sind sie vielfältig und umfassen den gesamten Bereich von der Konzeption bis hin zur Instandhaltung von Anlagen (Bild 2).



*Bild 2: Anwendungsfelder für probabilistische Methoden im Zusammenhang mit wasserbaulichen Anlagen*

In der wasserbaulichen Praxis können Datenerhebungsstrategien auf probabilistischer Grundlage wertvolle Dienste bei der Verbesserung der Zuverlässigkeit der erhobenen Daten liefern. Beispiele sind die Messdauer und der Messort von Fließgeschwindigkeiten in einer FAA (Henning und Weichert, 2020) oder die Berücksichtigung biologischer Variabilität wie z.B. Unterschiede in der Abundanz, der Größe oder dem Verhalten von Fischen bei der Konzeptionierung fischökologische Versuche (Heynen und Schütz, 2022). Im Ergebnis können Defizite, wie eine erkannte unzureichende Passierbarkeit einer Fischaufstiegsanlage, in probabilistisch formulierten Zielen, z. B. eine angestrebte Passierbarkeitswahrscheinlichkeit für definierte Fischarten, und hieran orientierten Konzepten münden.

Werden Anlagen oder Bauwerke betrachtet, so fußt die in der Tragwerksplanung eingeführte Bemessungspraxis nach dem Teilsicherheitskonzept auf einer wahrscheinlichkeitsorientierten Behandlung von Einwirkungen und Widerständen sowie deren Kombination zu verschiedenen

Lastfällen. Während üblicherweise eine Begrenzung der Wahrscheinlichkeit für ein Bauteilversagen auf einen Zielwert von  $P_v \approx 1 \cdot 10^{-6}$  pro Jahr erfolgt (DIN EN 1990 2010), wird dieser Wert für Wasserbauwerke an Wasserstraßen aufgrund der üblichen langen Nutzungsdauern auf  $P_v \approx 7 \cdot 10^{-7}$  pro Jahr verringert (Stauder 2013). Eine Erweiterung dieser impliziten Berücksichtigung von Versagenswahrscheinlichkeiten ist die probabilistische Betrachtung der Zuverlässigkeit  $Z$  auf Grundlage so genannter Grenzzustandsgleichungen der allgemeinen Form

$$Z = R - S \quad \text{(Gleichung 1)}$$

In diesen liegen hinter dem Widerstand  $R$  und der Einwirkung  $S$  beispielsweise im Ingenieurwesen bekannte Bemessungsgleichungen, in welche die Variablen, aus denen sie gebildet werden, zusammen mit ihren Zufallsverteilungen Eingang finden.

Ein weiteres Anwendungsgebiet der Probabilistik im Wasserbau ist die Bewirtschaftung und der Betrieb von Stauräumen oder Wasserkraftanlagen. Für eine Anlagensteuerung kann auf Grundlage eines Systemfeedbacks, wie z. B. der Wahrscheinlichkeit für eine Auffindbarkeit des Einstiegs von Fischauftiegsanlagen, zielgerichtet ein Anpassungsbedarf für den Betrieb abgeleitet werden (Zinkhahn und Simons 2022). Die Verknüpfung der Auffindbarkeit des Einstiegs in eine FAA mit dem Anlagenbetrieb wird im Verlaufe dieses Beitrags noch einmal aufgegriffen. Den Zusammenhang zwischen dem Anlagenbetrieb und dem Fischabstieg beleuchten Schmitt-Heiderich et al (2013) und Zschke et al. (2021).

Im Zuge einer Überwachung von Anlagen oder Prozessen stellen sich, ebenso wie bei der grundlegenden Datenerhebung, Fragen hinsichtlich räumlich und auch zeitlich sinnvoll gestalteter Überwachungs- und Monitoringstrategien sowie Fragen in Bezug auf die Detektions- und Beobachtungswahrscheinlichkeit von Phänomenen. Im Ergebnis lassen sich Aussagen zum Erfolg von Maßnahmen und zur Wahrscheinlichkeit des Eintretens von nicht beabsichtigten Ereignissen oder Fehlern treffen.

Aufgrund der langen Nutzungsdauern und auch der zentralen Bedeutung ist die Frage nach der Ausfallsicherheit und der zu ihrer Maximierung dienenden Instandhaltung ein ausgesprochen wichtiges Thema bei wasserbaulichen Anlagen, worauf z. B. Moore und Rutherford (2017) am Beispiel der Verkläuserung an Schlitzen einer FAA hinweisen. Die Frage nach der Wahrscheinlichkeit für ein Versagen einer Anlage bzw. den Ausfall ihrer Funktion stellt sich über den Betrieb hinaus auch mit Blick auf Instandsetzungsphasen, in welchen die ökologische Durchgängigkeit möglichst keine Beeinträchtigung erfahren sollte.

## **Ausgewählte Methoden zur probabilistischen Prozess- und Versagensbetrachtung**

### *Überblick*

Für die Reduzierung der Wahrscheinlichkeit für ein Versagen der Funktionsfähigkeit der FAA ist es wichtig, die relevanten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge im Gesamtsystem FAA zu finden und zu beschreiben. Für eine probabilistische Bewertung von Prozessen existieren verschiedene Werkzeuge, um Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge strukturiert-logisch zu beschreiben und wahrscheinlichkeitbasiert auszuwerten (DWA 2022). Hierzu zählen Fehlerbäume (DIN 25424-1

1981-09 sowie DIN25424-2 1990-04) oder auch die auf den Einflussdiagrammen aufbauenden Bayes-Netze (Kjærulff und Madsen 2013).

### Fehlerbäume

Fehlerbäume haben im Zusammenhang mit der Sicherheit von einzelkomponentenbasierten Systemen eine weite Verbreitung gefunden, so in der Nuklearindustrie (NUREG 1975) oder auch der Luft- und Raumfahrt (Vesely et al. 2002). Im Grundsatz sind sie auch sehr gut dafür geeignet, probabilistische Versagens- bzw. Zuverlässigkeitsbetrachtungen im Wasserbau durchzuführen. In Bild 3 ist ein beispielhafter Ausschnitt eines Fehlerbaums für das Versagen der Funktion einer FAA dargestellt, welcher auf der obersten Ebene die in Bild 1 genannten Einzelaufgaben über eine logische *oder*-Verknüpfung verbindet. Beispielhaft ist dieser Fehlerbaum unterhalb der Ebene der Einzelaufgaben (dunkelgrau) für das Versagen der Passierbarkeit der FAA um weitere logische Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge erweitert (hellgrau sowie schraffierte Elemente).

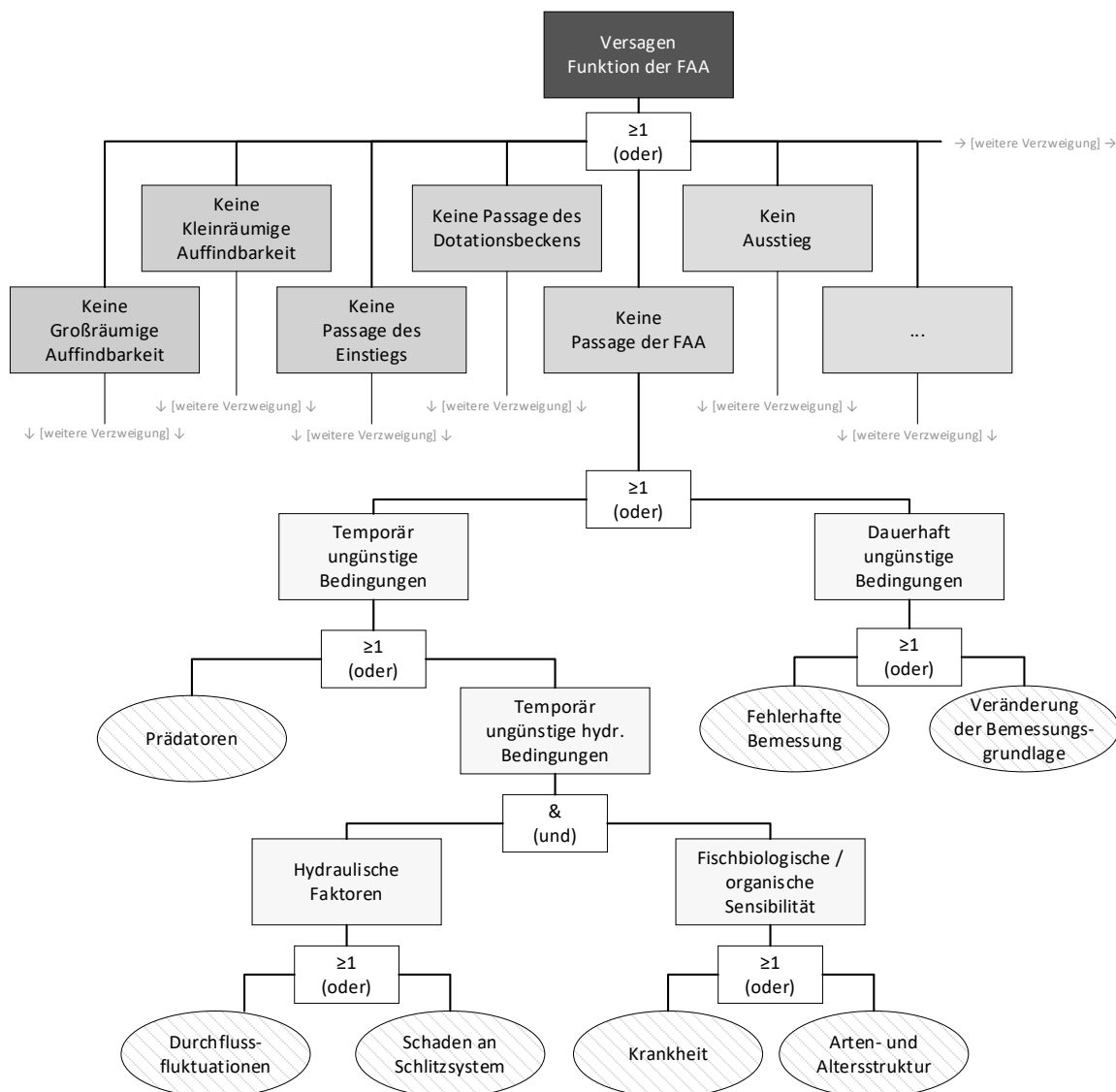


Bild 3: Beispielhafter Fehlerbaum für die logische Ursache-Wirkungs-Abbildung von Prozessen in Richtung eines Versagens der Funktion einer Fischaufstiegsanlage in Schlitzpassbauweise

Werden nun den schraffierten Eingangsereignissen und Eingangszuständen Wahrscheinlichkeiten zugeordnet, so kann die Wahrscheinlichkeit für ein Versagen der Funktion der FAA über die mit den logischen *und*- sowie *oder*-Toren verbundenen Rechenregeln der Boole'schen Algebra sukzessive von unten nach oben über alle Zwischenereignisse berechnet werden:

- *und*-Tore (&) entsprechen einem parallelen System (alle unterhalb verknüpften Ereignisse müssen eintreten):

$$P_{\text{Folgeereignis [und]}} = \prod_i P_{\text{Ereignis } i} \quad (\text{Gleichung 2})$$

- *oder*-Tore ( $\geq 1$ ) entsprechen einem seriellen System (mindestens eines der unterhalb verknüpften Ereignisse muss eintreten):

$$P_{\text{Folgeereignis [oder]}} = 1 - \prod_i (1 - P_{\text{Ereignis } i}) \quad (\text{Gleichung 3})$$

### Bayes-Netze

Während Fehlerbäume der probabilistischen Analyse eines Endzustands dienen, zumeist eines Systemversagens, bieten Bayes-Netze vielseitigere und interaktivere Möglichkeiten zur evidenzgestützten Analyse und für ein darauf aufbauendes Management von komplexen Systemen. Auch mit ihnen kann z. B. die Frage nach der Wahrscheinlichkeit für ein Versagen von Systemen oder einzelner Komponenten, z. B. der Nicht-Erfüllung der Einzelaufgaben eines Fischaufstiegs (siehe Bild 1), strukturiert untersucht werden. Bayes-Netze sind mit Wahrscheinlichkeiten unterlegte gerichtete (stets eindeutige Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge), azyklische (ohne Zirkelbezüge) Graphen. Sie bestehen aus Verknüpfungen von Ereignissen und Zuständen in Form von Knoten, denen Wahrscheinlichkeitsinformationen zugeordnet sind. In der logischen Abfolge vorlaufende Ereignisse (Elternknoten) beeinflussen die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten logisch nachfolgender Ereignisse (Kinderknoten), was durch bedingte Wahrscheinlichkeiten ausgedrückt wird. Mit der Kombination der drei in Bild 3 dargestellten zentralen Verbindungstypen lassen sich beliebig große Netze erzeugen und damit auch umfangreiche und damit komplexe Problemstellungen beschreiben und in Bezug auf konkrete Fragestellungen vielseitig auswerten. Hierfür sind auch verschiedene Softwarewerkzeuge verfügbar.

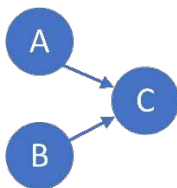
Vorbereitend für die Nutzung eines Bayes-Netzes sind die ebenfalls in Bild 3 dargestellten Wahrscheinlichkeitsangaben für alle denkbaren Ausprägungskombinationen der Zufallsgrößen jedes Knotens zu definieren.

#### Verbindungstyp

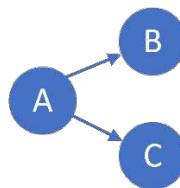
Seriell



Konvergent



Divergent



#### Wahrscheinlichkeiten zur Beschreibung der probabilistischen Zusammenhänge

$P(A), P(B|A), P(C|B)$

$P(A), P(B), P(C|A,B)$

$P(A), P(B|A), P(C|A)$

*Bild 4: Die drei zentralen Verbindungstypen zwischen Eltern- und Kinderknoten und die für den Einsatz eines Bayes-Netzes vorzugebenden Wahrscheinlichkeitsinformationen*

Die mathematischen Grundlagen für Bayes-Netze bilden

1. das Theorem von Bayes:

$$P(A_i|B_j) = \frac{P(B_j|A_i) \cdot P(A_i)}{P(B_j)} \quad (\text{Gleichung 4})$$

2. sowie der Satz der totalen Wahrscheinlichkeit:

$$P(A_i) = \sum_{j=1}^n P(A_i|B_j) \cdot P(B_j) \quad (\text{Gleichung 5})$$

Jedes einzelne der  $m$   $A$ -Ausprägungen ( $i = 1, \dots, m$ ) bzw.  $n$   $B$ -Ausprägungen ( $j = 1, \dots, n$ ) ist eindeutig von jeweils allen anderen unterscheidbar. Beschreibt die Menge möglicher  $A$ -Ausprägungen den Fischaufstieg (z. B.  $A_+$  = *erfolgreicher Fischaufstieg* und das Komplementärereignis  $A_-$  = *kein Fischaufstieg*) und die Menge aller eindeutigen  $B$ -Ausprägungen die Fischart (z. B.  $B_1$  = *Mai-fisch*,  $B_2$  = *Nase*,  $B_3$  = *Lachs*), so kann die Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Fischaufstiegs durch einen Lachs  $P(A_+|B_3) = P(\text{erfolgreicher Fischaufstieg}|\text{Lachs})$  nach Gleichung 4 bestimmt werden. Die Gesamtperformanz der FAA, d. h. die Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Fischaufstiegs  $P(A_+) = P(\text{erfolgreicher Fischaufstieg})$ , ergibt sich dabei durch Summierung über alle Fischarten entsprechend Gleichung 5.

Die Anwendungsmöglichkeiten von Bayes-Netzen im Zusammenhang mit FAA soll nachfolgend am Beispiel der großräumigen Auffindbarkeit an einem Standort mit Wehr und Wasserkraftanlage, der ersten der zahlreichen Einzelaufgaben für Fische (Bild 1), dargestellt werden.

### **Aufbau eines beispielhaften Bayes-Netzes für die großräumige Auffindbarkeit**

Die großräumige Auffindbarkeit einer FAA steht unter anderem in Abhängigkeit zu den folgenden Einflussfaktoren:

- Hydrologie (Abflussgeschehen und darüber geprägte hydraulische Bedingungen)
- Betriebsweise von Wehr und vorhandener Wasserkraftanlage (WKA)
- Gewässerbreite
- Angebot an Einstiegen in Anzahl und Anordnung
- Fischspezifische Faktoren wie das Wanderverhalten und der Wanderzeitraum

Die genannten Faktoren stehen in vielfältiger Art miteinander in Abhängigkeit. So ist die Betriebsweise von Wehr und Wasserkraftanlage vom Abflussgeschehen abhängig. Dieses weist in statistisch belastbaren Zeiträumen eine jahreszeitliche Differenzierung auf, was ebenso für die Wanderzeiträume der Fische gilt.

Je nach Betriebsweise von Wehr und Wasserkraftanlage ergeben sich unterschiedliche hydraulische Bedingungen im Unterwasser. Eine abflussabhängig hauptsächliche Beaufschlagung der Wasserkraftanlage erzeugt, eine ufernahe Anordnung der Turbinen vorausgesetzt, ein starkes Strömungssignal an diesem Ufer. Die Beaufschlagung einzelner Wehrfelder erfolgt in Abhängigkeit vom Abfluss, von den an bestimmte weitere Kriterien gekoppelten Betriebsregeln oder auch beeinflusst von Revisionsarbeiten. Zusätzlich zur abflussabhängigen Betriebsweise prägt die Höhe des Abflusses selbst die hydraulischen Signale im Unterwasser mit aus.



Je nach Gewässer- und Anlagenbedingungen sind mehrere Einstiege in eine Fischaufstiegsanlage denkbar. Die Anzahl und Anordnung bildet damit eine wichtige Gestaltungsgröße und nimmt Einfluss auf die Auffindbarkeit. Vorliegend seien drei unterschiedliche Einstiegsmöglichkeit an einer einachsigen, kompakten Staustufe theoretisch denkbar, die auch miteinander kombiniert werden können: am wehrseitigen Ufer (*Wehrufer*), am gegenüberliegenden Ufer neben der dort angeordneten Wasserkraftanlage (*WKA-Ufer*) oder im Trennpfeiler zwischen der als zweifeldrig angenommenen Wehranlage und der Wasserkraftanlage (*Pfeiler*).

Bild 5 zeigt das hieraus konzeptionell abgeleitete Einflussdiagramm (gerichteter, azyklischer Graph) als Grundlage für ein Bayes-Netz.

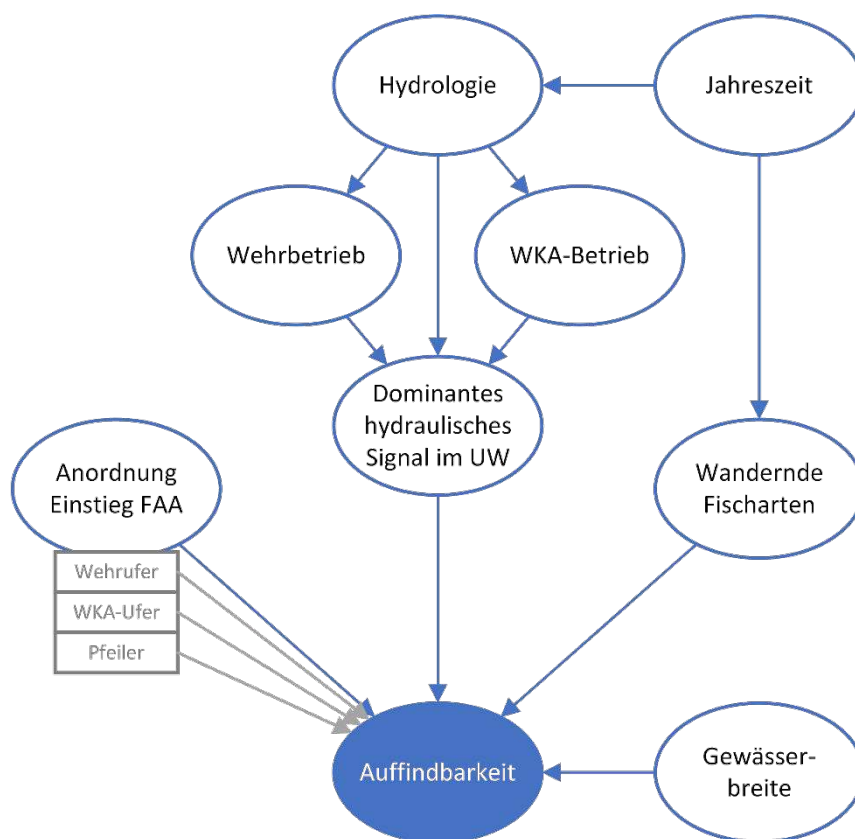


Bild 5: Einflussdiagramm als Grundlage eines Bayes-Netzes für die großräumige Auffindbarkeit einer FAA

Die Vielfalt an möglichen hydrologischen Bedingungen, die hiervon neben weiteren Faktoren abhängigen Betriebsweisen von Wehr und Wasserkraftanlage, das artspezifische Wanderverhalten von Fischen oder auch die Anordnung von Einstiegen sowie Gewässerbreiten bis hin zur Auffindbarkeit müssen im abschließenden Schritt über (bedingte) Wahrscheinlichkeiten quantifiziert werden. Damit wäre die zentrale Bedingung für die Überführung eines Einflussdiagramms in ein Bayes-Netz erfüllt.

Die Wahrscheinlichkeit für das Treffen einer bestimmten Jahreszeit ist diskret gleichverteilt ( $P(\text{Herbst}) = P(\text{Winter}) = P(\text{Frühjahr}) = P(\text{Sommer}) = 0,25$ ). Für jede Jahreszeit sind nun

die bedingten Wahrscheinlichkeiten  $P(\text{Abfluss}|\text{Jahreszeit})$  vorzugeben. Unter Rückgriff auf verfügbare hydrologische Zeitreihen und eine vereinfachte Diskretisierung in Abflussfenster kann dies beispielhaft entsprechend der in Tabelle 1 dargestellten Wahrscheinlichkeitsinformationen für den Knoten *Hydrologie* münden. Sie orientiert sich an einer angenommenen Gammaverteilung der Abflüsse mit relativ ausgeprägter Saisonalität. Die Werte für das Gesamtjahr ergeben sich durch Multiplikation mit den (A-priori-)Wahrscheinlichkeiten für die Jahreszeiten und nachfolgender Summation unter Anwendung von Gleichung 5.

Tabelle 1: *Beispiel: Bedingte Wahrscheinlichkeiten  $P(\text{Abfluss}|\text{Jahreszeit})$  sowie die Wahrscheinlichkeiten  $P(\text{Abfluss})$  für das Gesamtjahr für den Knoten Hydrologie*

Abfluss Q [m <sup>3</sup> /s]	Herbst	Winter	Frühjahr	Sommer	Gesamtjahr
< 300	0,35	0,03	0,08	0,80	0,32
300 bis 600	0,50	0,36	0,47	0,18	0,38
600 bis 1000	0,14	0,48	0,38	0,02	0,25
1000 bis 1500	0,01	0,12	0,06	~0	0,05
> 1500	~0	0,01	0,01	~0	~0

Tabelle 2 zeigt beispielhaft die Abhängigkeit des WKA-Betriebs von der Hydrologie. Grundlage für die Wahrscheinlichkeitswerte können Betriebsregeln bzw. langjährige statistische Auswertungen des realen Betriebs sein. Auch hier ergeben sich die Gesamtwahrscheinlichkeiten über die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten der einzelnen Abflussfenster aus der Anwendung von Gleichung 5.

Tabelle 2: *Beispiel: Bedingte Wahrscheinlichkeiten  $P(\text{WKA} - \text{Betrieb}|\text{Abfluss})$  sowie Wahrscheinlichkeit  $P(\text{WKA} - \text{Betrieb})$  für die beiden möglichen Betriebszustände*

WKA-Betrieb	Abfluss Q [m <sup>3</sup> /s]					Gesamt
	< 300	300 - 600	600 - 1000	1000 - 1500	> 1500	
In Betrieb	0,98	0,9	0,85	0,6	0,5	0,9
Außer Betrieb	0,02	0,1	0,15	0,4	0,5	0,1

Während z. B. mit hydrologischen Zeitreihen oder der langjährigen Betriebsweise einer WKA belastbare und statistisch auswertbare Daten vielfach vorliegen, kann die Angabe bedingter Wahrscheinlichkeiten für andere Knoten in einem Bayes-Netz eine besondere Herausforderung darstellen. Einer solchen steht der Ersteller eines Bayes-Netzes oft dann gegenüber, wenn komplexe, multivariate bedingte Wahrscheinlichkeiten vorgegeben werden müssen. Im vorliegend betrachteten Fall ist dies z. B. der Knoten *Auffindbarkeit*, welcher die zentrale Wahrscheinlichkeitsaussage liefern soll. Es ist erforderlich, für alle Kombination seiner Ausprägungen („gut“ und „schlecht“) mit allen Ausprägungskombinationen seiner Elternknoten (*Gewässerbreite*, *Wandernde Fischarten*, *Dominantes hydraulisches Signal im UW*, drei Möglichkeiten der *Anordnung Einstieg FAA*) Wahrscheinlichkeitswerte vorzugeben. Wird toleriert, dass Wahrscheinlichkeiten selbst als mit (Rest-)Unsicherheiten behaftet angesehen werden können und nicht zwingend dem Anspruch auf absolute Genauigkeit erfüllen müssen, so können Wahrscheinlichkeiten als eine Abstraktion oder

Modellvorstellung der realen Zufallseigenschaften von Systemen und Prozessen verstanden werden. Diese Modellvorstellung kann zukünftig mit wachsendem Informationshintergrund ergänzt und verbessert werden. Vor diesem Hintergrund sind beispielsweise folgende Herangehensweisen zur Bestimmung von Wahrscheinlichkeiten im Rahmen des Aufbaus und der Nutzung von Bayes-Netzen denkbar:

- Statistische Datenauswertungen
- Rückgriff auf Analysen ähnlicher Fragestellungen oder in gewissen Grenzen vergleichbarer Konstellationen (ähnliche FAA), die ggf. auch in Fachliteratur dokumentiert sind
- Modellgestützte Variations- bzw. Sensitivitätsbetrachtungen
- Schätzungen

Im Ergebnis resultiert das in Bild 6 dargestellte, für den vorliegenden Beitrag beispielhaft erstellte Bayes-Netz. Das Bayes-Netz aus Bild 5 ist dabei um eine bewertende Gegenüberstellung von Nutzen (Auffindbarkeit) und Kosten (baulicher Aufwand für die Einstiege) erweitert worden, welche als Nutzen-Kosten-Indikator einen Wert auf einer Skala von -1 bis 1 ausweist. Eine Bewertung -1 entspricht einem maximalen baulichen Aufwand, d. h. der Umsetzung von drei Einstiegen FAA, jeweils an den Ufern und im Trennpfeiler zwischen WKA und dem Wehrbereich, bei einer vollständig fehlenden Auffindbarkeit ( $P(\text{Auffindbarkeit} = \text{Schlecht}) = 1$ ). Der Wert 1 entspricht einer optimalen Auffindbarkeit ( $P(\text{Auffindbarkeit} = \text{Gut}) = 1$ ) ohne jeglichen Einstieg. Beide Enden der Skala sind damit rein theoretisch. Dazwischen skaliert die Bewertung allerdings mit den Wahrscheinlichkeiten für die verknüpften Elemente *Auffindbarkeit* und *Anordnung FAA*.

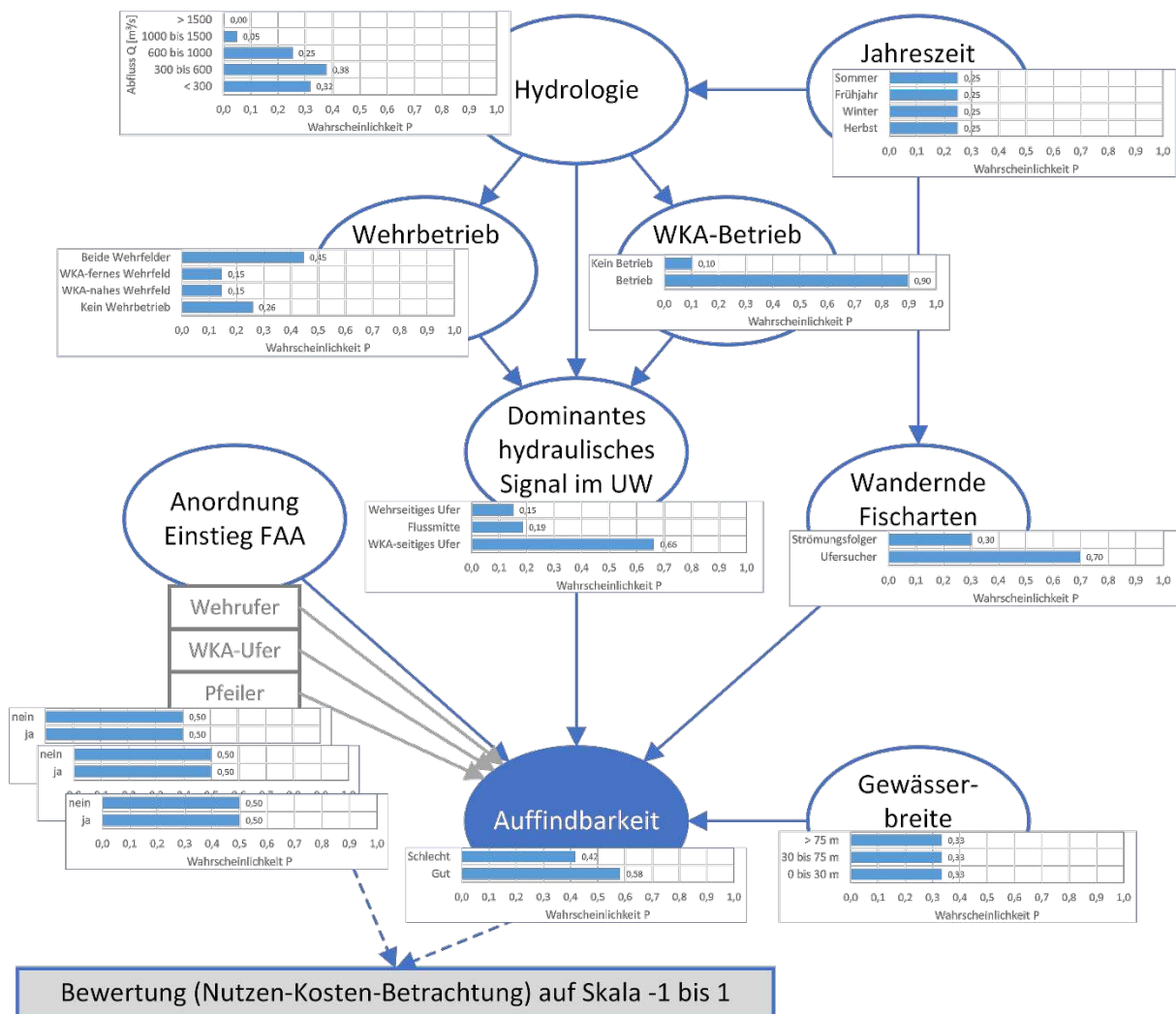


Bild 6: Beispielhaft erstelltes Bayes-Netz für die großräumige Auffindbarkeit einer FAA

In Bayes-Netzen dienen Messungen, Beobachtungen oder Annahmen zur Ausprägung bestimmter Knoten in einer Kausalkette (Berücksichtigung von Evidenzen) als bedeutende Grundlage und im Rahmen der Nutzung eines Bayes-Netzes als konkrete Veranlassung für eine Aktualisierung der Wahrscheinlichkeiten für die nicht beobachteten Knoten. Mit jeder Instanziierung eines Knotens (z. B.  $P(\text{Jahreszeit} = \text{Herbst}) = 1$  oder  $P(\text{Jahreszeit} \neq \text{Herbst}) = 0$ ) werden die abgebildeten probabilistisch formulierten Ursache-Wirkungszusammenhänge auf Basis der Gleichungen 4 und 5 aktualisiert und das System einer weitergehenden, konkreteren Diagnose zugänglich gemacht.

### Beispielhafte Nutzung eines Bayes-Netzes für die großräumige Auffindbarkeit

Die Anwendung des im vorherigen Abschnitt dargestellten Bayes-Netzes (Bild 6) auf eine Situation an einer Bundeswasserstraße, für welche die in Bild 6 definierten probabilistischen Randbedingungen zu *Hydrologie*, *Wehrbetrieb*, *WKA-Betrieb* und *Wandernde Fischarten* im Grunde Gültigkeit haben, wird nachfolgend für zwei ausgewählte Fragestellungen zur Auslegung und für das Anlagenmanagement beispielhaft illustriert.

*Betrachtung 1: Identifikation einer günstigen FAA-Anordnung (Beispiel Auslegung)*

Für unterschiedlich breite Gewässer und ohne weitere Differenzierung in Bezug auf wandernde Fischarten oder ein dominantes hydraulisches Signal im Unterwasser liefert das Bayes-Netz für den Knoten Auffindbarkeit die in Tabelle 3 dargestellten Wahrscheinlichkeiten.

Tabelle 3: Auffindbarkeit für unterschiedliche Gewässerbreiten

	0 bis 30 m	30 bis 75 m	> 75 m
Gut	0,70	0,58	0,46
Schlecht	0,30	0,42	0,54

In einem schmalen, „0 bis 30 m“ breiten Gewässer zeigt der relative Vergleich der Wahrscheinlichkeiten für die drei unterschiedlichen Einstiegsanordnungen in Bild 7, dass eine „gute“ Auffindbarkeit am ehesten durch eine Anordnung des Einstiegs der FAA am „WKA-Ufer“ erreichbar ist ( $P(\text{Anordnung Einstieg FAA} = \text{WKA-Ufer} | \text{Auffindbarkeit} = \text{Gut}; \text{Gewässerbreite} = 0 \text{ bis } 30 \text{ m}) = 0,63$ ). Möchte man nun wissen, wie hoch die absolute Wahrscheinlichkeit für eine gute Auffindbarkeit bei einer Anordnung des Einstiegs am WKA-Ufer ist, so wird diese vielversprechendste Einstiegsanordnung im Bayes-Netz festgelegt (instanziiert) und nun wiederum in Bezug auf die Auffindbarkeit ausgewertet. Dies resultiert in der Wahrscheinlichkeit  $P(\text{Auffindbarkeit} = \text{Gut} | \text{Gewässerbreite} = 0 \text{ bis } 30 \text{ m}, \text{Einstieg FAA an WKA-Ufer}) = 0,8$  für eine „gute“ Auffindbarkeit. Die Komplementärwahrscheinlichkeit ( $P = 0,2$ ) beschreibt die im Lichte aller anderen Einflussfaktoren (Hydrologie, WKA-Betrieb, Wandernde Fischarten etc.) verbleibenden Unsicherheiten in Bezug auf die Wirkungsweise dieser Einstiegsanordnung.

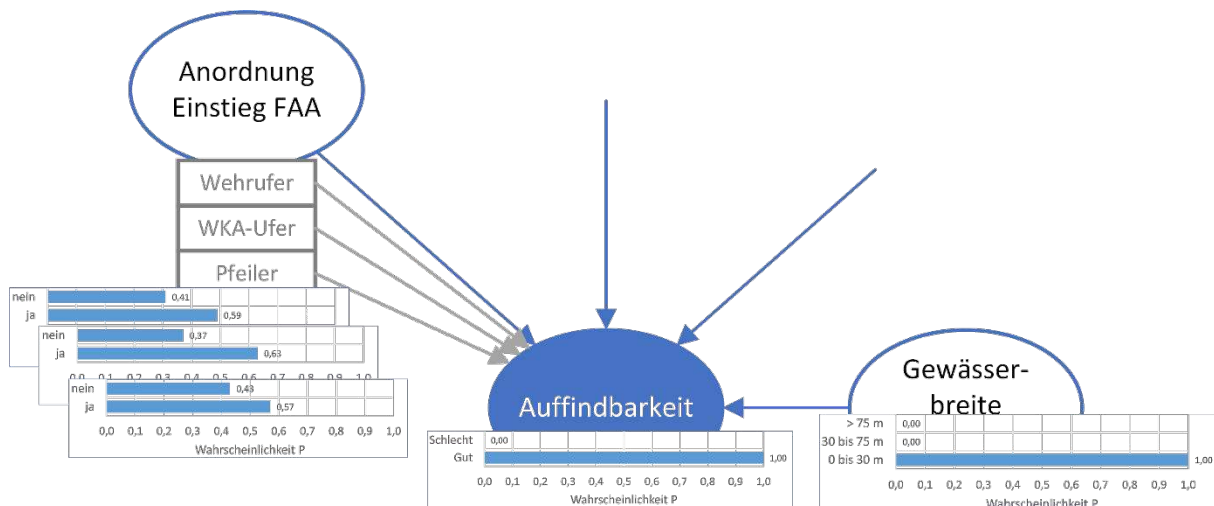


Bild 7: Hinweise auf eine günstige Anordnung des Einstiegs einer FAA für eine „gute“ Auffindbarkeit

Dem gegenüber schlagen sich im Ergebnis für breite Gewässer,  $P(\text{Auffindbarkeit} = \text{Gut} | \text{Gewässerbreite} > 75 \text{ m}, \text{Einstieg FAA an WKA-Ufer}) = 0,56$ , die im Mittel größeren Entfernungen eines Punktes im Gewässer zu einem an einem Ufer angeordneten Einstieg nieder. Erst mit einem zweiten Einstieg am gegenüberliegenden „Wehrufer“ kann die Auffindbarkeit

wieder deutlich verbessert werden ( $P(\text{Auffindbarkeit} = \text{Gut} | \text{Gewässerbreite} > 75 \text{ m}, \text{Einstieg FAA an WKA} - \text{Ufer}, \text{Einstieg FAA an Wehrufer}) = 0,76$ ). Diese Verbesserung begründet auch den Anstieg der Nutzen-Kosten-Bewertung von 0,16 auf 0,30 auf der zwischen -1 und 1 definierten Skala (Tabelle 4). Tabelle 4 zeigt für das hier behandelte Beispiel auch, dass in einem schmalen Gewässer (*Gewässerbreite* „0 bis 30 m“) die Anordnung eines zweiten Einstiegs aufgrund einer vergleichsweise geringeren Wahrscheinlichkeitszunahme, und der bereits hohen Wahrscheinlichkeit für eine „gute“ *Auffindbarkeit* bei einem Einstieg am „WKA-Ufer“, keine Verbesserung der Nutzen-Kosten-Bewertung bewirkt (N-K von 0,51 bzw. 0,50). Der Wahrscheinlichkeitszunahme steht der erhöhte Aufwand für einen zweiten Einstieg entgegen.

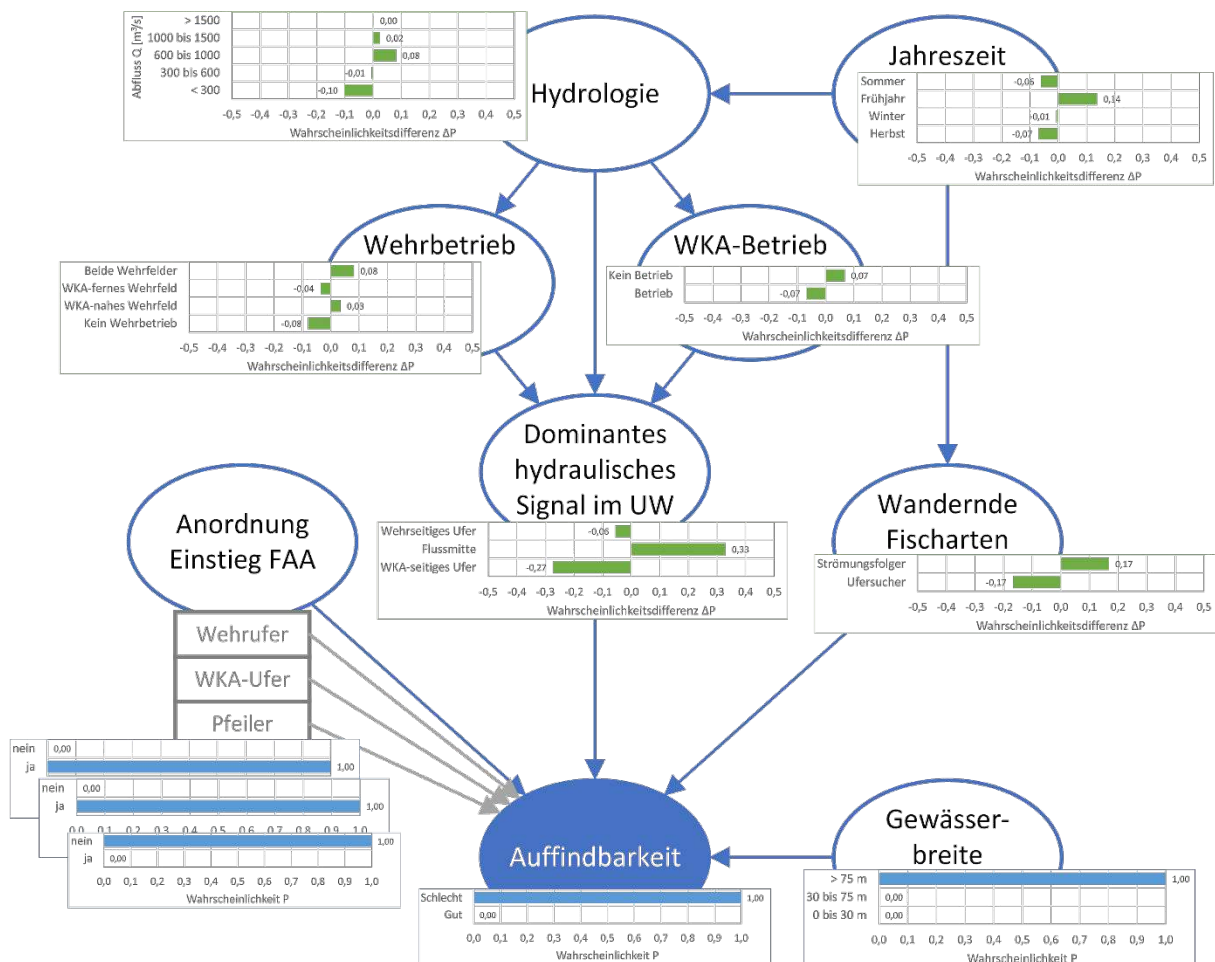
*Tabelle 4: Beispiel: Wahrscheinlichkeiten für eine „gute“ Auffindbarkeit (P) sowie Nutzen-Kosten-Bewertung (N-K) für unterschiedliche Anordnungen des FAA-Einstiegs und Gewässerbreiten*

Gewässerbreite	Anordnung Einstieg FAA					
	WKA-Ufer		Wehrufer		WKA-Ufer & Wehrufer	
	<i>P</i>	<i>N-K*</i>	<i>P</i>	<i>N-K*</i>	<i>P</i>	<i>N-K*</i>
0 bis 30 m	0,80	0,51	0,67	0,32	0,90	0,50
> 75 m	0,56	0,16	0,25	-0,29	0,76	0,30

\* Skala zwischen -1 (schlechtester Wert) und 1 (besten Wert)

*Betrachtung 2: Begleitumstände einer „schlechten“ Auffindbarkeit (Beispiel Management)*

Bei großer *Gewässerbreite* („> 75 m“) verbleibt entsprechend Tabelle 4 auch bei Einrichtung von FAA an beiden Ufern eine Wahrscheinlichkeit von  $P = 0,24$  für eine „schlechte“ *Auffindbarkeit*. Hauptsächlich ist diese auf die generell *wandernde Fischart* der „Strömungsfolger“ in der *Jahreszeit* „Frühjahr“ zurückzuführen und tritt entsprechend der gegenüber der Ausgangssituation (Bild 6) in Bild 8 erkennbaren Veränderungen eher dann auf, wenn im Rahmen des *Wehrbetriebs* beide Wehrfelder beaufschlagt werden. Insgesamt ist die schlechte Auffindbarkeit weniger mit niedrigen („< 300 m<sup>3</sup>/s“) als eher mit erhöhten Abflüssen („600 bis 1000 m<sup>3</sup>/s“) verknüpft.



**Bild 8:** Hinweise auf mehr oder weniger wahrscheinliche Begleitumstände einer schlechten Auffindbarkeit für den Fall eines breiten Gewässers und je einem Einstieg FAA an jedem Ufer

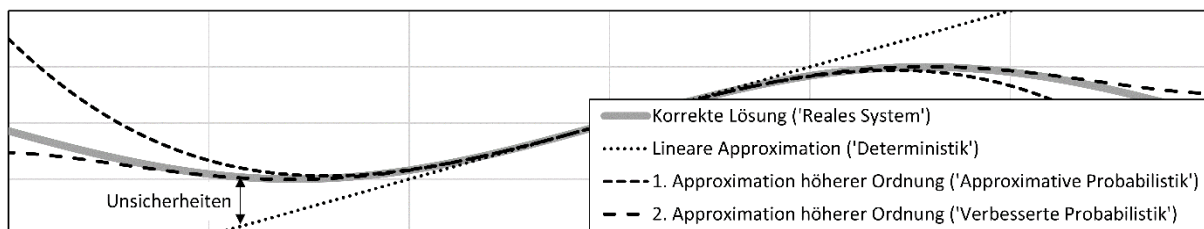
Neben einem insgesamt verbesserten Einblick in die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge auf dem Gebiet der großräumigen Auffindbarkeit könnten auf Grundlage der gelieferten Hinweise Verbesserungsmaßnahmen, wie z. B. eine Anpassung der Wehrsteuerung, ergriffen werden.

### Zusammenfassung und Diskussion

Trotz eines gut dokumentierten Stands der Technik zur Planung und Bau von Fischaufstiegsanlagen sind eine Vielzahl an Fragestellungen im Zusammenhang mit dem Fischaufstieg mit vielen Unsicherheiten auf verschiedenen Ebenen verknüpft. Diese betreffen die Bereiche von Biologie, Hydrologie und Wasserbau und stehen auch mit der Konkurrenz zwischen der Fischmigration und den vielfältigen Nutzungen am Gewässer in Verbindung. Sie überlagern alle Phasen von der Konzeption und Planung über die Anlagensteuerung und den Betrieb bis hin zur Anlagenüberwachung und das Monitoring. Eindeutige und gesicherte Aussagen über Wirkungsweise einzelner Anlagenkomponenten, über den Ablauf von Prozessen und damit insgesamt die erfolgreiche Erledigung aller Einzelaufgaben im Rahmen des Fischaufstiegs (Bild 1) können selten getroffen werden.

Die Verwendung logischer Werkzeuge, wie Fehlerbäume oder Bayes-Netze, ermöglicht die probabilistische Beschreibung komplexer Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge. Ihr Einsatz setzt dabei unvermeidlich Kompromisse in Bezug auf die Genauigkeit voraus, um auch kontinuierlich ablaufende und sich gegenseitig beeinflussende Prozesse in kausal verknüpfte diskrete Elemente bzw. Knoten zu unterteilen. Sie liefern, wie letztlich alle Modelle, Abstraktionen der Realität.

Darüber hinaus ist die Quantifizierung von Unsicherheiten durch Wahrscheinlichkeiten oft nur innerhalb bestimmter Genauigkeitsgrenzen und damit unter Anerkennung von verbleibenden Unsicherheiten möglich. Dies ist ein häufig und vorschnell formulierter Kritikpunkt. Im Allgemeinen geht jedoch der Einsatz von probabilistischen Werkzeugen, wie sie im vorliegenden Beitrag vorgestellt werden, nicht mit einem Absolutheitsanspruch einher. Vielmehr stellt er eine gegenüber einer deterministischen Sichtweise stärker an den Realitäten orientierte Herangehensweise dar, die mit zusätzlichen Informationen auch stetig ergänzt und damit verbessert werden kann. Der Weg zu einer zunehmend belastbaren Beschreibung von Unsicherheiten kann von entweder eher spielerisch orientierten oder streng strukturiert aufgebauten Sensitivitätsbetrachtungen unter Einsatz eines im Grundsatz plausibel formulierten Modells begleitet werden, um das Systemverständnis sukzessive zu verbessern. Bild 9 zeigt ein einfaches Gleichnis zwischen verschiedenen Qualitätsstufen einer probabilistischen Betrachtung komplexer Systeme und Prozesse und der Approximation komplexer mathematischer Funktionen durch Taylorreihen zunehmend höherer Ordnung.



*Bild 9: Einfaches Gleichnis zwischen einer probabilistischen Herangehensweise an ein komplexes reales System und einer Taylorreihenapproximation in der Mathematik*

Probabilistische Methoden können

- aufgrund differenzierter Berücksichtigung von Unsicherheiten Systeme und Prozesse besser beschreiben und durch eine veränderte Perspektive Denkanstöße in Konzeption und Management geben,
- auch im Lichte von noch fehlendem Wissen eine objektivierte Diskussions- und Bewertungsgrundlage von z. B. Varianten schaffen und
- bei der Kommunikation von Ergebnissen und Entscheidungen unterstützen, indem Transparenz in Bezug auf noch fehlendes Wissen und damit hinsichtlich des Fundaments von fachlichen Einschätzungen geschaffen wird.

Der vorliegende Beitrag beschreibt den Nutzen probabilistischer Methode für Fragestellungen der ökologischen Durchgängigkeit anhand fiktiver Beispiele. Fehlendes Wissen über kausale Zusammenhänge, z. B. zwischen Fischverhalten und abiotischen Parametern und deren quantitativer Beschreibung anhand von Wahrscheinlichkeiten, lassen auf den ersten Blick einen direkten



Nutzen für die Praxis im Bereich der ökologischen Durchgängigkeit fraglich erscheinen. Der vorliegende Beitrag verdeutlicht jedoch, dass gerade für komplexe Systeme mit relevanten Wissensdefiziten eine Anwendung probabilistischer Methoden zielführend ist. Komplexe Entscheidungen außerhalb des Technikstandards in Planung oder Betrieb von Fischaufstiegsanlagen werden häufig auf Basis individueller Experteneinschätzungen getroffen. Aufgrund fehlenden Wissens begleiten diese Entscheidungen damit zwangsweise eine gewisse Intransparenz und Willkür. Probabilistische Methoden bieten hier u. a. die Möglichkeit, Managemententscheidungen auf einer fundierten und transparenten Basis zu treffen. Die der Entscheidung zugrunde gelegten Wirkzusammenhänge können dargestellt und diskutiert werden, was letztendlich zu einer erhöhten Akzeptanz der Entscheidungen führen kann.

## Literatur

- DIN EN 1990 (2021-10): Eurocode – Grundlagen der Tragwerksplanung
- DIN 25424-1 (1981-09): Fehlerbaumanalyse; Methode und Bildzeichen
- DIN 25424-2 (1990-04): Fehlerbaumanalyse; Handrechenverfahren zur Auswertung eines Fehlerbaumes
- DWA (2014): Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. Korrigierte Auflage 2016. Hennef (DWA-Regelwerk, M 509).
- DWA (2022): Probabilistische Methoden im Wasserbau. Hennef. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA-Regelwerk, M 525, Gelbdruck in Vorbereitung).
- Henning, M.; Weichert, R. (2020): Hydraulische Parameter von Fischaufstiegsanlagen in Schlitzpassbauweise in Bemessung und Bestand. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMitteilungen Nr. 106, Karlsruhe: BAW, S. 7-14.
- Heynen, M., Schuetz, C. (2022): Belastbare fischökologische Untersuchungsergebnisse vor dem Hintergrund großer natürlicher Variabilität, Hg. Bundesanstalt für Wasserbau. Tagungsband zum BAW/BfG-Kolloquium zur ökologischen Durchgängigkeit. „Die Variabilität natürlicher Prozesse – Eine Herausforderung bei der Planung von Fischaufstiegsanlagen“, 18. und 19. November 2021.
- Kjærulff, U. B.; Madsen, A. L. (2013): Bayesian networks and influence diagrams. A guide to construction and analysis. New York: Springer (Information science and statistics).
- Moore, H.E, Rutherford, I.D. (2017): Lack of maintenance is a major challenge for stream restoration projects. *River Res Applic.* 2017; 33: 1387– 1399. <https://doi.org/10.1002/rra.3188>
- NUREG (1975): Reactor Safety Study. WASH-1400 – An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants. Springfield, VA.
- Schmitt-Heiderich, P.; Gebhardt, M.; Weichert, R. (2013): BAWBrief 02/13. Klassifizierung der Wanderwege für den Fischabstieg. Hg. v. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). Karlsruhe (BAWBrief, 02/13).
- Stauder, F. (2013): Zuverlässigkeitskonzept für Bestandstragwerke aus Stahlbeton. In: R. Breitenbücher und P. Mark (Hg.): DAFStb-Doktorandensymposium 2013. Bochum, 7.-8.11.2013. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Berlin: DAFStb (DAFStb Jahrestagung, 1), S. 139–145.

- Vesely, W. E.; Dugan, J.; Fragola, J.; Minarick J., Railsback, J. (2002): Fault Tree Handbook with Aerospace Applications. NASA Office of Safety and Mission Assurance. Washington D. C.
- Zaschke, M.; Ingendahl, D.; Scholten, M.; Weichert, R.; Schmitt-Heiderich, P. (2021): Bewertung der Auswirkung baulicher und betrieblicher Maßnahmen an Stauanlagen auf den Fischabstieg. Hg. v. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). Karlsruhe (BAWEmpfehlung).
- Zinkhahn, M.; Simons, F. (2022): Regelung von Fischaufstiegsanlagen – Herausforderungen bei der Umsetzung von Bemessungsvorgaben. Hg. Bundesanstalt für Wasserbau. Tagungsband zum BAW/BfG-Kolloquium zur ökologischen Durchgängigkeit. „Die Variabilität natürlicher Prozesse – Eine Herausforderung bei der Planung von Fischaufstiegsanlagen“, 18. und 19. November 2021.