

---

Technische Universität Graz  
Dekanat für Bauingenieurwissenschaften  
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

# **Bladestrike Modellierung**

**Masterarbeit**  
**von**  
**Michael WENDLER**

Vorgelegt zur Erlangung des  
akademischen Grades eines Master  
der Studienrichtung Bauingenieurwesen

Graz, im Oktober 2017

---

Betreuer der Diplomarbeit:  
Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Josef SCHNEIDER

.....

---

## **Eid (Ehrenwörtliche Erklärung)**

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ich versichere, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin oder einem Beurteiler) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Graz, im Oktober 2017

.....

---

## **Danksagung**

Im Zusammenhang mit der Verfassung meiner Masterarbeit über Blade Strike Modellierung möchte ich dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Graz großen Dank sagen - für die gute Betreuung, die Herstellung der Kontakte und die Hilfe bei jeweiligen Fragen. Mein Dank gilt auch dem Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen bei der Assistenz in kniffligen Angelegenheiten und kritischen Augenblicken.

Für die Mitwirkung danke ich auch vielmals der Verbund AG, insbesondere Herrn Dr. Walter Reckendorfer, der mir mit Rat und Tat zur Seite stand.

Weiters möchte ich mich bei meiner Familie herzlich bedanken, ohne deren Unterstützung mein ganzes Studium nicht möglich wäre. Mein Dank gilt auch meinen Studienkollegen, die mir seit der Schulzeit immer behilflich waren.

---

## Kurzfassung

In dieser Arbeit werden bisher durchgeführte Versuche mit lebenden Fischen, die flussabwärts durch eine Kaplan turbine geschickt werden, verifiziert, zusammengefasst und dargestellt. Dabei wurden unter genauer Betrachtung alle doppelten, fehlerhaften und nicht kongruierenden Daten aussortiert. Damit ist beabsichtigt, eine aussagekräftige Datengrundlage mit gutem Datensatz für weitere Berechnungen zu erhalten.

Auf der Grundlage dieser Daten werden vorhandene *Bladestrike*-Modelle (BS) verifiziert und im Anschluss adaptiert. Dabei werden einzelne Parameter der *Bladestrike*-Modelle hinterfragt und mit den zuvor aus den Versuchen verifizierten Daten angepasst.

Weiters werden Parameter für die weiterführende *Bladestrike*-Modellierung aufgezeigt und behandelt. Jedoch werden mit diesen Parametern keine Berechnungen durchgeführt.

Mit den gewonnen Erkenntnissen werden anschließend Lebendfischversuche, welche an der TU-Graz durchgeführt wurden, mit den in dieser Arbeit berechneten Ergebnissen verglichen.

Ziel ist es, aussagekräftige Formeln für die Abwärtswanderung der Fische durch Kaplan turbinen zu bekommen, um weniger bis keine Lebendfischversuche durchführen zu müssen.

---

## **Abstract**

This thesis verifies, summarizes and presents previously performed experiments on live fish, which were sent downstream through Kaplan turbines. Therefore, all duplicate, incorrect and non-congruent data were sorted out. This is intended to get a meaningful table of good data for further calculations.

Based on this data, existing blade-strike models are checked for state-of-the-art technology and subsequently adapted. Furthermore, individual parameters of the further models are questioned and adapted to the data previously verified from the experiments.

After that, parameters for further modeling are presented and treated. However, no calculations are made with these parameters.

Based on the findings, live fish experiments conducted at the TU Graz will then be compared with the results calculated in this paper.

The aim is to get meaningful formulas for the downstream migration of the fish through Kaplan turbines, in order to perform fewer or no live fish experiments.

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung .....	1
1.1	Das Projekt „Flussabwärts gerichtete Fischwanderung“ .....	1
1.2	Gesetzgebung .....	2
1.2.1	Ziele der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) .....	2
1.2.2	Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan (NGP).....	4
1.2.3	Qualitätszielverordnung QZV 2010 (QZV Ökologie OG).....	6
1.2.4	Erkenntnis .....	7
1.3	Gründe für eine Bladestrike Modellierung .....	7
1.4	Ziele dieser Arbeit.....	10
2.	Modelle .....	11
2.1	Physikalische Modelle.....	11
2.1.1	Bladestrike Modelle .....	11
2.1.2	Anderes physikalisches Modell .....	12
2.2	Empirische Modelle.....	12
3.	Das Bladestrike Modell .....	13
3.1	Das Grundmodell.....	13
3.1.1	Allgemeine Theorie .....	13
3.1.2	Historie der Bladestrike Modelle .....	14
3.1.3	Vergleich der Modelle.....	15
3.1.4	Winkel $\theta$ .....	19
3.2	Weiterführende Bladestrike Modelle .....	22
3.2.1	Allgemein .....	22
3.2.2	Mutilation Ratio .....	24
3.2.3	L/t Verhältnis .....	25
3.2.4	Effektive Länge .....	27
3.2.5	Empfindlichkeit der Fischart .....	30
4.	Grundlagen und Methodik.....	31
4.1	Datenerfassung .....	31
4.2	Das Grundmodell.....	35
4.2.1	Berechnung Winkel $\theta$ .....	35
4.2.2	Bestimmung der Nabengröße .....	38

4.3	Weiterführende Modelle .....	40
4.3.1	Kantenbreite der Kaplanschaufel .....	40
4.3.2	Rotation.....	42
4.3.3	Empfindlichkeit der Fische .....	42
5.	Ergebnisse .....	43
5.1	Grundmodell .....	43
5.1.1	Ermittlung des Winkel $\theta$ .....	43
5.1.2	Ermittlung des „Nabe zu Außendurchmesser“ Verhältnisses.....	51
5.2	Weiterführende Modelle .....	54
5.2.1	Dicke der Schaufelkante .....	54
5.2.2	LT-Verhältnis.....	57
6.	Auswertung.....	59
6.1	Grundmodell .....	59
6.1.1	Einfluss des Winkels auf die Bladestrike-Berechnungen .....	60
6.1.2	Einfluss der Nabengröße auf die Bladestrike-Berechnung .....	66
6.2	Mutilation Ratio .....	72
6.2.1	Mutilation Ratio mit Von Raben .....	72
6.2.2	Mutilation Ratio mit Turnpenny.....	77
6.2.3	Vergleich des Mutilation Ratios von Von Raben und Turnpenny .....	79
6.3	Versuche an der TU-Graz.....	81
7.	Zusammenfassung und Ausblick .....	85
8.	Literaturverzeichnis.....	88

## 1. Einleitung

Aufgrund der europäischen und daraus folgend der österreichischen Judikatur wird in Gesetzen, Verordnungen und Richtlinien die Durchgängigkeit von Flüssen in beiden Richtungen immer mehr in den Vordergrund gerückt. Besonders bei Sperrbauwerken wie Wasserkraftwerken ist auf solch eine Durchgängigkeit zu achten. Einerseits wegen des Fischeaufstiegs, der durch etwaige Fischeaufstiegshilfen wie einen Beckenpass, Vertikal-Slot oder Fischlifte erfolgt. Andererseits wegen des Fischabstiegs zum Beispiel durch die Turbinen (BMLFUW, 2014).

In dieser Arbeit werden Modelle untersucht, welche sich mit dem Fischabstieg durch Kaplan-turbinen befassen. Die Verletzung von Fischen wird dabei näher untersucht.

Ein weiterer Grund für diese Arbeit ist ein aktuelles Projekt an der TU-Graz, welches sich mit dem Thema Fischabstieg befasst. Dieses Projekt wird im folgenden Kapitel 1.1 kurz behandelt.

Unter Absatz 1.2 werden Ziele der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und des Nationalen Gewässerbewirtschaftungsplans 2015 (NGP 2015) aufgelistet und die Bedeutung der Durchgängigkeit bei Flüssen in der momentanen Österreichischen Gesetzgebung diskutiert.

### 1.1 Das Projekt „Flussabwärts gerichtete Fischwanderung“

In Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Partnern wird im Rahmen des Projektes „Flussabwärts gerichtete Fischwanderung an mittelgroßen Fließgewässern in Österreich“ die Fischabwärtswanderung an der Technischen Universität Graz untersucht.

*„Ziel des Projektes ist es, das Ausmaß stromab gerichteter Wanderungen ausgewählter heimischer Fischarten und die Auswirkungen in energiewirtschaftlich genutzten Gewässern auf Populationsebene zu beschreiben.“ (Schneider et al., 2016, S1).*

Des Weiteren wird im Rahmen des Projektes, mit etablierten Methoden, die aus einer umfangreichen Literaturstudie hervorgehen, die Populationsentwicklung der Fische in verschiedenen Modellen untersucht. Anschließend werden verschiedene Fallkombinationen mit den Modellen untersucht, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, ob oder inwiefern Querbauwerke für die Wasserkraftnutzung die Fischpopulation beeinträchtigen.

Unter anderem wird bei diesem Projekt auch die *Bladestrike* Modellierung verwendet. Um die Mortalitätsrate bei einer bestimmten Wasserkraftanlage zu untersuchen, werden vom Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU-Graz und dessen Partnern Lebendfisch-Versuche durchgeführt. Es werden *Bladestrike* Modellierungen zur Berechnung der Mortalitätsrate angewandt.

Bei den Lebendfischversuchen kommen sogenannte *Balloon-Tag*-Tests zum Einsatz. Dies bedeutet, Fische werden mit Ballonen ausgestattet und anschließend durch die Kaplansturbinen, geschickt. Nach dem Durchschwimmen der Fische blasen sich die Ballone auf, damit man die Fische wiederfinden kann.

Die *Balloon Tags* werden im Projekt eingesetzt, um die Schädigung an zwei Größenklassen (juvenil, adult) von drei Fischarten Nase, Aitel und Äsche an jeweils zwei Standorten zu untersuchen. Mit den gewonnenen Daten aus den Versuchen können *Bladestrike* Modelle validiert und für ähnliche Anlagen übertragbar gemacht werden (Schneider et al., 2016).

## 1.2 Gesetzgebung

### 1.2.1 Ziele der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL)

„Oberstes Ziel ist die Vermeidung einer weiteren Verschlechterung sowie der Schutz und die Verbesserung des Zustands der aquatischen Ökosysteme und der direkt von ihnen abhängigen Landökosysteme.“ (BMLFUW, 2014, S1).

„Teilziele sind der gute Zustand der Oberflächengewässer (guter ökologischer und guter chemischer Zustand) sowie der gute Zustand des Grundwassers (guter chemischer und guter mengenmäßiger Zustand).“ (BMLFUW, 2014, S1).

Für die Beurteilung des Zustandes der Oberflächengewässer werden einzelne Parameter herangezogen. Einer dieser Parameter ist die Durchgängigkeit von Flüssen, die im folgenden Auszug aufgelistet wird. Da dieser Parameter Verweise auf den Allgemeinen Teil beinhaltet, wird dieser auch angeführt.

## **Begriffsbestimmungen zur Einstufung des ökologischen Zustands**

### **Parameter: Allgemein**

- Sehr guter Zustand: *„Es sind bei dem jeweiligen Oberflächengewässertyp keine oder nur sehr geringfügige anthropogene Änderungen der Werte für die physikalisch- chemischen und hydromorphologischen Qualitätskomponenten gegenüber den Werten zu verzeichnen, die normalerweise bei Abwesenheit störender Einflüsse mit diesem Typ einhergehen. Die Werte für die biologischen Qualitätskomponenten des Oberflächengewässers entsprechen denen, die normalerweise bei Abwesenheit störender Einflüsse mit dem betreffenden Typ einhergehen, und zeigen keine oder nur sehr geringfügige Abweichungen an. Die typspezifischen Bedingungen und Gemeinschaften sind damit gegeben.“* (EG, 2000, S.49).
- Guter Zustand: *„Die Werte für die biologischen Qualitätskomponenten des Oberflächengewässertyps zeigen geringe anthropogene Abweichungen an, weichen aber nur in geringem Maße von den Werten ab, die normalerweise bei Abwesenheit störender Einflüsse mit dem betreffenden Oberflächengewässertyp einhergehen.“* (EG, 2000, S.49).
- Mäßiger Zustand: *„Die Werte für die biologischen Qualitätskomponenten des Oberflächengewässertyps weichen mäßig von den Werten ab, die normalerweise bei Abwesenheit störender Einflüsse mit dem betreffenden Oberflächengewässertyp einhergehen. Die Werte geben Hinweise auf mäßige anthropogene Abweichungen und weisen signifikant stärkere Störungen auf, als dies unter den Bedingungen des guten Zustands der Fall ist.“* (EG, 2000, S.49).

Darüber hinaus werden alle Gewässer, deren Zustand schlechter als mäßig ist, als unbefriedigend oder schlecht eingestuft.

### **Komponente: Durchgängigkeit des Flusses**

- Sehr guter Zustand: *„Die Durchgängigkeit des Flusses wird nicht durch menschliche Tätigkeiten gestört und ermöglicht eine ungestörte Migration aquatischer Organismen und den Transport von Sedimenten.“* (EG, 2000, S.52).
- Guter Zustand: *„Bedingungen, unter denen die oben für die biologischen Qualitätskomponenten beschriebenen Werte erreicht werden können.“* (EG, 2000, S.52).
- Mäßiger Zustand: *„Bedingungen, unter denen die oben für die biologischen Qualitätskomponenten beschriebenen Werte erreicht werden können.“* (EG, 2000, S.52).

#### *1.2.2 Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan (NGP)*

Um die WRRL zu verwirklichen, wurde vom Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft in Zusammenarbeit mit den wasserwirtschaftlichen Planungen der Länder der Nationale Gewässerbewirtschaftungsplan 2009 (NGP 2009) und anschließend der Nationale Gewässerbewirtschaftungsplan 2015 (NGP 2015) erstellt (BMLFUW, 2014).

Im NGP wird genauer auf die Durchgängigkeit bei Querbauwerken eingegangen und wie die Durchgängigkeit in österreichischen Gewässern wieder herzustellen ist.

#### **Belastung durch Querbauwerke:**

Jedes Querbauwerk ist eine Unterbrechung des Fließgewässerkontinuums und somit eine Barriere, die von Fischen oder anderen Lebewesen bewältigt werden muss. Die Gründe für Querbauwerke sind verschieden. Einige sind im Folgenden angeführt: Im Zuge der Wasserkraftnutzung (Wehranlagen), für Wasserentnahmen, als bauliche Maßnahmen im Rahmen des Hochwasserschutzes

oder zur Sohlstabilisierung. Eine negative Auswirkung von Querbauwerken ist neben einer Einschränkung des Sedimenttransportes auch der Einfluss auf das Wanderverhalten der Gewässerfauna. Aufgrund der Unterbrechung des Fließgewässerkontinuums entstehen einzelne isolierte Lebensräume, die negative Auswirkungen auf die Population haben können. Ein Grund dafür ist die Behinderung im Wanderverhalten gewisser Fischarten, die nicht mehr ihre Laichhabitate erreichen können (BMLFUW, 2010a).

Um dies zu verbessern wurde ein Maßnahmenprogramm entwickelt, das im NPG wie folgt angeführt ist.

*„Der größte Nutzen wird erreicht, wenn die Anstrengungen auf jene Bereiche konzentriert werden, die die größte Gefährdung für die Gewässer darstellen. In der Veröffentlichung der wesentlichen Wasserbewirtschaftungsfragen wurden die Hauptbelastungen für die Flusseinzugsgebiete hervorgehoben und anschließend mit Stakeholdern und NGOs diskutiert.*

*Zusammenfassend ergeben sich folgende Hauptbelastungstypen bzw. Herausforderungen, für die Maßnahmen zur Verbesserung des Zustands zu treffen sind:*

- 1. Verbesserung der Gewässerstrukturen, Abflussverhältnisse und der Durchgängigkeit in Fließgewässern;*
- 2. Reduzierung der Belastung von Oberflächengewässern durch Nährstoffe (teilw. auch organische Verschmutzung und Schadstoffe) und des Grundwassers durch Nitrat.“ (BMLFUW, 2010a, S.94).*

Bemerkenswert ist, dass in Punkt 1. konkret die Durchgängigkeit in Fließgewässern angeführt wird und somit ein wichtiger Bezug zu dieser Masterarbeit hergestellt wird, in der die Bedeutung von Modellen zur Berechnung und Abschätzung der Durchgängigkeit behandelt wird.

Des Weiteren wurde ein Entwurf des NPG 2015 veröffentlicht, worin die Maßnahmen der zweiten Planungsperiode (2015-2021) dargestellt werden. Beschrieben werden darin die aktuelle Situation und die geplante zukünftige Ent-

wicklung. Dabei ist geplant, alle Gewässer, die sich in einem schlechteren Zustand als gut befinden, weiter zu verbessern.

Dabei wird bei Stauhaltungen oder Stauketten auf eine Vernetzung der Lebensräume geachtet. Diese Vernetzung kann wieder auf die Durchgängigkeit bei Querbauwerken zurückgeführt werden.

Weiters werden Querbauwerke als Belastung für das Gewässer angesehen. Indem sie die natürliche Durchgängigkeit unterbrechen und dadurch Fische in ihrem Wanderverhalten stören und isolierte Lebensräume schaffen (BMLFUW, 2015).

### 1.2.3 Qualitätszielverordnung QZV 2010 (QZV Ökologie OG)

In der QZV wird unter Anlage F die Fischfauna in Fließgewässern behandelt. „Ziel dieser Verordnung ist die Festlegung von gemäß § 30a Abs. 1 des Wasserrechtsgesetzes 1959, BGBl. Nr. 215 (WRG 1959), zu erreichenden Zielzuständen sowie von im Hinblick auf das Verschlechterungsverbot maßgeblichen Zuständen für Typen von Oberflächengewässern durch Werte für die biologischen, hydromorphologischen und die allgemeinen Bedingungen der physikalisch-chemischen Qualitätskomponenten für den ökologischen Zustand mit dem Zweck der Beurteilung der Qualität von Oberflächengewässern.“ (BMLFUW, 2010b, S.1).

Für diese Beurteilung werden fünf Teilaspekte unterschieden und zu einem Wert, dem Fischindex Austria, zusammengefasst.

Der Fischindex Austria besteht dabei aus den Teilaspekten: Artenzusammensetzung, Altersstruktur, Fischregionsindex und Biomasse, wobei jeder einzelne mit einer Skala von eins bis fünf bewertet wird. Danach wird ein gewichtetes Mittel gebildet und für den Fischindex Austria verwendet. Daraus folgt, dass kein Teilaspekt vernachlässigt werden darf. (BMLFUW, 2010b).

## **Leitfaden zur Erhebung der biologischen Qualitätselemente Teil A1 - Fische**

Der Leitfaden enthält die Richtlinien für die Durchführung fischökologischer Untersuchungen an Fließgewässern in Österreich.

Im Leitfaden werden Querbauwerke und Wasserausleitungen als häufigste Belastungstypen aufgezeigt. Des Weiteren wird beschrieben, wie eine richtige Datenerfassung bei diesen zu erfolgen hat (Haunschmid et al, 2010).

### *1.2.4 Erkenntnis*

Die WRRL, das Wassergesetz, der daraus abgeleitete NGP 2015 und die QZV Ökologie OG weisen, der Durchgängigkeit für Fische bei Querbauwerken eine hohe Bedeutung für den ökologischen Zustand der Gewässer zu

Ein Teilaspekt der Durchgängigkeit ist die Flussabwärtswanderung der Fische. Diese kann prinzipiell über das Querbauwerk (Wehrüberfall), vorhandene Bypässe (z.B. Fischaufstiegsanlage) oder über die Turbinen erfolgen. Insbesondere bei Turbinenpassage kann es zu Verletzungen aber auch Mortalitäten von Fischen kommen.

Die Kenntnis über das Ausmaß und die Bedeutung dieser Mortalitätsraten für die Fischpopulationen ist eine wesentliche Grundlage für eventuell erforderliche Maßnahmen.

## **1.3 Gründe für eine Bladestrike Modellierung**

Um nun aussagekräftige Werte für die Verletzungen bei Flussabwärtswanderungen von Fischen bei Wasserkraftanlagen zu bekommen, gibt es verschiedene Ansätze, wie zum Beispiel: Langzeitbeobachtungen, Tierversuche, Versuche mit Sensorfischen, numerische Berechnungen, sowie *Bladestrike* Modelle und empirische Untersuchungen.

Bei der Ursache der Verletzung können zwei Arten unterschieden werden. Jene Verletzungen, die durch mechanische Einwirkung verursacht werden, und jene,

die durch Druckunterschiede verursacht werden. Je nach Modell werden eine oder beide Ursachen behandelt.

Beim Durchgang eines Fisches durch eine Turbine besteht die Möglichkeit der Schädigung des Fisches durch den Druckunterschied. Diese Schädigung entsteht dabei dadurch, dass es im Bereich der Turbine zu einem plötzlichen Druckabfall kommt. Mögliche Schäden sind dabei beispielweise Hämorrhagien, Kapillarrupturen, Darminversionen und Schwimmblasenschädigung (Ebel, 2013).

Die zweite Ursache für Verletzungen sind mechanische Einwirkungen, wie der Schlag der Turbinenschaufel auf den Fisch. Mit *Bladestrike* Modellen, wird (siehe Kapitel 2.1.1) versucht, eine Abschätzung der Mortalität zu berechnen.

Die mechanischen Einwirkungen können dabei zwei Folgen nach sich ziehen. Der Fisch wird verletzt und überlebt oder er kommt dabei zu Tode. Die Folgen dieser Treffer werden in der folgenden Abbildung 1 und Abbildung 2 dargestellt.

Dabei ist in Abbildung 1 ein überlebender Fisch mit Verletzung zu sehen.

In Abbildung 2 wird ein durchtrennter toter Fisch gezeigt, der durch eine Wasserkraftanlage durchgeschwommen ist.



Abbildung 1: Verletzung durch Turbinenschaufel (Manitoba, 2012)

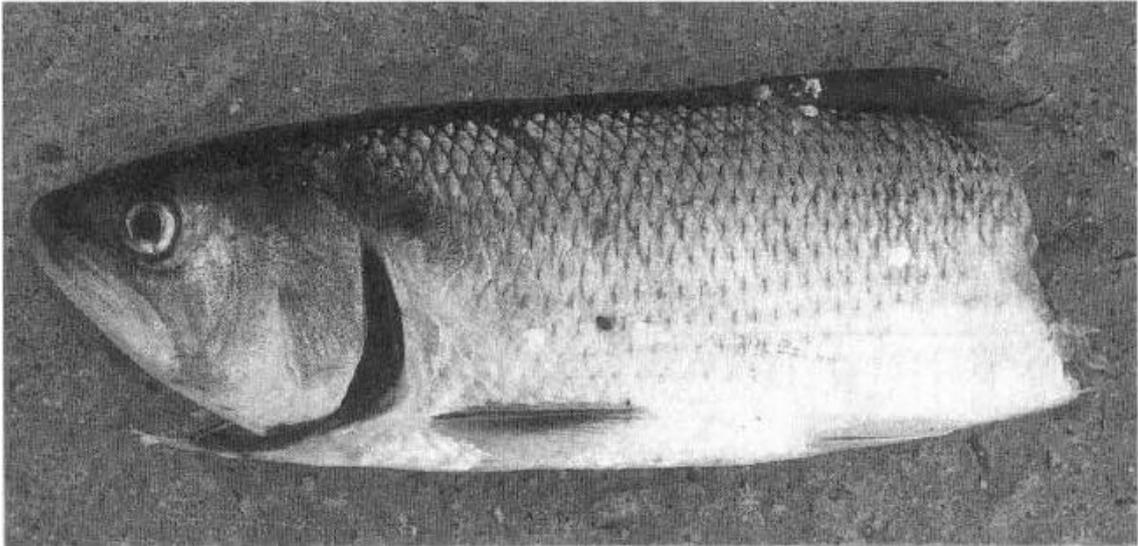


Abbildung 2: Abtrennung durch Turbinenschaufel(Dadswell, 1994)

Für die Abschätzung solcher Verletzungen werden *Bladestrike* Modelle eingesetzt. Vorteile, die diese Art der Modellierung beinhaltet, werden im Folgenden aufgelistet.

- Kostengünstig: Für die Verwendung von *Bladestrike* Modellen müssen je nach Bedarf einige Parameter der Anlage und der Fische erhoben und werden und in die geeigneten Formeln eingesetzt werden. Um welche Parameter es sich handelt, hängt vom jeweiligen Modell ab. Für einfache Modelle reichen Fischlänge, Schaufelanzahl, Rotationsrate, Durchfluss, durchströmte Fläche oder der Winkel des Wasservektors zur Nabenachse.
- Einfache Anwendung: Wenn alle Parameter für das Modell erhoben sind, kann mit einem Taschenrechner oder Computer, je nach Komplexität der Formel, das *Bladestrike* Modell ausgewertet werden.
- Wenig zeitaufwendig: Falls alle Parameter der Anlage bekannt sind, kann die Berechnung sofort erfolgen und man erhält auf der Stelle Ergebnisse.
- Wenig Information notwendig: Je nach Modell kann schon mit sehr wenig Information gearbeitet werden. Jedoch muss mindestens die Information für das Grundmodell vorhanden sein. Dazu gehören die

Fischlänge, die Schaufelanzahl, die Rotationsrate, der Durchfluss, die durchströmte Fläche und der Winkel des Wasservektors zur Nebenachse.

- Anpassung: Kann den vorhandenen Informationen angepasst werden. Wenn genauere Informationen über die Wasserkraftanlage bekannt sind, können diese auch in die Modelle miteinfließen. Beispielsweise die Form des Schaufelrades.
- Übertragbarkeit: Durch den Aufbau der Formeln können die *Bladestrike* Modelle bei allen Wasserkraftanlagen angewendet werden.
- Keine Tierversuche: Da es sich rein um geometrische Berechnungen handelt, werden keine Tierversuche benötigt, um Ergebnisse zu erhalten.

#### 1.4 Ziele dieser Arbeit

Aufgrund der aufgelisteten Vorteile, welche eine *Bladestrike* Modellierung beinhaltet, ist eine Abschätzung für die Übereinstimmung der Berechnungen mit Ergebnissen aus Versuchen von Interesse.

Daher wird in dieser Arbeit versucht, aufgrund der bisher bekannten Versuche aus publizierten wissenschaftlichen Arbeiten Parameter, die in den *Bladestrike* Modellen eingehen, in einer Datenbank zu sammeln, wobei darauf geachtet wird, dass diese Datenbank vollständig und fehlerfrei ist. Mithilfe dieser Daten soll es möglich sein, die *Bladestrike* Modelle zu verifizieren oder auch mit Anpassungen zu optimieren.

Durch gut funktionierende und übertragbare Modelle können somit aussagekräftige Ergebnisse erreicht werden, ohne langwierige und teurere 3D-Berechnungen oder Tierversuche.

Mit den verifizierten Modellen werden Lebendfischversuche, welche an der TU-Graz durchgeführt wurden, verglichen und die Ergebnisse werden im Anschluss beurteilt.

## 2. Modelle

Ziel der Modelle ist: Auswirkungen auf Fische beim Turbinendurchgang statistisch möglichst realistisch zu modellieren.

Dabei werden physikalische und empirische Modelle unterschieden. Diese werden in den folgenden Kapiteln genau erläutert.

### 2.1 Physikalische Modelle

Grundlage der physikalischen Modelle ist die Kollision des Fisches mit einer Laufradschaufel. Dabei werden je nach Modell unterschiedliche Annahmen und Vereinfachungen vorangestellt. Die meisten Modelle beziehen sich dabei auf eine geometrische Beziehung, wie die *Bladestrike* Modelle (Kapitel 3). Ausnahmen davon, wie das MONTEN (1985) Modell, werden im darauffolgenden Kapitel 2.1.2 behandelt (Ebel, 2013).

#### 2.1.1 *Bladestrike* Modelle

Die Grundlage der *Bladestrike* Modelle ist eine rein geometrische Beziehung zwischen dem Fisch und der Schaufelradkante. Dabei wird der Fisch als eindimensionales Objekt ohne eigene Schwimmbewegung behandelt. Demzufolge bewegt er sich vollkommen gestreckt mit dem Wassergeschwindigkeitsvektor. Weiters wird davon ausgegangen, dass eine jede Kollision, egal mit welcher Stelle der Körper des Fisches auf der Schaufelradkante auftritt, zur gleichen Schädigung des Fisches führt. Um diese Vereinfachungen zu kompensieren, werden oft empirische Korrekturfaktoren verwendet (Ebel, 2013).

In der vorliegenden Arbeit wird das Grundmodell genau behandelt und auch der *Mutilation Ratio* (MR, Definition in Kapitel 3.2.2) erläutert. Darüber hinaus werden weitere Parameter zur Verbesserung des Modells behandelt.

### 2.1.2 *Anderes physikalisches Modell*

Dabei handelt es sich um das Modell nach Monten (1985). In diesem Modell ist der relative Abstand der Laufradschaufeln zueinander für die Berechnung der Wahrscheinlichkeit einer Kollision bedeutsam (Ebel, 2013).

Dieses Modell wird in dieser Arbeit nicht weiter behandelt.

## **2.2 Empirische Modelle**

Bei den empirischen Modellen handelt es sich um Ansätze, die aus beobachteten Mortalitätsraten heraus entstanden sind. Durch statistische Verfahren wurden somit Versuche abgebildet (Ebel, 2013).

Damit befassten sich Larinier & Dartiguelongue (1989), Ebel (2008) und Gomes & Larinier (2008). In dieser Arbeit jedoch werden keine dieser empirischen Modelle behandelt.

### 3. Das Bladestrike Modell

In diesem Kapitel werden zuerst die *Bladestrike* Theorie im Allgemeinen erklärt und dann die Bestandteile der Formel, die dem *Bladestrike* Modell zugrunde liegt aufgezeigt. Für das weitere Verständnis werden der Hintergrund und die ersten Überlegungen zur *Bladestrike* Theorie dargestellt.

Beim Befassen mit den Formelapparaten zur *Bladestrike* Theorie wird ersichtlich, dass in der Literatur unterschiedliche Formeln vorhanden sind, welche in Kapitel 3.1.3 behandelt werden. Zum Abschluss werden im Kapitel 3.2 einzelne Parameter aufgelistet, die der Verbesserung des Modells dienen können.

#### 3.1 Das Grundmodell

##### 3.1.1 Allgemeine Theorie

Beim Grundmodell der *Bladestrike* Theorie handelt es sich um eine rein geometrische Beziehung. Dabei wird berechnet, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Objekt bestimmter Größe von einer rotierenden Schaufel der Turbine getroffen wird. Der Output ist somit ein Prozentsatz über die Trefferwahrscheinlichkeit.

Durch den Aufbau der Formel ist die einfache Berechnung mit wenigen Faktoren möglich. Diese Faktoren sind im Folgenden aufgelistet. Die Formeln werden im Kapitel 3.1.3 dargestellt und näher behandelt.

- Länge des Objekts
- Schaufelanzahl der Turbine
- Rotationsgeschwindigkeit der Turbine
- Aktueller Durchfluss
- Durchströmte Fläche
- Winkel vom Wassergeschwindigkeitsvektor zur Turbinennabenachse

Mit Hilfe dieser Faktoren kann nun berechnet werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Objekt bestimmter Größe getroffen wird.

Da es sich in dieser Arbeit aber um Fische, also lebende Organismen handelt, muss/kann man einige Parameter adaptieren oder berechnen, um Ergebnisse zu erhalten, die mit der Realität besser übereinstimmen. Dafür werden die weiterführenden Modelle im Kapitel 3.2 verwendet (Deng et al, 2005).

### 3.1.2 *Historie der Bladestrike Modelle*

Erste Überlegungen über *Bladestrike* Modelle kamen schon bei Von Raben (1957) auf. Seine Theorie lautete folgendermaßen: Damit ein Fisch nicht von der Turbinenschaufel getroffen wird, muss er, nachdem sich eine Schaufel an ihm vorbeibewegt hat, durch den Gefahrenbereich durch sein, bevor die nächste Schaufel diese Stelle erreicht hat.

Falls der Fisch zu langsam oder die Umdrehungsgeschwindigkeit der Turbine zu schnell ist, sich der Fisch also noch im Rotationsbereich befindet, wird er von der Schaufelkante getroffen (Deng et al, 2007).

Um dies darzustellen, ist in der folgenden Abbildung ein typischer Schnitt durch eine Wasserkraftanlage veranschaulicht. Der Schnitt ist entlang zur Flussachse durch ein Krafthaus mit einer vertikalen Kaplan turbine im Columbia River in Nordamerika gelegt. Der denkbare Weg des Fisches ist grün markiert, der Gefahrenbereich, in dem der Fisch getroffen werden kann, ist rot umrahmt.

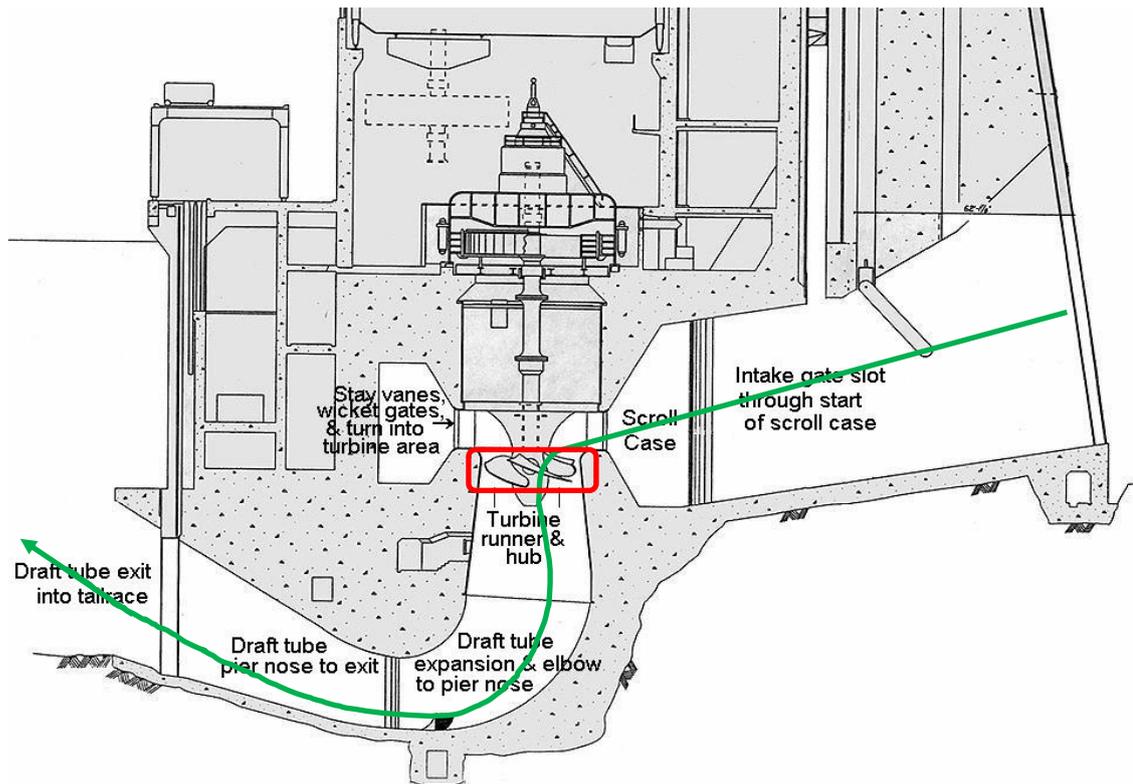


Abbildung 3 Querschnitt einer Wasserkraftanlage am Columbia River mit Fischweg (Ploskey et al, 2004)

Nachdem Von Raben das Grundmodell geschaffen hatte, haben Monten (1985) und Solomon (1988) dieses Modell adaptiert und weiterentwickelt. Sie haben mit empirischen Feldversuchen ein besseres Verständnis für die einzelnen Variablen und die Funktionsweise der Formel bekommen (Deng et al, 2005).

Das *Bladestrike* Modell wurde im Laufe der Jahre immer wieder aufgegriffen und adaptiert, wobei sich aber die Grundformel nie veränderte. Jedoch wurden einzelne Parameter neu überdacht und teils mit Versuchen und verschiedenen Berechnungen angepasst. Der Vergleich von fünf Modellen wird im folgenden Kapitel 3.1.3 dargestellt.

### 3.1.3 Vergleich der Modelle

Für diesen Vergleich wurden fünf Papers zur Hand genommen. Die darin enthaltenen deterministischen Bladestrike Modelle (Von Raben 1957; Bell 1991; Turnpenny et al. 2000; Pavlov et al. 2002, und Deng et al 2005) wurden vergli-

chen. Bei eingehender Betrachtung ist ersichtlich, dass sich die Modelle in der Grundform nicht unterscheiden. Teilweise werden für die Parameter andere Namen vergeben oder die Formeln anders dargestellt.

Eine gute und übersichtliche Zusammenfassung über vier dieser Modelle wurde von Ploskey et al (2004) erstellt. Für einen besseren Vergleich der Formeln wurden die in Tabelle 3-1 jeweils unterschiedlichen Bezeichnungen für die gleichen Parameter mit einem standardisierten Variablennamen bezeichnet.

Die folgende Tabelle ist grundlegend die gleiche, wurde jedoch um einen Eintrag (Deng et al. 2005) erweitert.

Tabelle 3-1: Standardisierte Variablennamen und originale Namen (Ploskey et al., 2004 editiert)

Standardisierter Variablenname	Von Raben (1957)	Bell (1991)	Turnpenny (2000)	Pavlov et al. (2002)	Deng et al. (2005)
P	P	P	P	P	P
l	l	l	l	l	l
n	n	n	No. of Blades	N	n
N	R	N	RPM of runner	n	N
$A_{TH}$	a	$\pi(r_0^2 - r_1^2)$	Runner swept area	$\Pi^*(R^2 - r^2)$	$A_{tip}$
$\theta$	$\alpha$	$\theta$	a	$\alpha$	$\theta$
Q	f	Q	Discharge	Q	Q
$V_{axial}$	$a/f = 1/V_{axial}$	$V_{axial}$	Discharge/Runner Swept Area	$V^{-1}$	$V_{axial}$

#### Definition der standardisierten Variablen:

- P: [-] Ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fisch von Schaufelrad getroffen wird.
- l: [m] Länge des Fisches.

- $n$ : [-] Anzahl von Schaufeln auf dem Turbinenrad (No. of Blades,  $N$ )
- $N$ : [rpm] Umdrehungen der Turbine pro Minute ( $R$ , RPM of runner,  $n$ )
- $A_{TH}$ : [m<sup>2</sup>] Durchströmte Fläche ( $\pi(R_{Tip}^2 - R_{Hub}^2)$ ) ( $a$ ,  $A_{tip}$ )
- $\theta$ : [°] Winkel zwischen dem axialen Wassergeschwindigkeitsvektor und dem absoluten Wassergeschwindigkeitsvektor ( $\alpha$ ,  $a$ )
- $Q$ : [m<sup>3</sup>/s] Aktueller Durchfluss ( $f$ , Discharge)
- $V_{axial}$ : [m/s] Axiale Geschwindigkeit ( $Q/A_{TH}$ )

#### Definition weiterer Variablen:

- $R_{Tip}$ : [m] Radius bis zur Außenkante des Schaufelrades ( $r_0$ ,  $R$ )
- $R_{Hub}$ : [m] Radius bis zur Nabe des Schaufelrades ( $r_1$ ,  $r$ )

Die folgenden Formeln werden dabei mit den standardisierten Variablen dargestellt und nicht mit den originalen Variablen, damit eine bessere Vergleichbarkeit gegeben ist.

Mit den in Tabelle 3-1 aufgelisteten Parametern hat Von Raben (1957) die Wahrscheinlichkeit eines Treffers durch das Schaufelrad (*Bladestrike*) wie folgt definiert:

$$P = \frac{l * n * N * A_{TH} * \cos \theta}{Q} \quad (3-1)$$

Bei Bell (1991) wird aus dem Term  $A_{TH} / Q$  der Term  $1/V_{axial}$  und die Reihenfolge der Faktoren wird verändert. Weiters wird eine andere Einheit bei den Umdrehungen verwendet (Umdrehungen pro Sekunde [rps] in Umdrehungen pro Minute [rpm]), wodurch die Konstante 60 in die Formel einfließt.

$$P = \frac{n * N}{60} * \frac{l * \cos \theta}{V_{axial}} \quad (3-2)$$

Turnpenny et al. (2000) hat die Formel als Fischlänge zu Wasserlänge präsentiert. Die Wasserlänge wird dabei als die Länge definiert, in welcher der Fisch keinen Treffer erleidet.

Durch eine Auflösung des Doppelbruchs erhält man den gleichen Ausdruck wie bei Bell (1991).

$$P = \frac{\text{Fisch Länge}}{\text{Wasser Länge}} = \frac{l}{\frac{V_{axial}}{\cos \theta * n * \frac{N}{60}}} \quad (3-3)$$

Die Beschreibung bei Pavlov et al. (2002) erfolgt mit den gleichen Einheiten wie bei Von Raben (1957) jedoch wird auch hier der Term  $V_{axial}$  anstelle von  $Q$  und  $A_{TH}$  verwendet. Weiters wird mit Hilfe der Hochzahl die Gleichung bruchfrei dargestellt. Wodurch sich folgende Formel ergibt:

$$P = l * N * n * \cos \theta * V_{axial}^{-1} \quad (3-4)$$

Deng et al. (2005) beschreibt den Vorgang des *Bladestrikes* mit einem Zeitfenster. Er vergleicht dabei die "critical passage time"  $t_{cr}$  mit der Zeit  $t$ , die ein Fisch benötigt, um sicher an den Turbinenschaufeln vorbeizugelangen. Durch Lösen des Doppelbruches erhält man die gleiche Formel wie bei Bell (1991) oder Turnpenny et al. (2000).

$$P = \frac{t}{t_{cr}} = \frac{\frac{l * \cos \theta}{V_{axial}}}{\frac{1}{n * \frac{N}{60}}} = \frac{l * \cos \theta * n * \frac{N}{60}}{V_{axial}} \quad (3-5)$$

Bei einem Vergleich der Formeln wird ersichtlich, dass kein Unterschied zwischen den Formeln besteht und alle das gleiche Ergebnis liefern. Sie unterscheiden sich jedoch durch die Darstellung und die verwendeten Variablen.

Die meisten Faktoren können mit Messungen bei Versuchen oder anhand der Daten der Maschine erhoben werden. Eine Ausnahme ist der Winkel  $\theta$ , des absoluten Wassergeschwindigkeitsvektors zum axialen Wassergeschwindigkeitsvektor, denn dieser muss berechnet werden.

### 3.1.4 Winkel $\theta$

Definition: Der Winkel  $\theta$  ist jener Winkel zwischen dem absoluten Wassergeschwindigkeitsvektor und dem axialen Wassergeschwindigkeitsvektor an der vom Fisch passierenden Stelle bei der Turbinenschaufel.

Abbildung 4 stellt das Verhältnis der Geschwindigkeiten dar, um daraus den Winkel  $\theta$  zu beschreiben.  $\theta$  ist dabei der eingeschlossene Winkel zwischen  $V_t$  und  $V_{axial}$ . Der Fisch mit der Länge  $l$  befindet sich dabei im gleichen Winkel  $\theta$ .

Der Winkel  $\theta$  kann wie folgt in mit der Formel 3-6 berechnet werden.

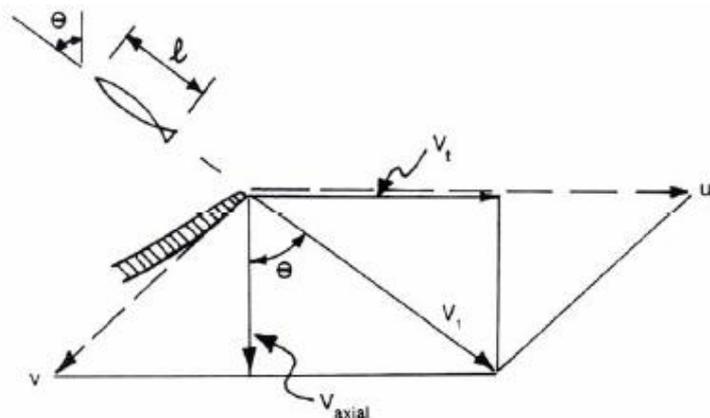


Abbildung 4: Graphische Darstellung Winkel  $\theta$  (Bell, 1991)

$$\theta = 90 - \arcsin\left(\frac{V_{axial}}{|V|}\right) = 90 - \arcsin\left(\frac{V_{axial}}{\sqrt{V_{axial}^2 + V_t^2}}\right) \quad (3-6)$$

Variablen:

- $V_t$ : Ist der tangentielle Wassergeschwindigkeitsvektor beim Turbineneinlauf. Dieser kann mit der Öffnung der Leitschaufeln bestimmt werden. In der Formel 3-8 und der Abbildung 5, der Öffnung der Leitschaufeln, wird dies ersichtlich.
- $V_{axial}$ : Ist der axiale Wassergeschwindigkeitsvektor. Dieser kann mit dem Durchfluss  $Q$  und der durchflossenen Fläche  $A_{TH}$ , wie in Gleichung 3-7, bestimmt werden.

$$V_{axial} = \frac{Q}{A_{TH}} \quad (3-7)$$

Wobei  $Q$  den aktuellen Durchfluss und  $A_{TH}$  die durchflossene Fläche bezeichnet. Eine genauere Beschreibung ist in Tabelle 3-1 (Seite 16) aufgelistet.

$$V_t = \frac{Q}{2\pi * H_{wg} * R_1 * \tan(\theta_{wgt})} \quad (3-8)$$

Für die Berechnung von  $V_t$  werden Daten des Leitschaufelapparates benötigt.

- $H_{wg}$ : Beschreibt die Höhe der Leitschaufeln.
- $R_1$ : Definiert den Fischdurchgangsradius. Der Fischdurchgangsradius ist als jener Radius eines Kreises definiert, welcher von der Schaufel bei der Turbinennabe bis zum Eingangsbereich des Fisches reicht.

- $\theta_{wgt}$ : Ist der Winkel zwischen absolutem Wassergeschwindigkeitsvektor und tangentialem Wassergeschwindigkeitsvektor beim Leitschaufelapparat.  $\theta_{wgt}$  ist in Abbildung 5 grafisch dargestellt.

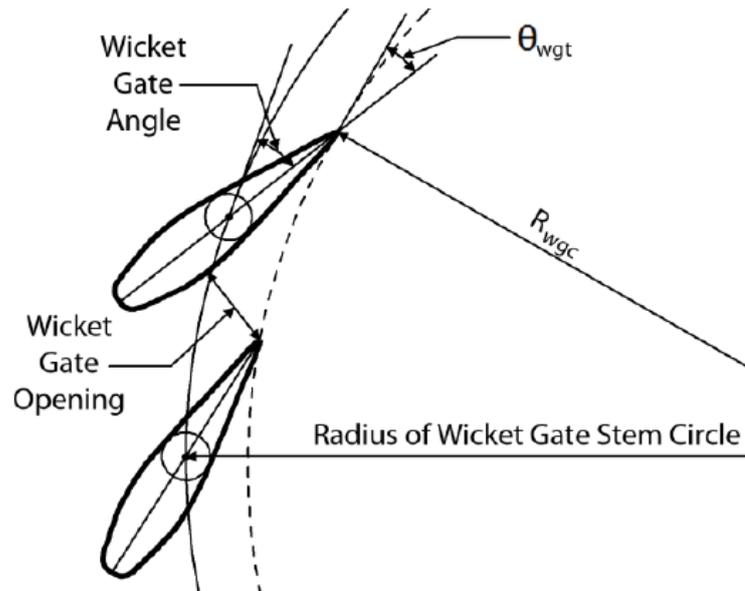


Abbildung 5: Graphische Darstellung Leitschaufelwinkel  $\theta_{wgt}$  (Bell, 1991)

Für die Bestimmung des Winkels  $\theta_{wgt}$  hat Deng et al (2011) zwei Formeln entwickelt. Dabei errechnet er den minimalen Abstand zwischen zwei benachbarten Schaufeln, indem er einen linearen Algorithmus programmiert, der alle möglichen Abstände zwischen zwei Schaufeln für jede gegebene Leitschaufelstellung berechnet. Damit entwickelte Deng et al (2011) eine Beziehung zwischen der Leitschaufelgeometrie und dem Arbeitsbereich des Leitschaufelapparates.

Die Berechnungen für den Winkel werden bei Deng et al (2011) für zwei Turbinen durchgeführt: Die konventionellen Turbinen, damit sind die bisherigen Turbinen gemeint und die *advanced hydropower turbines (AHTs)* womit neu entwickelte Turbinen gemeint sind welche besser Bedingungen für die Fischdurchgängigkeit liefern und einen größeren Energieoutput erzielen.

Für das AHT design mit:

$$\theta_{wgt} = 0,001631 * WGO^3 - 0,01745 * WGO^2 + 2,1657 * WGO - 2,5304 \quad (3-9)$$

und für konventionelle Turbinen:

$$\theta_{wgt} = 0,000363 * WGO^3 - 0,00331 * WGO^2 + 1,4371 * WGO - 6,3281 \quad (3-10)$$

Mithilfe dieser Formeln und Inputdaten kann nun berechnet werden, ob ein Fisch getroffen wird oder nicht. Was aber geschieht mit einem getroffenen Fisch? Es stellt sich die Frage, ob ein Treffer tödlich ist oder ob alle Fische diesen Schlag überleben. Um dies zu beschreiben, werden einige Faktoren in weiterführende *Bladestrike* Modelle eingebaut. Welche Faktoren dies sind und wie sie sich auswirken, wird im folgenden Kapitel 3.2 behandelt (Deng et al, 2011).

### 3.2 Weiterführende Bladestrike Modelle

Für die Anpassung der Modelle an die Realität, werden einige Zusatzparameter in die Grundformel eingebaut. Diese Grundformel wird somit erweitert. Welche Faktoren warum eingebaut werden, wird in diesem Abschnitt im Einzelnen genau erläutert.

Im Allgemeinen wird der *Mutilation Ratio* in Kapitel 3.2.2 beschrieben. Weiters werden drei weitere Verbesserungen angeführt und erläutert.

#### 3.2.1 Allgemein

Beispiele für eine Anpassung der *Bladestrike* Modelle sind im Folgenden aufgelistet (EPRI, 2011, Van Esch, 2014, Encarta, 2009):

- Fischlänge: Durch die Strömungsverhältnisse in der Turbine wird ein Fisch den Schaufelapparat nicht immer längs passieren, sondern in verschiedenen Lagen. Diesem Fehler kann zum Beispiel mit einer effektiven Länge (Kapitel 3.2.4) abgeholfen werden.

- Fischart: Nicht jeder Fisch ist bei einem Schlag gleich empfindlich, was auf den unterschiedlichen Körperbau der Fische zurückzuführen ist. Ein Stör, der durch seine Panzerplatten geschützt wird, wird bei einem Schlag bei gleicher Intensität weniger verletzt als ein Lachs, der diesen Schutz nicht hat. Dies kann mit einem Fischindex verbessert werden wobei jede Art mit einem Bezugsfisch (z.B. Lachs) verglichen wird
- Fischform: Die Form wie Breite und Höhe der Fische wird einen Einfluss auf die effektive Länge haben.
- Schaufelform: Bei der Form der Schaufel geht es um die Breite der Kante, die den Fisch trifft. Es wird dabei unterschieden, ob bei gleicher Geschwindigkeit eine breite oder schmale Kante auf dem Fisch aufschlägt. Da bei einer schmalen Kante dieselbe Kraft auf weniger Fläche verteilt ist, steigt der Druck auf den Fisch. Verbesserung durch mit einbeziehen des  $L/t$  Verhältnisses (Kapitel 3.2.3).
- Auslastung der Maschine: Bei verschieden starkem Durchfluss ist die Ausströmung der Schaufeln unterschiedlich, wodurch sich der Winkel des Wasservektors zur Turbinennabe auch verändert. Verbesserung durch Untersuchungen zum Anströmwinkel.
- *Mutilation Ratio*: Mit Hilfe dieses Faktors werden Anpassungen an den Fisch an sich unternommen. Die Grundidee dabei ist, dass nicht jeder getroffene Fisch auch verletzt wird oder daran stirbt. Eine detaillierte Beschreibung wird in Kapitel 3.2.2 gegeben.

Zur Verbesserung der *Bladestrike* Modelle wird in dieser Arbeit mithilfe eines großen Datensatzes (in Kapitel 4.1 erläutert) der *Mutilation Ratio* verifiziert und angepasst. Weiters werden  $L/t$  Verhältnisse (in Kapitel 3.2.3), effektive Länge (in Kapitel 3.2.4) und Empfindlichkeiten der Fische (in Kapitel 3.2.5) beschrieben.

### 3.2.2 *Mutilation Ratio*

Von Raben (1957) entdeckte nach den ersten Versuchen mit lebenden Fischen, dass sein Modell bei Kaplan-turbinen eine zu hohe Einschätzung der Verletzung von Fischen vorhersagt. Um die Übereinstimmung in den Griff zu bekommen, entwickelte er den *Mutilation Ratio*.

Beim *Mutilation Ratio* hatte Von Raben versucht, Folgendes zu beschreiben:

- Die Fischempfindlichkeit: Der Gedanke dabei ist, dass nicht jeder Fisch bei einem Schlag mit gleicher Intensität die gleichen Verletzungen davonträgt.
- Breite der Schaufelkante: Die Form der Kaplanschaufel ist über ihre Länge unterschiedlich und so auch die Breite der Schaufelkante. Da der ausgeübte Druck eine Funktion von Fläche und Kraft ist, ist der Druck bei kleiner Fläche höher. Die Konsequenzen daraus sind schwerere Verletzungen.
- Die Fischform: Dabei ist auf das Länge-zu-Höhe-zu-Breite-Verhältnis zu achten. Zu berücksichtigen ist auch das Verhältnis zur Schaufelkante, da ein kleiner Fisch bei einer dicken Kante eher um den Schaufelabschluss gedrückt als geschlagen wird.
- Ort des Treffers: Da es sich bei der Turbine um eine rotierende Schaufel mit konstanter Umdrehungsgeschwindigkeit handelt, ist die Schlaggeschwindigkeit vom Abstand zur Nabe abhängig. Je näher der Fisch bei der Nabe getroffen wird, desto langsamer wird der Schlag und desto geringer ist die Verletzungsgefahr.

Um alle diese Phänomene abzubilden hat Von Raben einen konstanten Wert mit 43 Prozent festgelegt. Diesen empirischen Wert setzte er nach dem Vergleich der Berechnungen und durchgeführten Versuchen fest. Daraus folgt, 43 Prozent aller getroffenen Fische werden auch tödlich verletzt.

Turnpenny et al. (1992) widmeten sich diesem Thema und entwickelten eine Formel (Formel 3-11), welche in Abhängigkeit von der Fischlänge den *Mutilation Ratio* beschreibt.

$$MR = 0,15533Ln(l) + 0,0125 \quad (3-11)$$

Definition der Variablen:

- $MR$  = Mutilation Ratio
- $Ln$  = natürlicher Logarithmus
- $l$  = Fischlänge [cm]

Um diese Formel zu entwickeln, verwendete Turnpenny et al. (1992) empirische Daten aus verschiedenen Versuchen.

### 3.2.3 $L/t$ Verhältnis

Da der *Mutilation Ratio* eine Reihe von Ereignissen abbilden soll, wurde versucht, einzelne Geschehnisse herauszufiltern und in Modellen abzubilden.

Eines davon ist das Verhältnis der Schaufelkantenbreite (die den Fisch trifft) zur Größe des Fisches. Im folgenden Abschnitt wird eine über Jahre durchgeführte Studie von EPRI (2011) behandelt. In der Studie wurde versucht, eine optimale Form der Schaufel zu bestimmen, die dem Fisch den geringsten Schaden zufügt. Auf diese Weise soll ein Maximum an überlebenden Fischen gewährleistet werden. Dafür wurden CFD Modelle verwendet und Laborversuche mit Fischen durchgeführt.

In der folgenden Abbildung 6 werden die Sterblichkeitsraten von Regenbogenforellen im Verhältnis zur Schlaggeschwindigkeit dargestellt. Es handelt sich dabei um Regenbogenforellen von verschiedenen Längen (von ca. 100 bis 250mm) und halbkreisförmigen Schaufelkanten mit unterschiedlicher Dicke (9,5; 25,4; 50,8; 101,6 und 152,4 mm). Um die Ergebnisse vergleichbar zu ma-

chen, wurden die beiden Werte (Fischlänge und Schaufelbreite) in ein Verhältnis gesetzt. Dieses Verhältnis wird L/t Verhältnis benannt.

Die Geschwindigkeiten des Schaufelrades liegen dabei zwischen 5 [m/s] und max 13 [m/s], die ist für eine durchschnittliche Kaplan turbine gering ist. Weiters wurden je nach L/t-Verhältnis lineare Trendlinien erstellt.

Dabei wird ersichtlich: Je geringer das L/t-Verhältnis, desto flacher die Gerade. Dies ist gleichbedeutend mit: Je größer das L/t-Verhältnis, desto größer die Sterblichkeitsrate bei gleicher Schlaggeschwindigkeit. Untersucht wurde dabei ein kleiner Datensatz (von ca. 21 Versuchen). Dadurch wurden Linien/Verbindungen/Aussagen aufgrund von nur Daten getroffen.

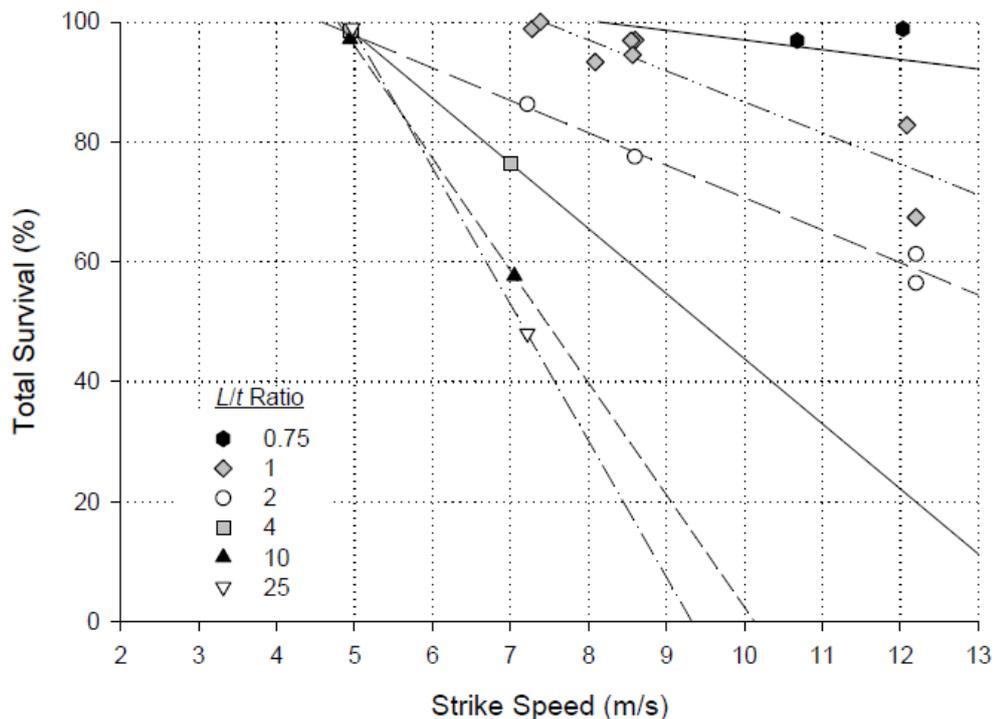


Abbildung 6: Bladestrike Überlebensrate bei Regenbogenforellen (EPRI 2011)

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen auf, dass die Sterblichkeitsrate von der Schlaggeschwindigkeit, der Fischlänge und der Schaufelkantendicke beeinflusst wird.

### 3.2.4 Effektive Länge

Ein weiterer Faktor, der in den Mutilation Ratio einfließt, ist, in welcher Lage sich der Fisch im kritischen Bereich (wo er von der Schaufelkante getroffen werden kann) befindet.

Van Esch (2014) ist zu der Erkenntnis gekommen, dass sich ein Fisch in verschiedenen Positionen durch die Turbine bewegt. Grund dafür ist die Strömungssituation. Durch die vorherrschende Wassergeschwindigkeit und den Richtungswechsel des Wassers schwimmt der Fisch nicht mehr stromlinienförmig im Wasser, sondern wird vom Wasser durch die Turbine befördert. Dies hat zur Folge, dass der Fisch nicht selbst seine Ausrichtung bestimmen kann, sondern eher zufällig durch das Medium Wasser gedreht wird.

In Abbildung 7 sind Fotos von Fischen zu sehen, die durch eine Kaplan turbine hindurch befördert werden. Dabei ist ersichtlich, dass diese nicht wie in der Theorie gerade in Richtung des Wassergeschwindigkeitsvektors sich durchbewegen, sondern in verschiedenen Positionen vom Wasser durch die Turbine befördert werden.

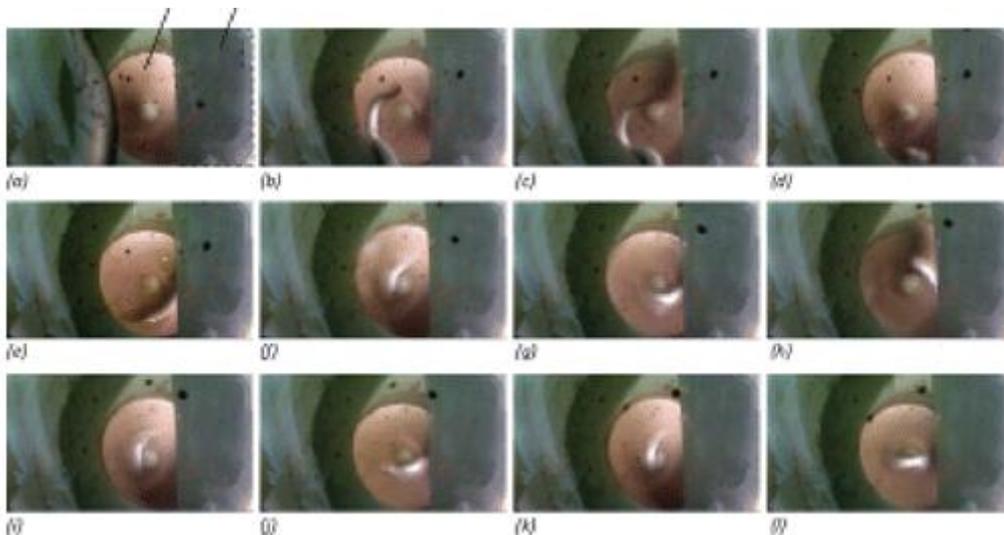


Abbildung 7: Fischrotation in der Turbine (Van Esch, 2014)

Um diesen Vorgang zu beschreiben, führte Van Esch den Begriff der effektiven Länge ein. Mithilfe der effektiven Länge beschrieb er eine zweidimensionale Rotation des Fisches. In Abbildung 8 ist die Rotation des Fisches in der Turbine

um den Winkel  $\alpha$  dargestellt.  $L_{eff}$  ist somit eine Funktion von der Länge und Breite des Fisches, sowie des Winkels  $\alpha$ .

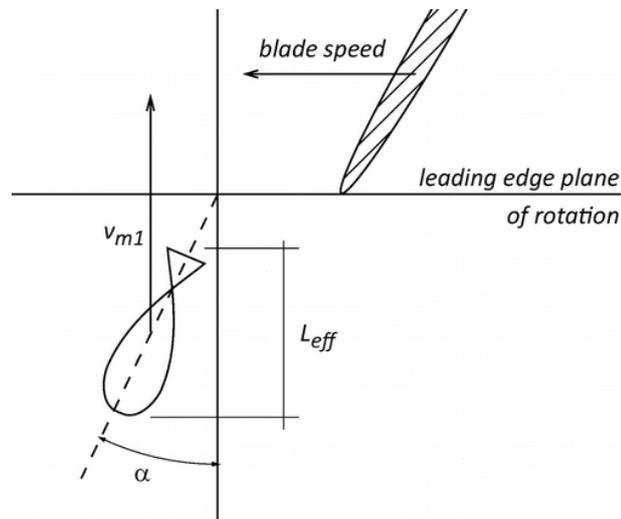


Abbildung 8: Rotation um Winkel  $\alpha$  (Van Esch, 2014)

Daraus ergibt sich bei einem Winkel  $\alpha$  von  $0^\circ$ , dass  $L_{eff} = L$  ist und bei einem Winkel  $\alpha$  von  $90^\circ$ , dass  $L_{eff} = W$  ist.  $L$  steht für die Länge des Fisches und  $W$  für seine Breite.

Verwendet man eine Normalverteilung für die Berechnung der mittleren effektiven Länge, erhält man folgenden Ausdruck.

$$\overline{L_{eff}} = \frac{2L_{max}}{\pi} \left[ \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta_0\right) - \sin(\theta_0) \right] \quad (3-12)$$

Wobei  $L_{max}$  eine Funktion von  $L$  und  $W$  darstellt und  $\theta_0$  eine Funktion von  $\alpha$  und  $\theta$ . Die grafische Darstellung der Formel ist in Abbildung 9 ersichtlich.

$$L_{max} = \sqrt{L^2 + W^2} \quad (3-13)$$

$$\theta = \alpha + \theta_0 \quad (3-14)$$

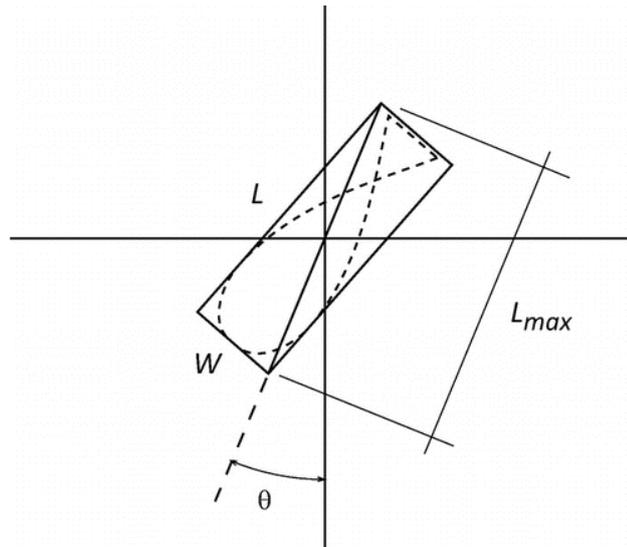


Abbildung 9:  $L_{max}$  in Abhängigkeit von  $\theta$  (Van Esch, 2014)

Im folgenden Beispiel (Abbildung 10) wird aufgezeigt, wie sich die effektive Länge über die Rotation von  $90^\circ$  verhält. Für die Grafik wurde mit einem Fisch von  $L=15$  und  $W = 5$  die effektive Länge berechnet.

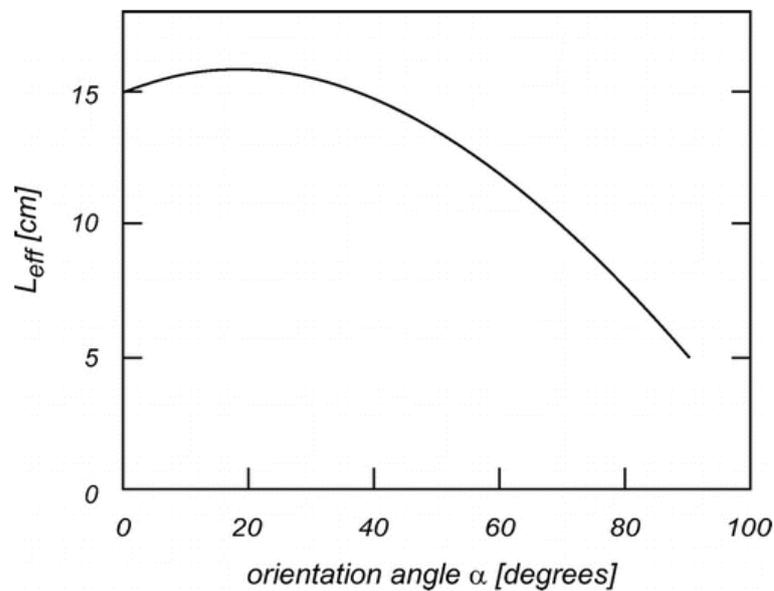


Abbildung 10: Beispiel effektive Länge (Van Esch, 2014)

Der Verlauf des Verhältnisses ist dabei bei allen Größen ähnlich. Anfangs, in einem Winkelbereich von 0 bis ca.  $30^\circ$  ist die effektive Länge durch die Schrägstellung länger als die tatsächliche Länge und nimmt danach bis zu  $90^\circ$  auf die Breite ab. Der Verlauf ist dabei nicht linear.

### 3.2.5 Empfindlichkeit der Fischart

Mit diesem Einflussfaktor wird beschrieben, wie Fische von verschiedenen Arten auf einen Schlag mit gleicher Intensität reagieren. Durch den unterschiedlichen Körperbau der Fischarten wird die Verletzung von einem gleichen Schlag der Turbinenschaufel unterschiedliche Folgen haben.

Um dies zu veranschaulichen, wird im Folgenden ein Stör mit einem Lachs verglichen.

Der Stör ist statt mit Schuppen mit mehreren Reihen von Knochenplatten bedeckt. Dieser panzerartige Aufbau bietet einen Schutz gegen das stumpfe Trauma des Schlages der Turbine.

Im Unterschied dazu der Lachs. Sein Körper ist mit kleinen Zykloidschuppen (abgerundeten, glattrandigen Schuppen) bedeckt. Diese bieten im Vergleich zu den panzerartigen Schuppen des Störs einen viel geringeren Schutz gegenüber der mechanischen Einwirkung (Encarta, 2009).

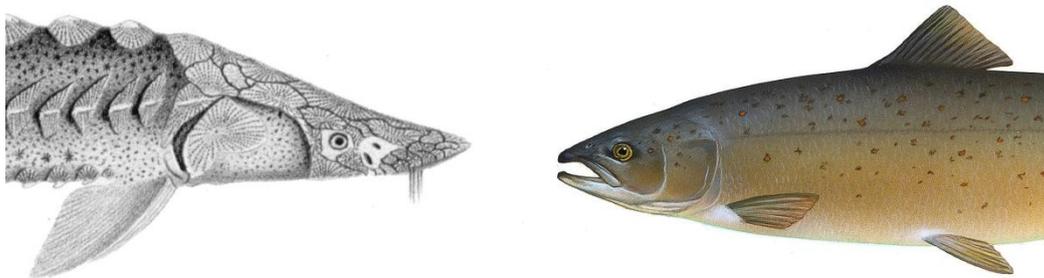


Abbildung 11: Stör und Lachs (Wikipedia, 2017)

Um dies zu veranschaulichen, sind in Abbildung 11 beide Fische schematisch dargestellt. Dabei sind die schuppenartigen Platten des Störs (links) gut ersichtlich.

## 4. Grundlagen und Methodik

Im ersten Abschnitt dieses Kapitels werden die verwendeten Daten für die weiteren Berechnungen dargelegt.

In Kapitel 4.2 werden zwei Parameter der Formel für die *Bladestrike* Modellierung im Grundmodell behandelt. Dabei handelt es sich um den Winkel zwischen Schaufelradachse und Wassergeschwindigkeitsvektor (Kapitel 4.2.1) und der Größe der Nabe (Kapitel 4.2.2).

Im dritten Teil (Kapitel 4.3) werden Parameter behandelt welche für weiterführende Modelle unter Betracht gezogen werden können. Die weiterführenden Modelle werden dabei in dieser Arbeit aufgezeigt, jedoch werden damit keine Berechnungen durchgeführt.

### 4.1 Datenerfassung

In diesem Kapitel werden der Ursprung, die Entstehung und Analyse der Daten aufgezeigt. Es handelt sich dabei um den gesamten Datensatz

Des Weiteren werden Daten für die Berechnungen des Grundmodells sowie für die weiterführenden Modelle angeführt. Diese sind im speziellen vom Kraftwerk Wanapum, welches im Folgenden vorgestellt wird.

Um für die Berechnungen und Vergleiche einen guten Datenstamm zu erhalten, wurden aus der Literatur (Zeitschriften, diversen Arbeiten und anderen Veröffentlichungen) Ergebnisse einzelner Lebendtierversuche erhoben und zusammengefasst. Dabei handelt es sich um Versuche, bei denen lebende Fische durch Kaplansturbinen geschickt wurden und dabei die Sterblichkeitsrate überprüft wurde.

Diese Arbeitsweise wurde gewählt, da die Durchführung von eigenen Versuchen in dieser Größenordnung nicht möglich war und um dennoch einen großen Datensatz zu erhalten,

Vorteile des zusammengefassten Datensatzes:

- Unterschiedliche Daten/Aufzeichnungen: Um allgemein gültige Formeln und Berechnungen aus den Daten erheben werden möglichst viele unterschiedliche Daten benötigt.
- Daten von unterschiedlichen Kraftwerken: Damit die Berechnungen nicht nur für ein Kraftwerk (einen Kraftwerkstyp) gültig ist.
- Von unterschiedlichen Personen/Instituten durchgeführte Versuche: Um regionale oder Menschliche Einflussfaktoren von einzelnen Versuchen auszuschließen.

Dafür wurden insgesamt 67 Arbeiten, die sich mit der *Bladestrike* Theorie befassen oder Daten über Turbinen und deren Auswirkungen auf Fische enthalten, gesammelt und ausgewertet. 13 unterschiedliche Auflistungen mit insgesamt 861 durchgeführten Versuchen wurden dabei zusammengefasst. Bei jedem Versuch wurden lebende Fische durch eine Kaplan turbine geschickt und die Überlebensrate beobachtet. Wie viele Fische bei jedem Versuch dabei verwendet wurden, geht aus den Arbeiten nicht hervor.

Insgesamt wurden 39 Parameter/Daten je Versuch ausgewertet. Die Wichtigsten (für die Berechnungen in dieser Arbeit) sind in Tabelle 4-1 beschrieben.

Tabelle 4-1: Daten der Versuche

Bezeichnung	Beschreibung
Site	Name/Ort der Kraftwerksanlage
head	Die Fallhöhe h bei der Versuchsdurchführung
Turbine	Art der Turbine (Kaplan oder Francis)
Blades	Anzahl der Schaufelradblätter
Runner	Durchmesser (Außendurchmesser)
rpm	Umdrehungen pro Minute (rounds per minute)
Taxon/Species	Taxon/ Fischart
size	Die Länge des Fisches
flow	Durchfluss beim Versuch
S_MW	Die Überlebenswahrscheinlichkeit bei den Versuchen

Nach der Auflistung der Versuche wurden die Daten geprüft. Die Prüfung erfolgte folgendermaßen:

Prüfparameter:

- Doppelte Versuche: Oft sind in unterschiedlichen Arbeiten dieselben Versuche publiziert.
- nicht stimmige Versuche: Wenn ein Verdacht auf einen Zahlenfehler besteht.
- nicht vollständige Daten: Fehlen bei manchen Versuchen die Daten für die *Bladestrike* Modellierung.
- Turbinenart: In dieser Arbeit werden nur Versuche mit Kaplan turbinen verwendet.

Unter nicht vollständige Daten werden Versuche bezeichnet, die nicht alle Kenngrößen enthalten, um die *Bladestrike*-Berechnung durchführen zu können. Beispiele wären fehlende Angaben über Turbinendurchmesser, Fischgröße, Durchfluss oder Schaufelradanzahl.

Durch die erste Prüfung verkleinerte sich der Datensatz auf 216 Versuche. Dabei wurde jeder auf die zuvor definierten Parameter geprüft.

Für weitere Untersuchungen, wie die Berechnung des Winkels  $\theta$ , werden zusätzlich Kenntnisse über die Fallhöhe  $h$  benötigt, wodurch der Datensatz auf 81 Versuche dezimiert wurde.

Für die Berechnungen in dieser Arbeit wird der Datensatz mit 81 Versuchen verwendet, der im Folgenden als „qualitativer Datensatz“ bezeichnet wird (Anhang).

### **Kraftwerksanlagen**

Aufgrund der sprachlichen Einschränkung wurden nur Daten aus englisch-/deutschsprachiger Literatur gesucht und entnommen. Weitere Daten wurden

auch in französischer Literatur gefunden, jedoch nicht in dieser Arbeit verwendet. Auffallend ist, dass die meisten Versuche in den USA durchgeführt wurden.

Um einzelne Berechnungsschritte aufzuzeigen wurde versucht, eine Anlage auszuwählen, die repräsentativ für den qualitativen Datensatz (mit den 81 Versuchen) steht. Dabei wurde darauf geachtet, dass alle Daten (auch die Fallhöhe) vorhanden sind, dass mehrere Versuche an der gleichen Turbine durchgeführt wurden, dass unterschiedliche Eingangsparameter vorhanden sind und dass der Datensatz stimmig ist. Aufgrund dieser Parameter wurde die Anlage bei *Wanapum* ausgewählt. Sie stellt somit die Referenzanlage für die weiteren Untersuchungen dar.

### **Wanapum**

Wanapum (siehe Abbildung 12) ist eine Kraftwerksanlage am Columbia River im Staate Washington. Mit dem Turbinendurchmesser von 7,24 Metern gehört sie zu den größeren Anlagen in den USA. In den Versuchen wurde die Turbine Nummer UNIT 9 bei einer Fallhöhe von 23 bis 30 Metern untersucht. Die Turbine besitzt fünf Schaufelräder und wird bei den Versuchen mit einer Umdrehungsgeschwindigkeit von 86 Umdrehungen pro Minute (rounds per minute = rpm) betrieben. Der Durchfluss variiert dabei zwischen 255 und 481m<sup>3</sup>/s.<sup>7</sup>



Abbildung 12: Wanapum Damm(Pratt, 2015)

## 4.2 Das Grundmodell

Für die Berechnung der *Bladestrike* Wahrscheinlichkeit wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit das Grundmodell in Form der Formel von Deng (2009) (siehe Gleichung 3-5) verwendet, da alle in dieser Arbeit angeführten *Bladestrike* Formeln dasselbe Ergebnis liefern und die Formel von Deng (2009) mit  $t$  zu  $t_{cr}$  eine kurze und übersichtliche Form darstellt.

Für die Berechnung der *Bladestrike* Wahrscheinlichkeit wurden die Faktoren von  $l$ ,  $n$ ,  $N$  und  $V_{axial}$  mit Daten aus den Versuchen (Datengrundlage siehe Kapitel 4.1) unterschiedlicher Literatur verwendet. Der Winkel  $\theta$  wird im folgenden Kapitel 4.2.1 behandelt. Des Weiteren wird das Verhältnis Nabe zu Außendurchmesser, welches für die Berechnung benötigt wird, in Kapitel 4.2.2 dargestellt.

### 4.2.1 Berechnung Winkel $\theta$

Für eine Abschätzung des Winkels  $\theta$  mit den vorhandenen Daten wurde gemeinsam mit dem Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen der TU-Graz die Berechnung durchgeführt.

#### **Dabei ist zu beachten:**

Die Betrachtung ist eine rein eindimensionale analytische Berechnung. Es wird zusätzlich ein drallfreier Austritt vorausgesetzt. Aufgrund mangelnder Daten/Messungen können die Berechnungen nicht verifiziert werden. Dies bedeutet: Wie genau diese Berechnung ist und in welchem Verhältnis es mit dem auftretenden Winkel übereinstimmt, wird in dieser Arbeit nicht behandelt.

In der folgenden Grafik sind die Geschwindigkeitsvektoren dargestellt, die bei den geforderten Bedingungen auftreten. Dabei steht das  $e$  für den Einlauf und das  $a$  für den Auslauf.

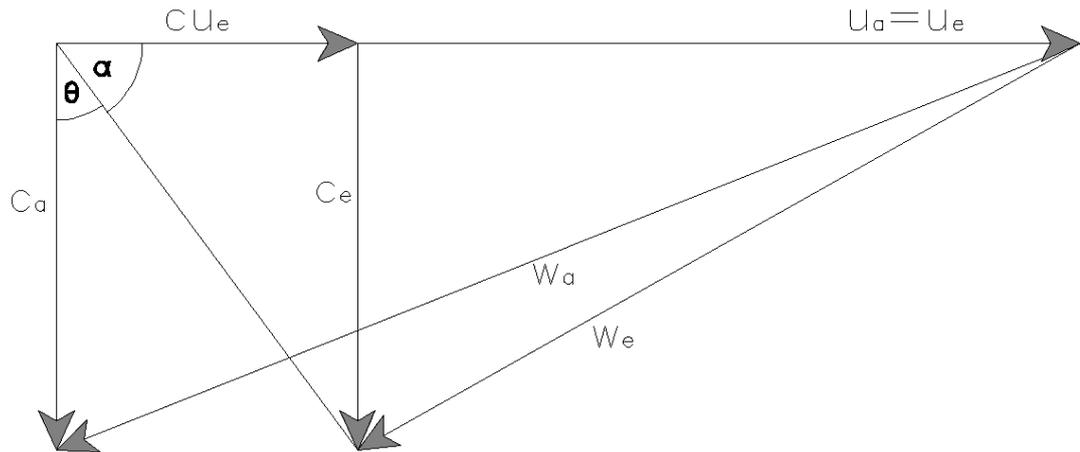


Abbildung 13: Geschwindigkeitsvektoren

- $u_a$ : Umdrehungsgeschwindigkeit bei einem bestimmten Radius beim Auslauf
- $u_e$ : Umdrehungsgeschwindigkeit bei einem bestimmten Radius beim Einlauf
- $c_a$ : Geschwindigkeitsvektor des Wasser in Achsrichtung beim Auslauf
- $c_e$ : Geschwindigkeitsvektor des Wasser in Achsrichtung beim Einlauf
- $w_a$ : Relativgeschwindigkeit beim Auslauf
- $w_e$ : Relativgeschwindigkeit beim Einlauf
- $c u_e$ : Geschwindigkeitsvektor des Wassers in Umfangrichtung beim Einlauf

Für die Berechnung wird die Eulersche Turbinenmaschinen Hauptgleichung (Formel 4-1) verwendet. Dabei wird  $c u_a$  durch die Forderung nach einem drallfreien Austritt zu Null (Benigni, 2017).

$$H = \frac{1}{g} * (u_e * cu_e - u_a * cu_a) \quad (4-1)$$

Dadurch erhalten wir folgenden Ausdruck:

$$H = \frac{u_e * cu_e}{g} \quad (4-2)$$

Die Umdrehungsgeschwindigkeit  $u_e$  hängt dabei von der Drehgeschwindigkeit und dem Abstand zur Nabe ab und kann für einen gegebenen Punkt mit einem Abstand  $r_x$  von der Nabe wie folgt dargestellt werden.

$$u_e = \frac{N}{60} * r_x * 2\pi \quad (4-3)$$

Die Berechnung der Geschwindigkeit  $c_m$  in Turbinenachse erfolgt dabei über den Durchfluss und die durchflossene Fläche.

$$c_m = \frac{Q}{A} = (V_{axial}) \quad (4-4)$$

Wobei die Geschwindigkeit aufgrund keiner Änderung der Fläche  $A$  beim Ein- und Auslauf dieselbe ist und somit:

$$c_m = c_e = c_a = (V_{axial}) \quad (4-5)$$

Der Winkel  $\theta$  wird über den geometrischen Zusammenhang bestimmt.

$$\alpha = \tan\left(\frac{c_e}{cu_e}\right) \quad (4-6)$$

$$\theta = 90 - \alpha \quad (4-7)$$

Mithilfe dieser Berechnung kann der Winkel  $\theta$  bestimmt werden. Wichtig sind dabei, wie erwähnt, die Randbedingungen beziehungsweise Forderungen zu Beginn. Diese wären: ein drallfreier Austritt und eine rein eindimensionale analytische Lösung.

Die Verifizierung, ob der dreidimensionale Strömungszustand als eindimensionaler angenähert werden kann und ob der drallfreie Austritt, der gefordert wird, auch zutrifft, wird aufgrund der Zielsetzung dieser Arbeit nicht behandelt.

Grund für diese Berechnungsart des Winkels  $\theta$  liegt darin, dass bei fast allen Daten aus der Literatur keine Informationen über den Leitschaufelapparat zur Verfügung stehen und somit die Berechnung des Winkels laut Dengg et al. (2005) nicht möglich ist.

#### 4.2.2 Bestimmung der Nabengröße

Für die Bestimmung der Geschwindigkeit, der durchflossenen Fläche und anderer Parameter ist die Größe der Nabe ein wichtiger Faktor. Bei den verwendeten Daten (Datengrundlage in Kapitel 4.1) ist dieser Wert nicht angegeben.

Um eine Größe für die Nabe zu erhalten, wurde die Abbildung 14 verwendet (Berechnung und Verwendung des Diagramms in Kapitel 5.1.2). Im Zusammenhang mit der Schaufelradanzahl kann auf einen Bereich der spezifischen Drehzahl geschlossen werden und mit dem vorhandenen Diagramm auf ein Verhältnis von Außendurchmesser zu Nabendurchmesser.

Für die Berechnung der Spezifischen Drehzahl  $n_s$  können die Werte der rot eingerahmten Box verwendet werden. Diese zeigt eine Abschätzung in Abhängigkeit der Anzahl der Schaufelräder. Für die Abschätzung des Verhältnisses der Nabengröße zum Außendurchmesser  $v$  wird die darunterliegende grün gekennzeichnete Linie verwendet.

Die Berechnung der Nabengröße und ein Beispiel sind unter Kapitel 5.1.2 dargestellt.

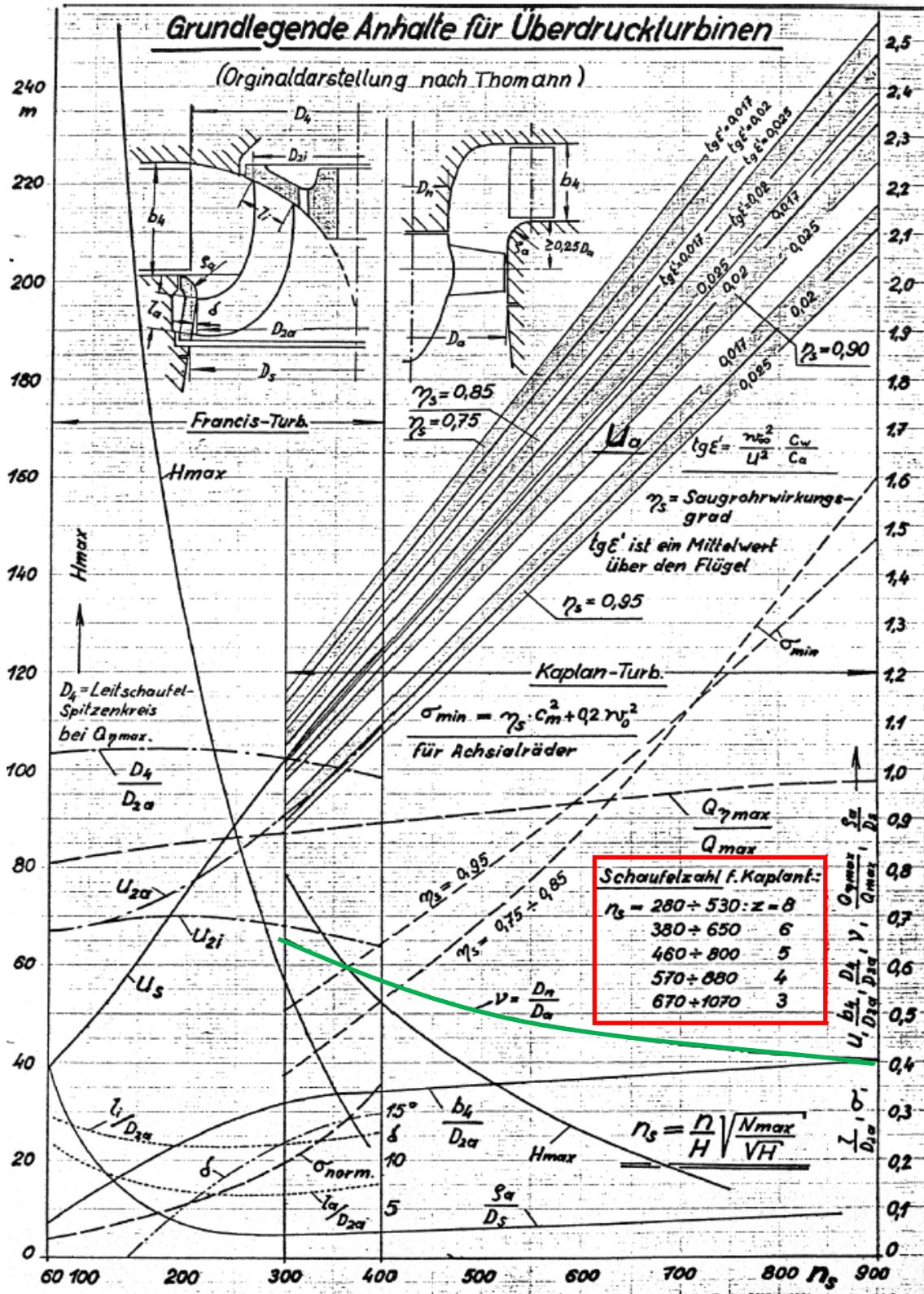


Abbildung 14: Grundlegende Anhalte für Überdruckturbinen nach Thomann (Benigni, 2017)

### 4.3 Weiterführende Modelle

In diesem Kapitel werden Parameter behandelt, mit welchen die *Bladestrike* Modelle verbessert werden können. Dabei handelt es sich um die Kantenbreite der Kaplanschaufel, die Rotation der Fische und die unterschiedliche Empfindlichkeit der Fischarten.

#### 4.3.1 Kantenbreite der Kaplanschaufel

Um die Breite der Schlagkante zu bestimmen, werden die Abmessungen der Turbine benötigt. Dabei ist bei den Versuchen der Außendurchmesser als Wert vorhanden. In dieser Arbeit wird mit verschiedenen Profilen eine allgemein gültige Formel entwickelt. Diese soll vom Durchmesser abhängen und bei mindestens drei Abständen zur Nabe die Breite der Schaufelkante liefern.

Diese Abstände sind:

- Direkt an der Nabe (Hub)
- Mittig zwischen Nabe und Außenradius (Mid)
- Direkt am Außenradius (Tip)

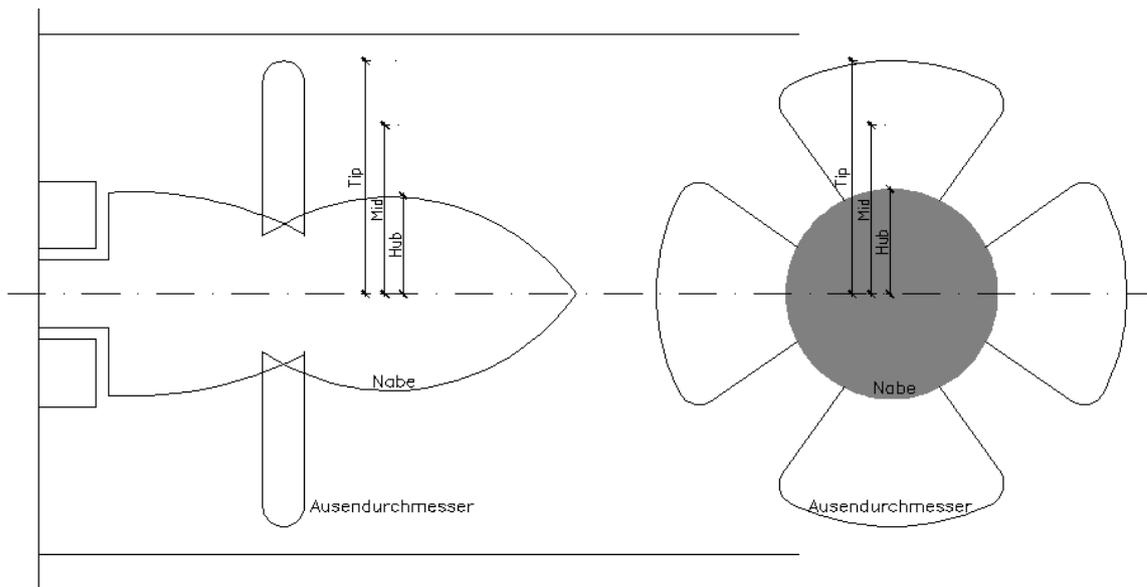


Abbildung 15: Schematische Ansicht Kaplanturbine

In Abbildung 15 sind die Abstände in einer schematischen Darstellung der Kaplan-turbine veranschaulicht. Diese Grafik zeigt die Turbine als Längsschnitt und auch als Frontalansicht in Achsrichtung der Nabe.

Um die Breite der Kaplan-Schaufelkante zu bestimmen, muss zuerst festgelegt werden, bei welchem Abstand von der Nabe weg diese bestimmt werden soll, da sich die Breite der Kante mit dem Abstand zur Nabe ändert.

Definition: die Breite der Schaufelkante ist jener Radius eines Kreises, welcher kleinstmöglich in die Spitze (Schlagkante) des Profils passt.

In Abbildung 16 sind Profilschnitte einer Turbine mit einem Durchmesser von 630mm dargestellt. Mit den Zahlen eins bis sieben wird dabei der Abstand zur Nabe beschrieben, wobei eins bei der Nabe und sieben einen Profilschnitt beim Außenradius darstellt.

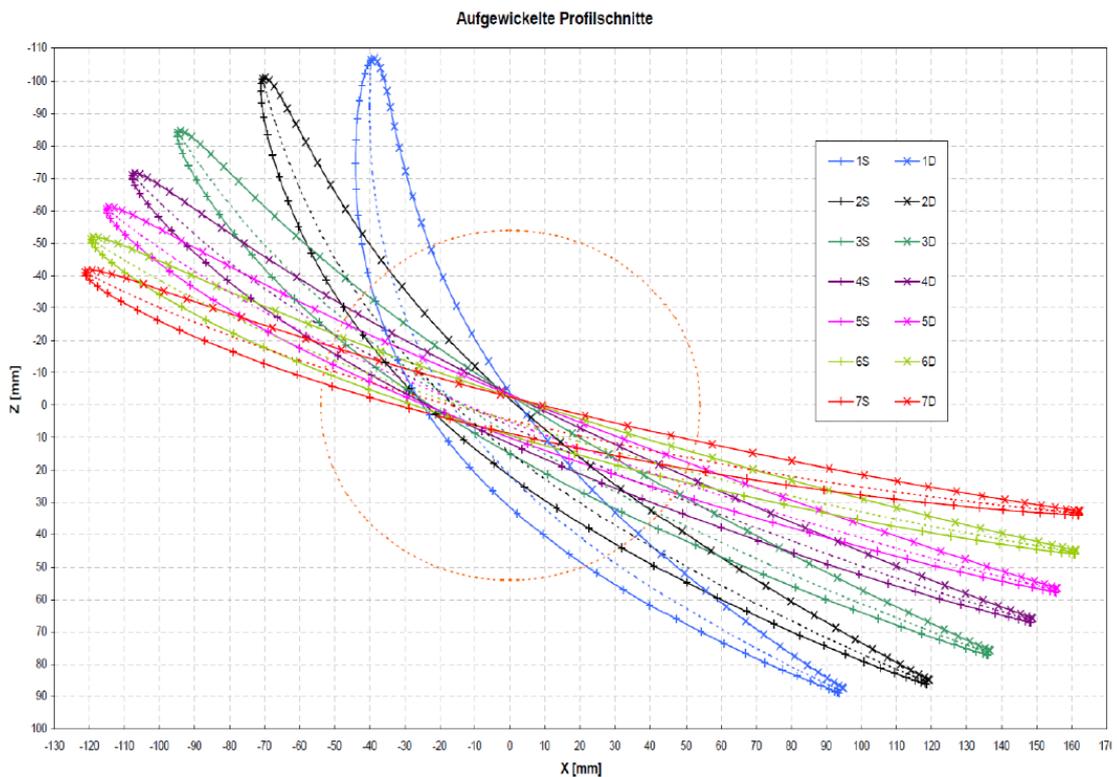


Abbildung 16: Profilschnitte (Kaplan-turbine) mit Durchmesser 630mm (Benigni, 2017)

### 4.3.2 *Rotation*

Bei der 2D-Rotation handelt es sich um die Berechnung der effektiven Länge  $L_{eff}$ , welche in Kapitel 3.2.4 behandelt wird.

Die Berechnung der effektiven Länge  $L_{eff}$  erfolgt mittels der Gleichung 2-12.

Aufgrund der Tatsache, dass der Fisch eine dreidimensionale Rotation in der Turbine durchlebt, muss auch dies in Betracht gezogen werden. Weiters ist auf eine Abhängigkeit von Höhe zu Breite zu Länge bei verschiedenen Fischarten zu achten.

### 4.3.3 *Empfindlichkeit der Fische*

Um die unterschiedliche Empfindlichkeit der Fische in die Berechnung einfließen zu lassen, werden salmonide Fischarten als Referenzfische angesehen. In der in dieser Arbeit zusammengestellten Datenbank sind die meisten Versuche mit salmoniden Fischarten durchgeführt worden.

## 5. Ergebnisse

### 5.1 Grundmodell

Im Grundmodell werden die Daten für den Winkel  $\theta$  und dem Verhältnis von Nabe zu Außendurchmesser dargestellt und mit Beispielen und Grafiken analysiert.

#### 5.1.1 Ermittlung des Winkel $\theta$

Die Darstellung/Berechnung des Winkels wird in diesem Kapitel in vier Arten unterteilt:

- Generelle Berechnung des Winkels
- Winkel im Verhältnis zum Durchmesser
- Winkel im Verhältnis zum Durchfluss
- Winkel im Verhältnis zu relativem Durchfluss

Die Berechnung des Winkels  $\theta$ , wird wie im Kapitel 4.2.1 beschrieben, durchgeführt.

#### **Generelle Berechnung des Winkels**

Bei der generellen Berechnung wird der Winkel gemäß Formel 3-2 bis 3-8 berechnet und die daraus gewonnenen Ergebnisse werden in den folgenden Tabellen aufgelistet.

In Abbildung 17 werden alle Versuche des qualitativen Datensatzes und deren berechneter Winkel  $\theta$  dargestellt. Die Berechnung wird an zwei Abständen von der Achse durchgeführt. Die rote Linie für den Winkel „Theta r“ steht dabei für die Werte des Winkels beim Nabendurchmesser und die blaue für „Theta R“ für die Werte des Winkels beim Außendurchmesser.

Beim Vergleich der verschiedenen Versuche ergibt sich ein Mittelwert des Winkels beim Nabendurchmesser von ca.  $31^\circ$  und beim Außendurchmesser von ca.

52°. Zur Veranschaulichung wird in Abbildung 18 und Abbildung 19 die Verteilung der Winkel (jeweils bei der Nabe und beim Außendurchmesser) in einem Boxplot dargestellt. Die Mittelwerte der Berechnungen stimmen dabei fast mit dem Medianen überein.

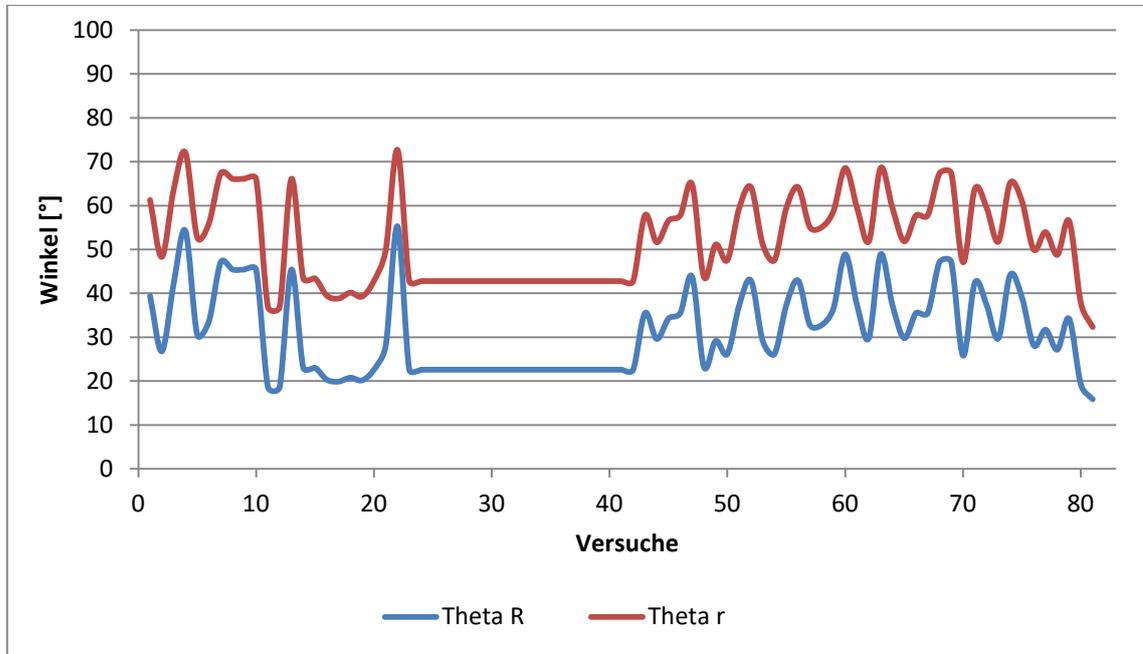


Abbildung 17: Winkel  $\theta$  bei verschiedenen Versuchen

Der Boxplot bei der Nabe wird in Abbildung 18 dargestellt und die dazu erhaltenen Ergebnisse in Tabelle 5-1.

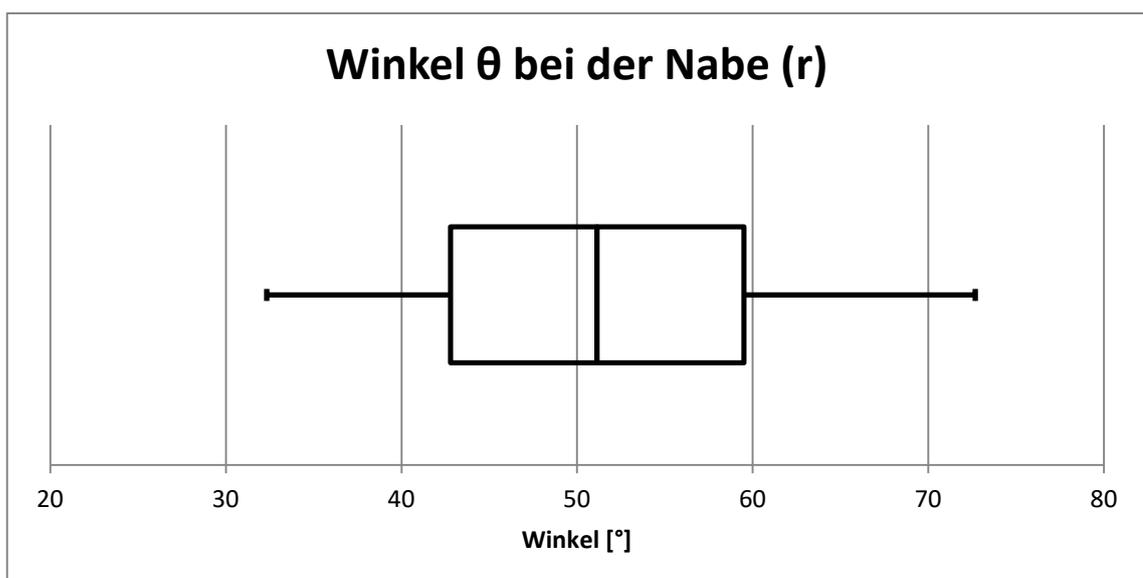


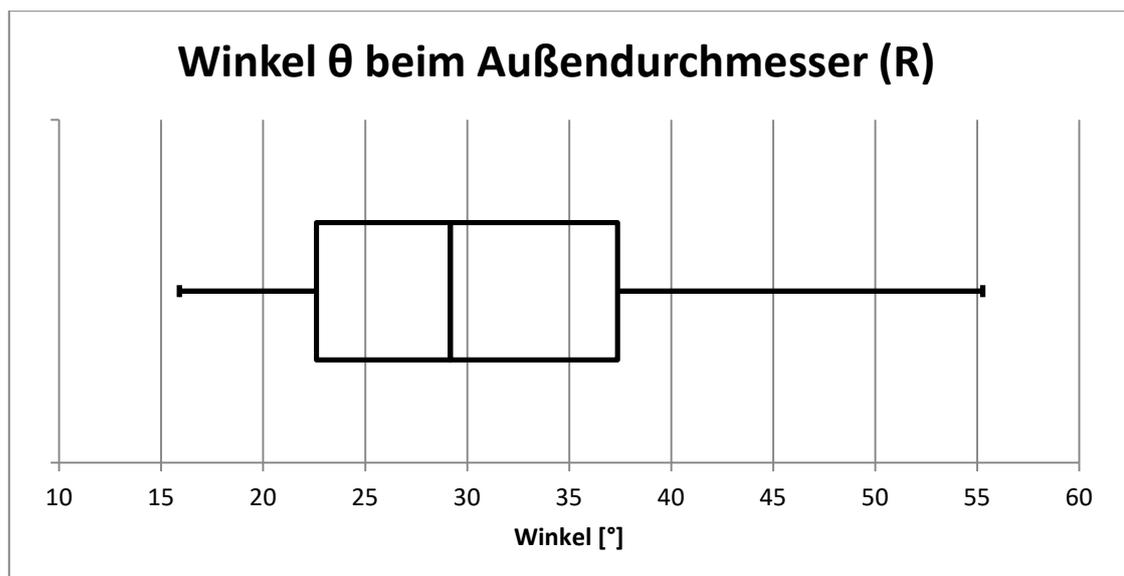
Abbildung 18: Winkel  $\theta$  bei Nabe

Tabelle 5-1: : Winkel  $\theta$  bei Nabe

Bezeichnung	Winkel [°]
Minimum	32,33
Median	51,12
Maximum	72,68

Die Werte für den Winkel unterscheiden sich dabei stark (von ca. 30-70°).

In der folgenden Abbildung 19 wird der Boxplot beim Außendurchmesser dargestellt. Wie auch in Abbildung 17 ersichtlich, erhält man bei der Berechnung kleinere Winkel. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-2 aufgelistet.

Abbildung 19: Winkel  $\theta$  beim AußendurchmesserTabelle 5-2: Winkel  $\theta$  beim Außendurchmesser

Bezeichnung	Winkel [°]
Minimum	15,90
Median	29,16
Maximum	55,28

Auch die Ergebnisse der Berechnung für den Winkel beim Außendurchmesser sind stark unterschiedlich (ca. 15-55°).

Um die Ergebnisse bei der Nabe und beim Außendurchmesser zu vergleichen, wird in Abbildung 20 die Berechnung in der Mitte der Schaufel durchgeführt und mittels Boxplot dargestellt. Dabei ist darauf zu achten, dass es sich dabei nicht um den Mittelwert der beiden Berechnungen davor handelt. Der Grund dafür ist die Verteilung des Winkels über den Durchmesser wie in Abbildung 21 dargestellt.

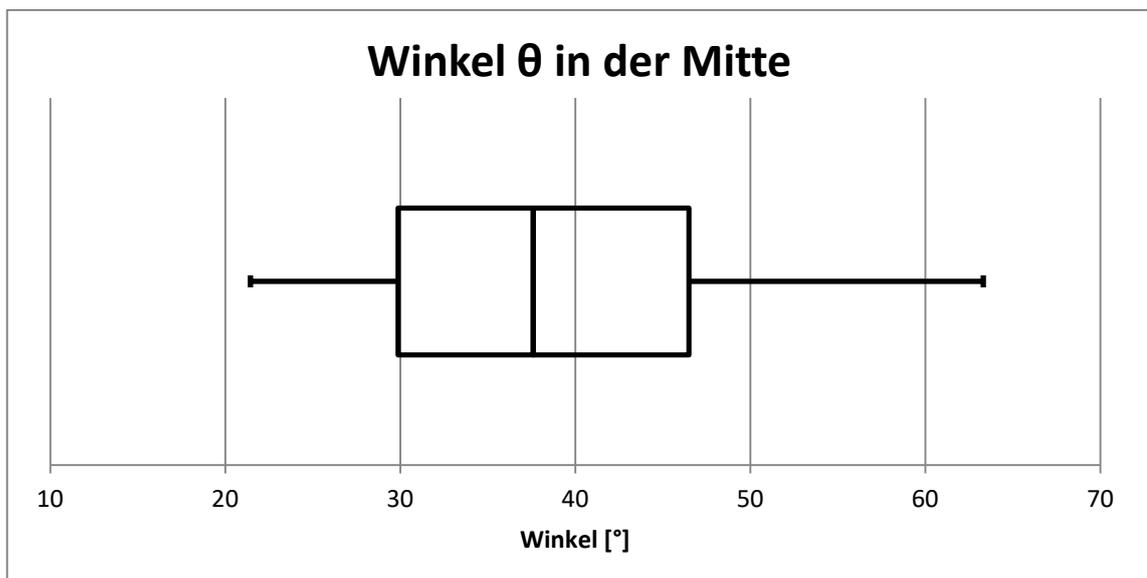


Abbildung 20: Winkel  $\theta$  in der Mitte der Schaufel

Tabelle 5-3: Winkel  $\theta$  in der Mitte der Schaufel

Bezeichnung	Winkel [°]
Minimum	21,45
Median	37,59
Maximum	63,33

Die Berechnungen des Winkels zeigen eine große Verteilung von ca. 15° (Abbildung 18)-73°(Abbildung 19). Der Median in der Mitte der Schaufel berechnet sich mit etwa 38°. Aufgrund der großen Unterschiede dieser Ergebnisse und der nicht vorhandenen Möglichkeit diese auf deren Richtigkeit zu überprü-

fen werden auch Berechnungen mit fixem Winkel durchgeführt. Dies bedeutet, bei jedem Versuch wird der gleiche Winkel (von 30,40 und 50°) für die Berechnung verwendet. Die Größen der Winkel wurden aufgrund der berechneten Mittelwerte/Mediane gewählt.

Wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben ist das eine rein eindimensionale, analytische Berechnung mit drallfreiem Austritt. Aufgrund fehlender Messungen/Daten können diese Berechnungen nicht mit den in den Versuchen auftretenden Winkeln abgeglichen werden. Es kann jedoch der Einfluss auf das Ergebnis aufgrund unterschiedlicher Winkel (berechnete und fixe) berechnet werden. Dies wird in Kapitel 6.1.1 dargestellt.

### **Berechnung Winkel $\theta$ im Verhältnis zum Schaufelraddurchmesser**

Wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben zeigt die Berechnung, dass der Winkel vom Ort der Betrachtung (Durchmesser) abhängt. Um dies darzustellen, wird in Abbildung 21 der Verlauf des Winkels  $\theta$  über den Durchmesser abgebildet.

Für die Darstellung wurde die repräsentative Anlage Wanapum gewählt. Die Eingangsparameter für die Berechnung sind in der Tabelle 5-4 ersichtlich.

*Tabelle 5-4: Ausgangswerte für Berechnung Winkel  $\theta$*

<b>Bezeichnung</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>
Außendurchmesser	7,24	m
Drehzahl	86	rpm
Durchfluss	424,75	m <sup>3</sup> /s
Fallhöhe	26,5	m

Mit den in Tabelle 5-4 aufgelisteten Werten kann die Verteilung des Winkels  $\theta$  über den Durchmesser wie folgt dargestellt werden:

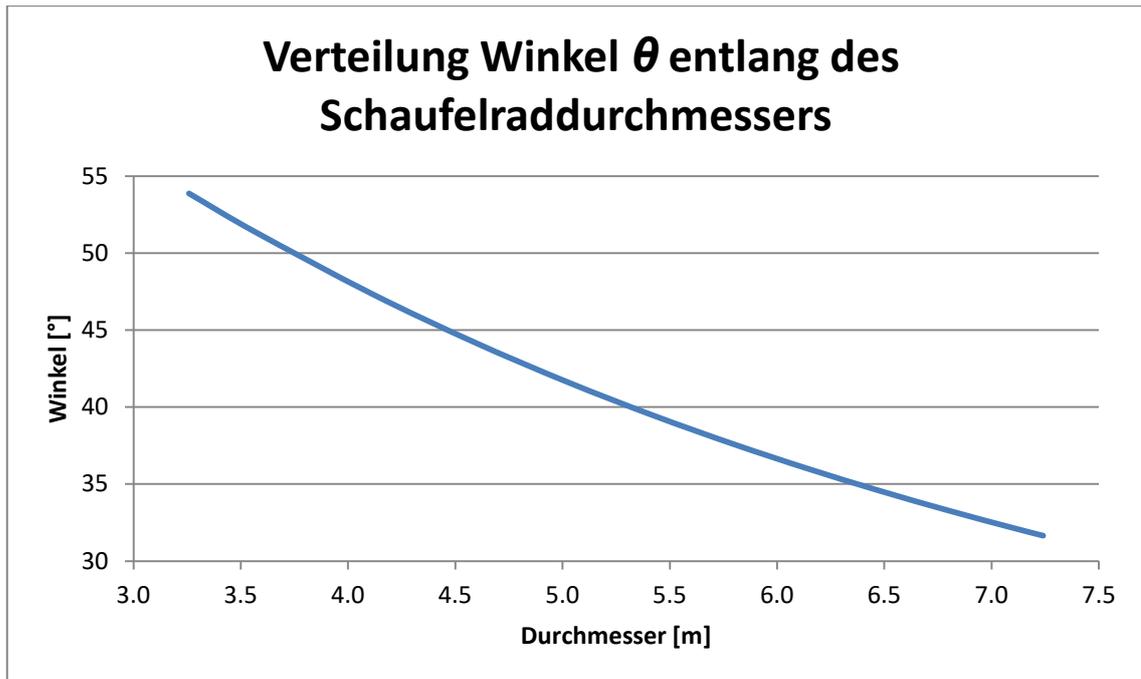


Abbildung 21: Winkel  $\theta$  über den Schaufelraddurchmesser

Dies ist ein Beispiel der Verteilung des Winkes  $\theta$  über den Durchmesser an der Wasserkraftanlage Wanapum. Der Verlauf des Graphen bei anderen Versuchen hat dabei immer die gleiche (nicht lineare) Form, jedoch unterscheiden sich die absoluten Werte des Winkels  $\theta$  von Versuch zu Versuch. Der Zusammenhang zwischen Durchmesser und Winkel ist nicht linear.

In Tabelle 5-5 sind die repräsentative Werte für den Graphen dargestellt.

Tabelle 5-5: Winkel  $\theta$  bei Wanapum

Durchmesser	Winkel
3,26m (Nabendurchmesser)	53,87°
4,11m	47,36°
5,25m (mittig der Schaufel)	40,36°
6,48m	34,56°
7,24m (Außendurchmesser)	31,65°

Die Berechnung erfolgte an 13 Abständen zur Nabe. In Tabelle 5-5 sind die fünf wichtigsten aufgelistet. Die Teilung erfolgte in zehn Teile zwischen Nabenaus-

ßenkante und Außendurchmesser. Zusätzliche Berechnungen wurden beim Außendurchmesser, beim Nabendurchmesser und mittig zwischen beiden durchgeführt.

### Berechnung Winkel $\theta$ im Verhältnis zum Durchfluss

In diesem Kapitel wird die Abhängigkeit des Winkels  $\theta$  bei verschiedenen Durchflüssen bei der repräsentativen Anlage Wanapum behandelt.

In Abbildung 22 ist ersichtlich, dass bei steigendem Durchfluss der Winkel kleiner wird. Weiters ist zu bemerken, dass sich die Verteilung vom Winkel bei der Nabe (r), in der Mitte (mid) und beim Außenradius (R) im gleichen Verhältnis bewegt.

Wie auch bei den Berechnungen des Winkels entlang des Schaufelraddurchmessers (Abbildung 17) ist der Winkel beim Außendurchmesser am kleinsten und bei der Nabe am größten. In Abbildung 22 ist weiters der nichtlineare Zusammenhang (welcher in Abbildung 17 behandelt wurde) über den Durchmesser ersichtlich, da der grüne Graph für den Winkel (mid) in der Mitte nicht mittig zwischen Außendurchmesser (R) und Nabe (r) liegt.

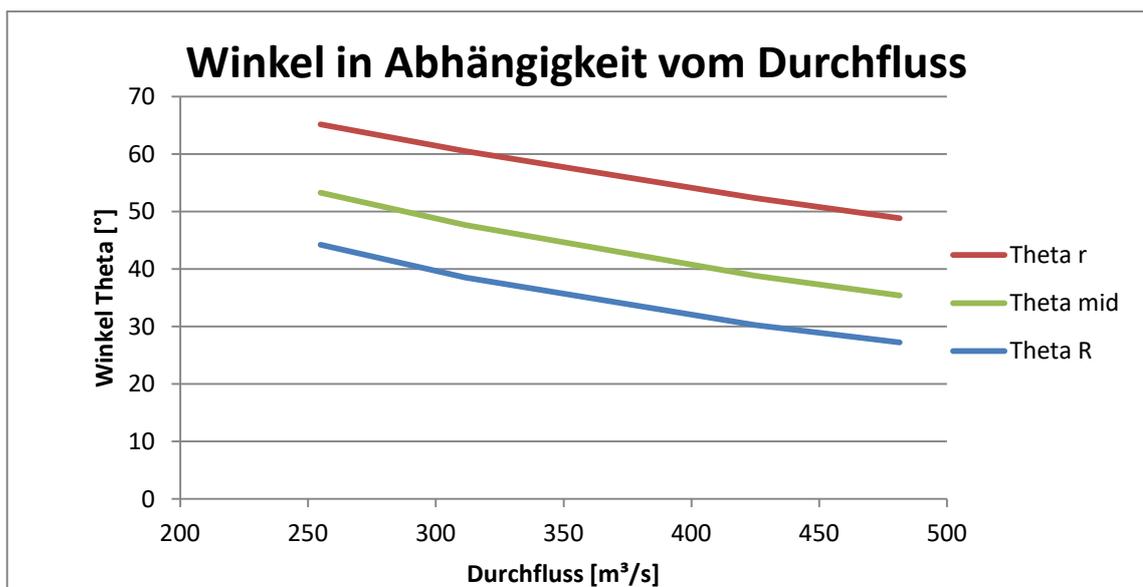


Abbildung 22: Winkel in Abhängigkeit vom Durchfluss

Aufgrund der Änderung des Durchflusses ändert sich auch die Fallhöhe  $h$ . Um den Einfluss der Fallhöhe auf die Ergebnisse in Abbildung 22 auszuschließen, wird die Fallhöhe  $h$  auf den Mittelwert von 25 m gesetzt. Die Daten für die Fallhöhen bei den Versuchen liegen dabei zwischen 23,50 m und 26,50 m (siehe Anhang).

### **Berechnung Winkel $\theta$ im Verhältnis zum relativen Durchfluss**

Um nun generelle Aussagen über den Winkel Theta  $\theta$  zu erhalten, wird der Durchfluss relativ zum Ausbaudurchfluss berechnet.

Daten über den Ausbaudurchfluss sind von den folgenden Wasserkraftanlagen bekannt: John Day mit 9118 m<sup>3</sup>/s bei 16 Turbinen, Rocky Reach mit 6229,7 m<sup>3</sup>/s bei 11 Turbinen und Wanapum mit 5323 m<sup>3</sup>/s bei 10 Turbinen.

Da nicht anders bekannt, wird angenommen, dass der Durchfluss sich gleichmäßig auf alle Turbinen aufteilt.

Für eine Vergleichbarkeit der Daten wurde die Berechnung bei allen Anlagen in der Mitte der Schaufel (Zwischen Nabenaußendurchmesser und Schaufelaußendurchmesser) durchgeführt.

Bei einem  $Q$  relativ von 1,0 ist der Durchfluss bei den Versuchen genau der Ausbaudurchfluss. Unter 1,0 ist der Durchfluss bei den Versuchen geringer als der Ausbaudurchfluss.

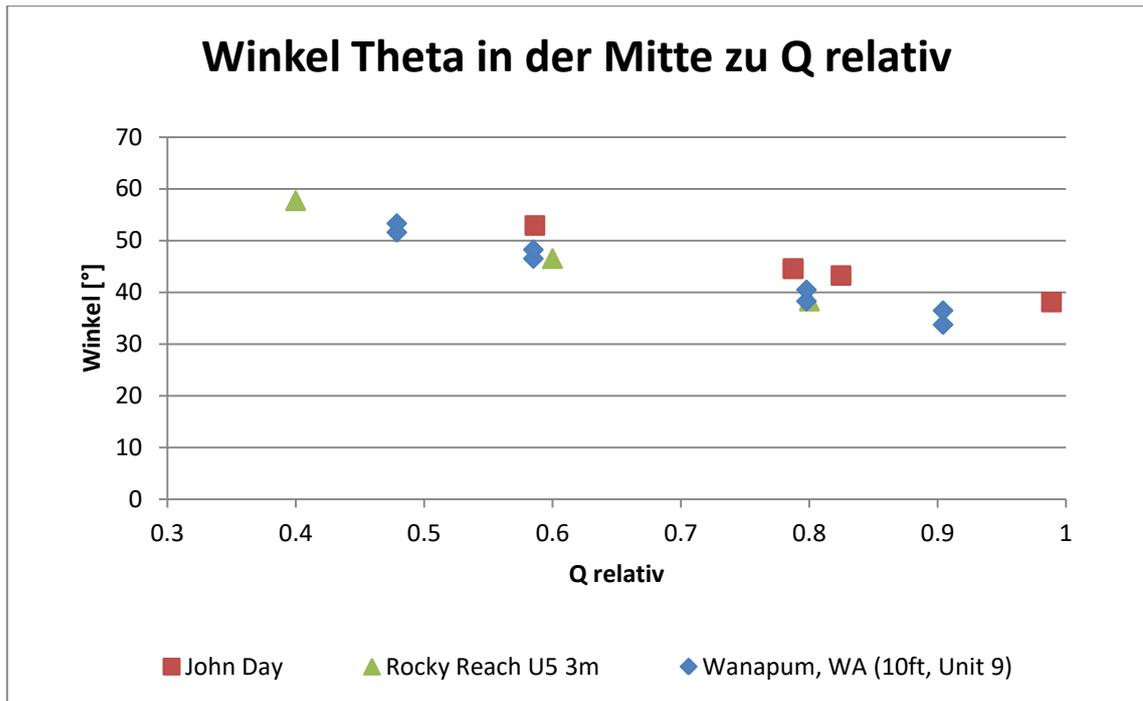


Abbildung 23: Winkel Theta zu Q relativ

Mit den in Abbildung 23 dargestellten Ergebnissen ist eine gute Übereinstimmung bei verschiedenen Kraftwerken ersichtlich. Ein möglicher Grund für diese Übereinstimmung kann auch die Art der Berechnung des Winkels sein.

Aufgrund der erhobenen Daten kann nicht ein Wert für den Winkel  $\theta$  angegeben werden. Die Berechnungen weisen jedoch daraufhin, dass der Winkel in den meisten Fällen zwischen  $30-50^\circ$  liegt. Um weitere Aussagen zu treffen muss zuerst der Einfluss des Winkels auf die *Bladestrike* Berechnung erhoben werden (Kapitel 6.1.1).

### 5.1.2 Ermittlung des „Nabe zu Außendurchmesser“ Verhältnisses

In Kapitel 5.1.2 wird die Berechnung der Nabengröße anhand des in Kapitel 4.2.2 dargestellten Diagramms von Thomann beschrieben. Zur Veranschaulichung werden anschließend die Ergebnisse beim Kraftwerk *Wanapum* angewandt.

Für die Berechnungen in dieser Arbeit wird der Nabendurchmesser der Turbinen benötigt. Diese Daten sind aber bei den Versuchen in der Literatur nicht

angegeben und müssen somit abgeschätzt oder berechnet werden (siehe Kapitel 4.2.2)

Für eine Abschätzung kann mithilfe des Diagramms von Thomann und der Anzahl der Schaufelräder ein Bereich definiert werden, in dem das Verhältnis von Nabe zu Außendurchmesser steht.

In Abbildung 24 wird ein Teilausschnitt des Diagramms von Thomann dargestellt und anhand dieses wird, wie folgt, die Berechnung zur Bestimmung der Nabengröße durchgeführt.

### **Beispiel bei Kraftwerk Wanapum**

Die Turbine beim Kraftwerk Wanapum besteht aus fünf Schaufelradblättern, wie auch bei den meisten Turbinen bei dem verwendeten Datensatz. Des Weiteren sind einige Turbinen mit vier und sechs Schaufelradblättern vorhanden. Mit der Anzahl der Schaufelblätter wird die spezifische Drehzahl  $n_s$  aus dem Diagramm ausgelesen. Diese liegt bei fünf Schaufeln im Bereich zwischen 460 und 800 Umdrehungen. Mit dem niedrigsten und höchsten Wert wird mithilfe der Abbildung 24 nun das Verhältnis  $v$  von Nabendurchmesser zu Außendurchmesser bestimmt. Dabei ergeben sich Werte von ca. 0,41 bis 0,52. Zusätzlich wird ein Wert für das Verhältnis  $v$  bei einer mittleren Drehzahl von 630 bestimmt. Dieser wird mit 0,45 ausgelesen.

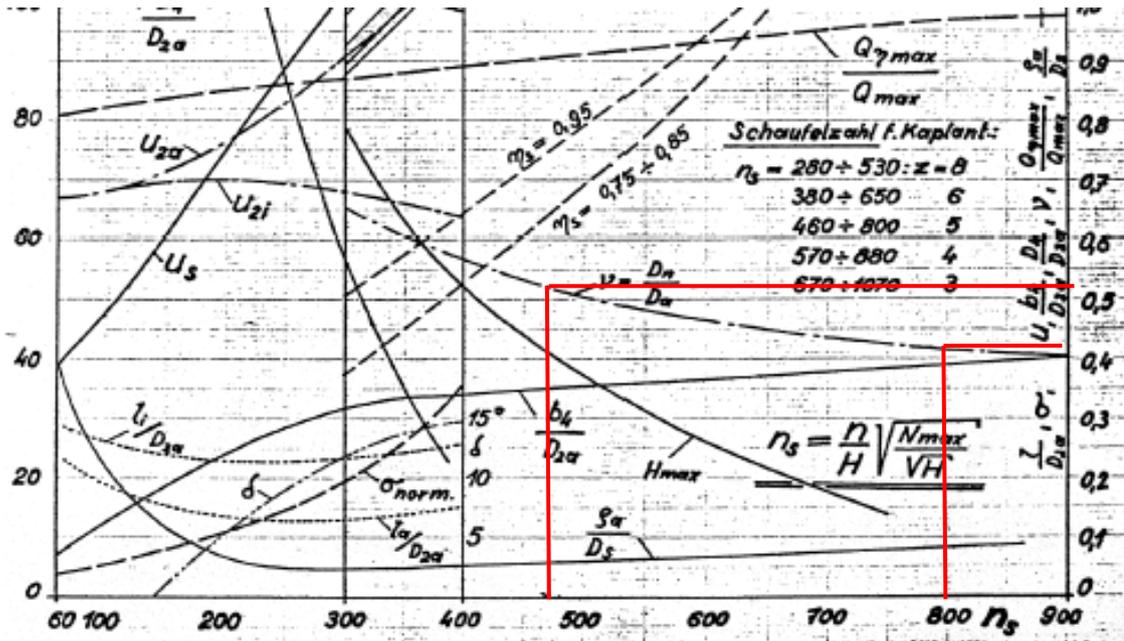


Abbildung 24: Diagramm laut Thomann für Berechnung der Nabengröße (Benigni, 2017)

Der Außendurchmesser der Unit 9 der Wasserkraftanlage Wanapum beträgt 7,24m. Dieser wird mit den zuvor erhaltenen Faktoren von 0,41, 0,45 und 0,52 multipliziert.

In Tabelle 5-6 sind die Ergebnisse für den berechneten Nabendurchmesser dargestellt.

Tabelle 5-6: Beispiel Nabendurchmesser Wanapum

Außendurchmesser [m]	Verhältnis [-]	Nabendurchmesser [m]
7,24	0,41	2,97
7,24	0,45	3,26
7,24	0,52	3,76

Die Ergebnisse für den Außendurchmesser bei der Berechnung der Nabe unterscheiden sich dabei maximal um 79cm. Verwendet man als Basis den Außendurchmesser von 7,24m so ist der Unterschied ca. 11%.

Der Einfluss dieses Unterschieds auf die *Bladestrike* Wahrscheinlichkeit wird in Kapitel 6.1.2 behandelt.

## 5.2 Weiterführende Modelle

Bei den weiterführenden Modellen wird in Kapitel 5.2.1 die Dicke der Schaufelkante behandelt und mit dem Ergebnis daraus wird ein Verhältnis von Fischlänge und Dicke der Schaufelkante zur Überlebenswahrscheinlichkeit dargestellt.

### 5.2.1 Dicke der Schaufelkante

Da in den vorhandenen Daten keine Informationen über die Schaufelkantenbreite während der Versuche vorhanden sind, mussten diese berechnet werden.

Als erster Schritt wurden an sechs verschiedenen Turbinen die Querschnitte untersucht. Dabei handelt es sich um die Breite der Schaufelkante der Turbine, welche von den folgenden zwei Parametern stark abhängig ist:

- Die Größe des Schaufelrades und damit die Größe der Turbine. Dies hat vor allem bautechnische Gründe. Je größer die Turbine, desto größer ist das Schaufelrad und desto dicker die Schaufelradkante.
- Die Entfernung der gemessenen Breite von der Nabe. Im Allgemeinen gilt, je näher bei der Nabe, desto dicker ist die Schaufelradkante.

Für einen Vergleich der Profile werden die unterschiedlichen Schaufelkantendicken und der Durchmesser in der folgenden Abbildung 25 dargestellt.

Aufgrund der Sensibilität der Daten werden keine Daten oder auch keine Namen der Turbinen genannt. Darum werden diese mit Schaufel 1-6 bezeichnet.

Die Berechnungen der Breite erfolgen in drei Abständen von der Achse (siehe Abbildung 15). Die Zahlen in den Klammern geben dabei den relativen Abstand zur Achse an. Dabei steht 0,000 für die Achse und 1,000 für einen Punkt am Außendurchmesser:

- bei der Nabe (0,406-0,427)
- in der Mitte zwischen Nabe und Außendurchmesser (0,703-0,714)

- beim Außendurchmesser (1,000)

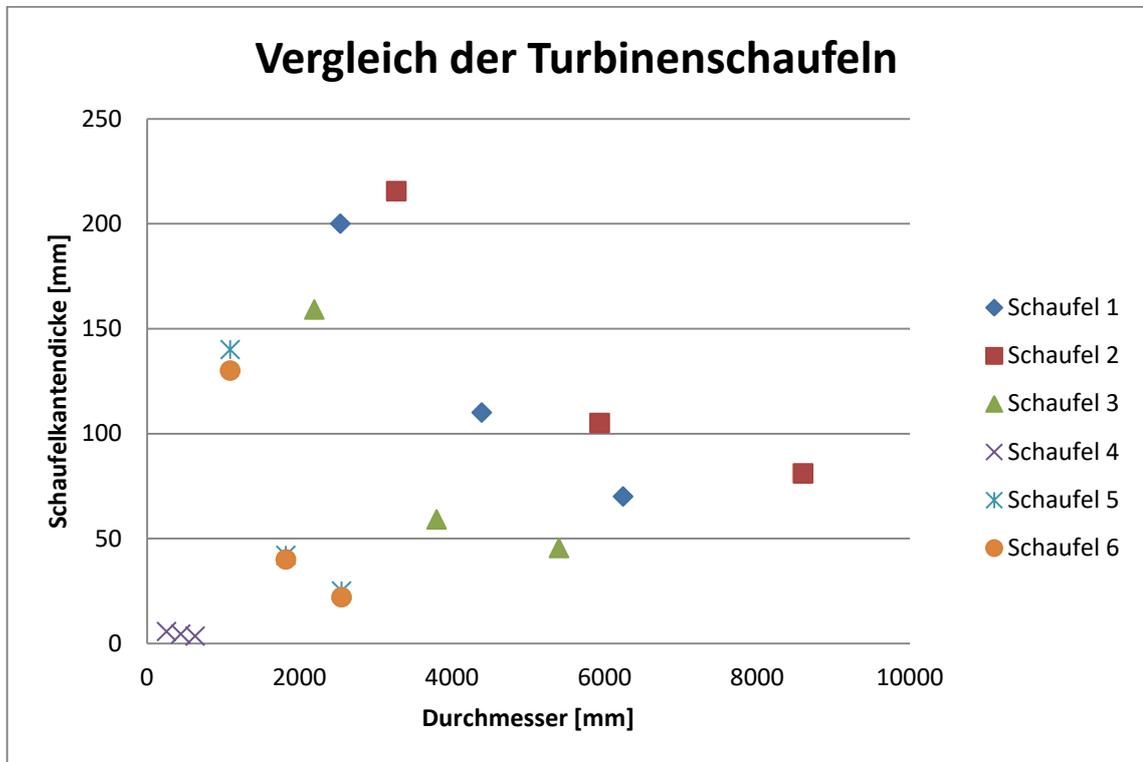


Abbildung 25.: Vergleich der Turbinenschaufeln

Aus der Abbildung 25 ist ersichtlich, dass die Größen der Schaufeln zwar unterschiedlich sind, jedoch die Breite über die Länge ein sehr ähnliches Verhältnis der einzelnen Turbinen aufweisen. Dies ist dadurch zu erkennen, dass die Verbindung der einzelnen Werte für die Schaufeln nicht linear ist sondern eher mit einer Kurve angenähert werden kann.

Dieses Verhältnis wurde von Dr. Walter Reckendorfer mit einer empirischen Formel angenähert. Diese lautet wie folgt:

$$B = 406,00589 * \text{relP}^2 - 77605873 * \text{relP} + 0,01027 * D_{\text{tip}} + 366,28233 \quad (5-1)$$

Definition der Variablen:

- B: Breite der Schaufelkante [mm]

- relP: Die relative Position von der Außenkante den Nabe [-]
- $D_{\text{tip}}$ : Außenraddurchmesser der Turbine [mm]

In Abbildung 26 sind die Ergebnisse der Berechnung im Vergleich mit den gemessenen Schaufelradkantenbreiten von den Turbinen dargestellt.

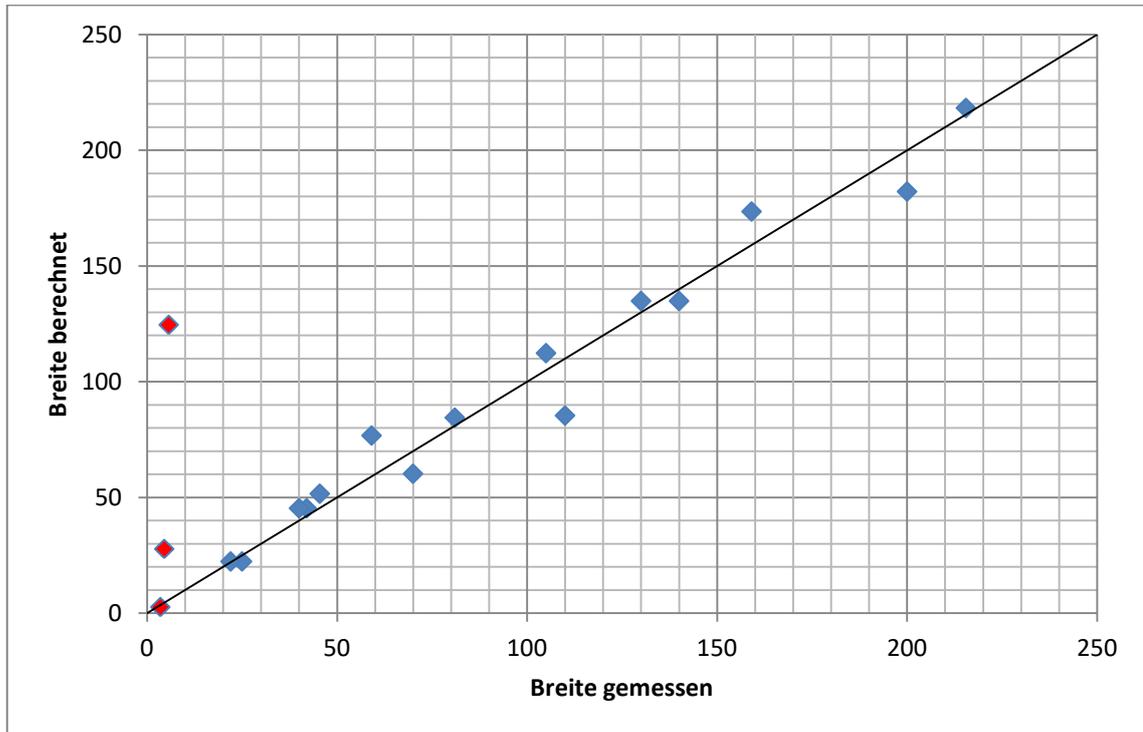


Abbildung 26: Verhältnis von berechneter zu gemessener Schaufelradkantenbreite

Es ist ersichtlich, dass die berechneten Werte mit den tatsächlichen Werten für die Breite der Schaufelradkante bei den fünf großen Turbinen sehr gut übereinstimmen. Dies bedeutet eine gute Abbildung der Realität mit der Formel. Jedoch bei der kleinen Turbine (mit einem Außendurchmesser von 63cm) liefert diese Formel kein zufriedenstellendes Ergebnis. Dies zeigt sich an den drei linken Punkte, die rot markiert sind.

Die größeren Turbinen, welche die Formel gut beschreibt, werden auch bei dem *qualitativen Datensatz* (Kapitel 4.1) verwendet. Somit ist die Berechnung ausreichend für weitere Untersuchungen.

### 5.2.2 LT-Verhältnis

Das LT-Verhältnis, wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben, ist das Verhältnis von Fischlänge zur Breite der Schaufelkante. Grund für die Berechnung ist die Theorie, dass ein kleiner Fisch bei einer breiten Schaufelkante eher bei der Turbine vorbei gedrückt wird und die Wahrscheinlichkeit für einen größeren Fisch bei einer schmalen Kante größer ist, durch einen Schlag verletzt zu werden.

In Abbildung 27 ist das L zu T Verhältnis mit einem Teil des *qualitativen Datensatzes* (Kapitel 4.1) dargestellt. Dabei wurden nur salmoniden Fischarten in Betracht gezogen. Grund dafür ist die unterschiedliche Verletzbarkeit bei verschiedenen Fischarten, wie in Kapitel 4.3.3 beschrieben. Die Daten sind wiederum anonymisiert.

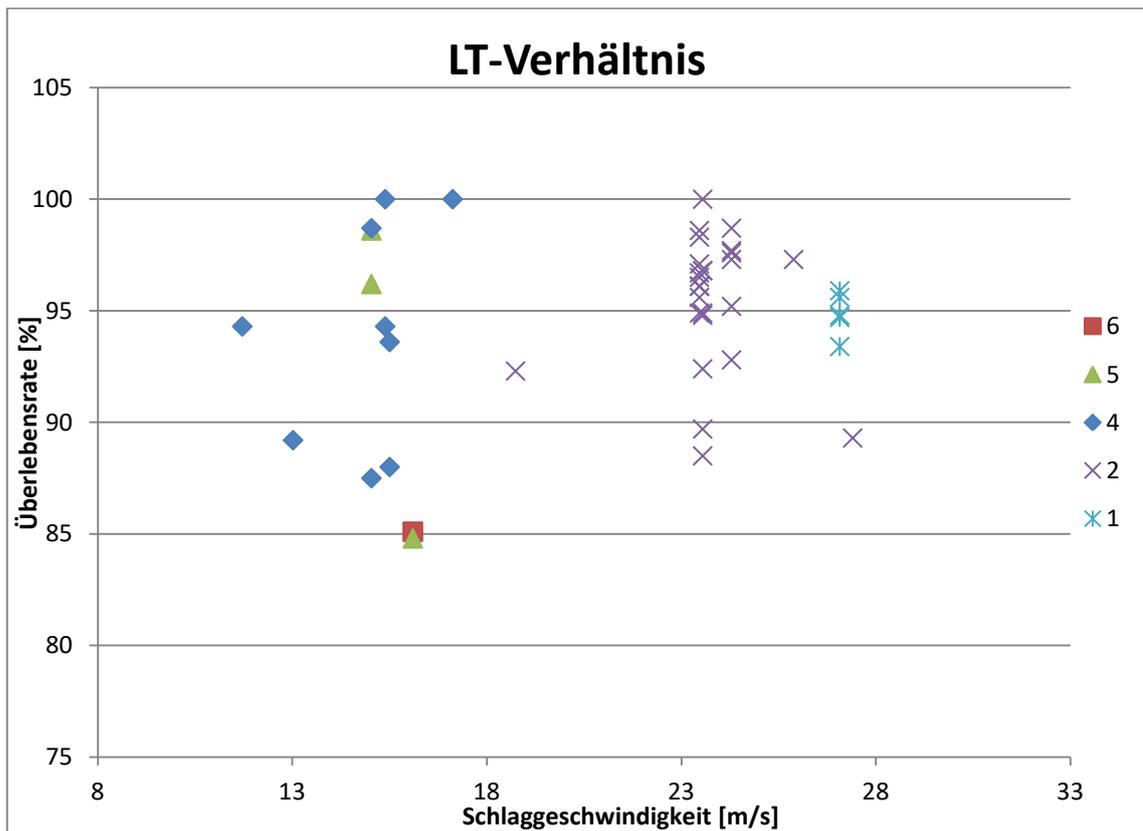


Abbildung 27: LT-Verhältnis bei Salmoniden

In Abbildung 27 ist bei verschiedenen LT-Verhältnissen die Überlebensrate zur Schlaggeschwindigkeit dargestellt. Die Schlaggeschwindigkeit wurde dabei mit der Umdrehungsgeschwindigkeit (rpm) und der Breite bei einem mittleren Ab-

stand zur Nabe berechnet. Die Verhältnisse von Länge des Fisches zu Breite der Schaufelkante wurden berechnet und anschließend auf ganze Zahlen gerundet. Die Ergebnisse für die LT-Verhältnisse sind eins bis sechs. Die Fischlänge ist dabei eine bekannte Größe aus der Datengrundlage. Die Breite der Schaufelkante wurde, wie in Kapitel 5.2.1 angeführt, berechnet.

Mit den in Abbildung 27 dargestellten Ergebnissen kann kein Zusammenhang zwischen der Schlaggeschwindigkeit und der Überlebensrate definiert werden, wie in Kapitel 3.2.3 angeführt. Ein möglicher Grund dafür ist, dass die Schlaggeschwindigkeit bei den Versuchen über 15m/s liegt und diese Geschwindigkeit zu hoch ist, um an den Schlagkanten vorbeigedrückt zu werden und somit keinen tödlichen Schlag abzubekommen.

## 6. Auswertung

In diesem Kapitel werden zuerst der Einfluss des Winkels  $\theta$  und anschließend der Einfluss der Nabengröße für die Grundformel der *Bladestrike* Theorie untersucht. Im zweiten Abschnitt (Kapitel 6.2) wird der *Mutilation Ratio* von Von Raben (1957) und Turnpenny (2000) mit den Berechnungen verifiziert.

Im Anschluss werden an den Wasserkraftanlagen, an denen die Versuche der TU-Graz durchgeführt wurden, *Bladestrike*-Berechnungen durchgeführt. Die aus den Berechnungen erhaltenen Ergebnisse werden danach mit den Ergebnissen der Versuche verglichen und auf Übereinstimmungen hin untersucht.

### 6.1 Grundmodell

In diesem Kapitel werden die *Bladestrike* Berechnung mit unterschiedlichen Winkeln und Nabengrößen durchgeführt und anhand des Einflusses der Eingangsparameter auf die Ergebnisse dargestellt.

Die folgenden Ergebnisse der Berechnungen werden mit „Trefferwahrscheinlichkeit ohne MR“ bezeichnet. Diese Bezeichnung wird gewählt, da damit nur die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fisch getroffen wird, dargestellt wird, jedoch nicht, ob dieser Treffer auch eine Verletzung hervorruft. Dies kann erst durch die Berücksichtigung des *Mutilation Ratio*, (Kapitel 3.2.2) erfolgen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Ergebnisse nicht mit der Überlebenswahrscheinlichkeit aus den Versuchen übereinstimmen, da diese die Überlebenswahrscheinlichkeit darstellen.

Für die Berechnung der Überlebenswahrscheinlichkeit müssen diese Ergebnisse mit dem *Mutilation Ratio* weiter berechnet werden.

#### **Einteilung der Werte (Eingangsparameter der *Bladestrike*-Formel)**

In den folgenden zwei Kapiteln werden jeweils je Kapitel bekannte Größen und berechnete Größen unterschiedlich definiert. Damit wird darauf Bedacht genommen, dass der Einfluss auf die Ergebnisse nur von einem Wert abhängig ist.

### *Bekannte Größen*

Als bekannte Größen werden jene Parameter bezeichnet, die in der Datenbank (Kapitel 4.1) bekannt sind, oder Parameter, welche einen fixen Zahlenwert zugewiesen bekommen, um deren Einfluss auf die Ergebnisse zu eliminieren. Beispiele für einen fixen Wert wären der aktuelle Durchfluss oder die Länge der Fische bei den Versuchen (beiden als Werte in der Datenbank vorhanden).

Um die Ergebnisse der Berechnungen mit den Versuchen aus der Datenbank zu vergleichen, wird auch ein fixer *Mutilation Ratio* verwendet. Dabei wird jener von Von Raben mit 43% ausgewählt. Die detaillierten Berechnungen mit dem *Mutilation Ratio* und Ergebnisse dazu sind in Kapitel 6.2 beschrieben.

### *Berechnete Größen*

Die Werte in dieser Gruppe sind berechnete oder nicht bekannte Daten, welche für die *Bladestrike*-Berechnungen notwendig sind und nicht bei den Versuchen angegeben sind. Beispiele dafür sind die Nabengröße der Turbinen oder der Winkel des Wassergeschwindigkeitsvektors zur Nabenachse. Diese Werte werden je nach Kapitel variiert. Es wird je Kapitel immer nur eine Größe definiert, damit genau auf deren Einfluss eine Schlussfolgerung gezogen werden kann.

#### *6.1.1 Einfluss des Winkels auf die Bladestrike-Berechnungen*

In den vorherigen Kapiteln (4.2.1, 5.1.1) wurde schon dargestellt, wie der Winkel zwischen Wassergeschwindigkeitsvektor und Schaufelradachse berechnet werden kann. Um nun zu erkennen, wie groß oder wie klein der Einfluss des Winkels auf die Ergebnisse ist, werden in diesem Kapitel Berechnungen mit verschiedenen Winkeln (30°, 40°, 50°) sowie den berechneten Winkeln (Kapitel 4.2.1) durchgeführt.

### **Einteilung**

**Bekannte Größen:** In der Grundformel werden alle Werte fix angenommen außer der Winkel zwischen dem Wassergeschwindigkeitsvektor und der Schaufelradachse. Somit wären die fixen Werte: der Durchfluss  $Q$ , die

Fischlänge  $l$ , die Umdrehungszahl  $N$ , die durchströmte Fläche  $A_{TH}$  und die Anzahl der Schaufeln  $n$ .

Berechnete Größen: Als berechnete Größe wird der Winkel zwischen dem Wassergeschwindigkeitsvektor und der Schaufelradachse  $\theta$  angenommen. Dieser Winkel wird mit  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $50^\circ$  und berechnetem Grad (Berechnung siehe Kapitel 4.2.1) angenommen.

## Berechnung

Für die Berechnung der Zwischenergebnisse der *Bladestrike* Wahrscheinlichkeit wird die Formel 2-5 verwendet. Dargestellt werden die Ergebnisse anhand der repräsentativen Wasserkraftanlage Wanapum (Kapitel 4.1)

In Abbildung 28 sind bei acht Versuchen an der Wasserkraftanlage Wanapum die Zwischenergebnisse der *Bladestrike* Berechnung dargestellt. Dabei wurden die Berechnungen mit drei unterschiedlichen Winkeln durchgeführt.

Generell gilt: je größer der gewählte Winkel, desto kleiner die Trefferwahrscheinlichkeit.

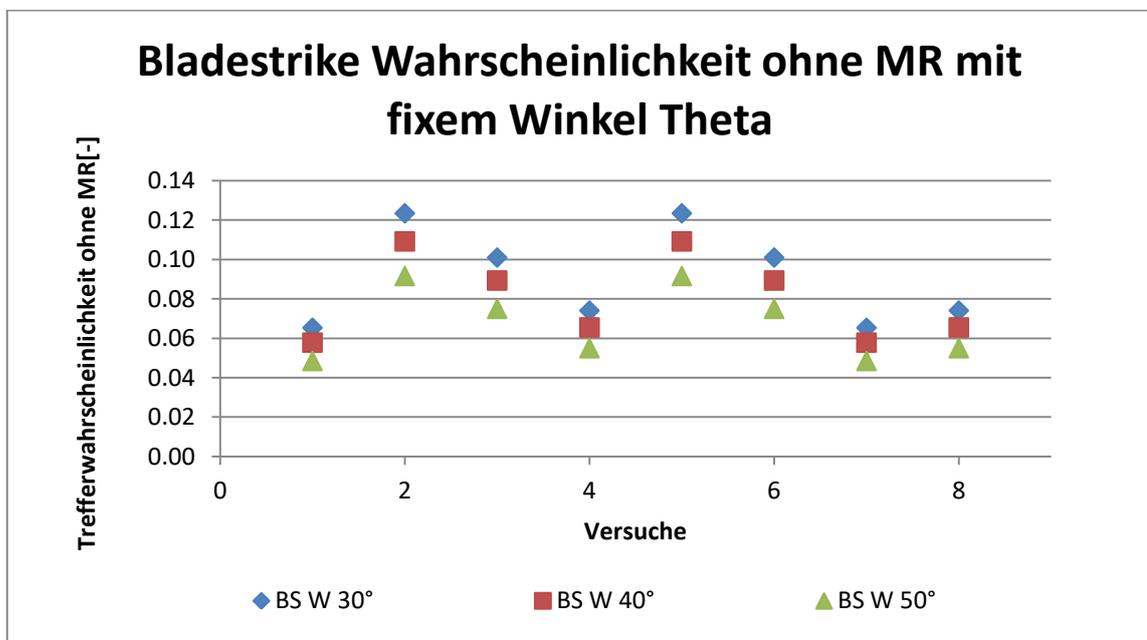


Abbildung 28: Variation mit fixem Winkel

In der Tabelle 6-1 wird der Versuch Nummer sechs als Referenz für die Berechnung herangezogen. Dieser Versuch wurde gewählt, da diese Berechnungen repräsentativ für den gesamten Datensatz sind. Die Ergebnisse werden nach der Darstellung der variablen Winkel diskutiert.

Die Bezeichnung dieses Versuchs Nummer sechs ist in der qualitativen Datengrundlage (Anhang) angeführt: Versuch Nr. 230 Wanapum.

Tabelle 6-1: Trefferwahrscheinlichkeit ohne MR fixer Winkel

Winkel [°]	Trefferwahrscheinlichkeit ohne MR [-]	Unterschied Gesamt [-]
30	0,101	0,026
40	0,089	
50	0,075	

Der Unterschied Gesamt ist der maximale Unterschied zwischen Trefferwahrscheinlichkeit ohne MR bei den *Bladestrike* Berechnungen und den vorhin erwähnten unterschiedlichen berechneten Eingangsgrößen.

Im nächsten Schritt werden die Zwischenergebnisse mit berechneten Winkeln gezeigt.

Die Berechnung wurde wie in Abbildung 15 beschrieben an drei Punkten durchgeführt.

- Wr: bei der Nabe
- Wm: in der Mitte zwischen Nabe und Außendurchmesser
- WR: beim Außendurchmesser

In Abbildung 29 sind die Ergebnisse mit den berechneten Winkeln dargestellt. Die berechneten Winkel liegen in einem Bereich zwischen 25,82° und 65,17°, je nach Ort und Versuch.

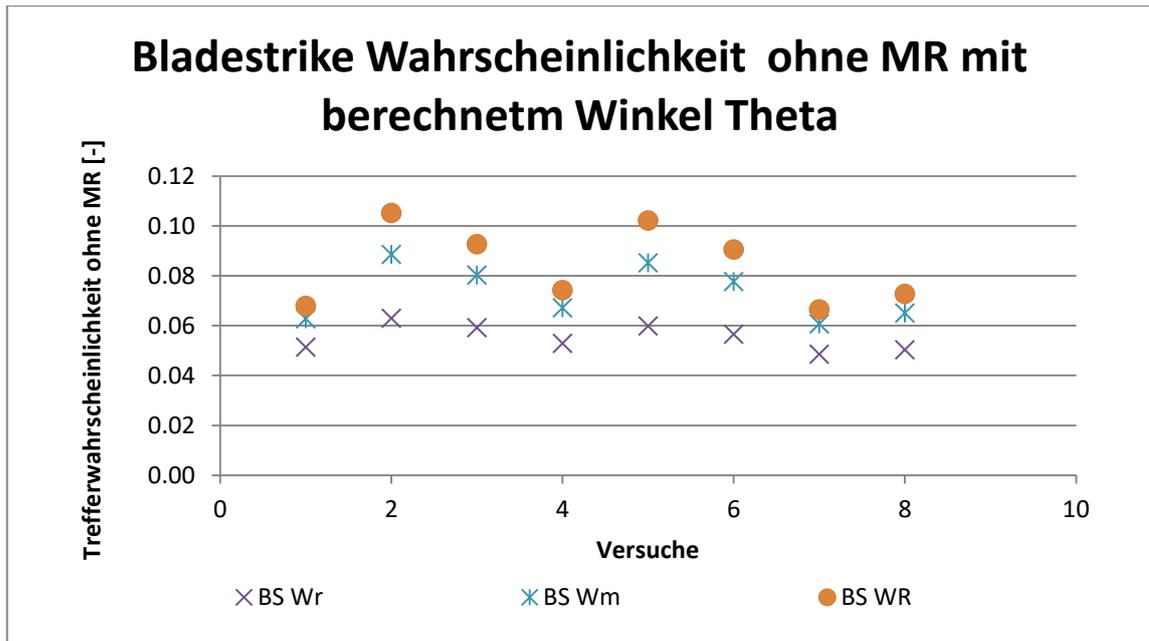


Abbildung 29: Variation mit berechnetem Winkel

Um die Ergebnisse zu vergleichen, wird wie beim fixen Winkel der Versuch Nummer sechs in der folgenden Tabelle dargestellt. Die Unterschiede der Ergebnisse in Tabelle 6-2 sind größer als in Tabelle 6-1. Aus diesem Grund wird in weiterer Folge die Überlebensrate mit den Ergebnissen aus den berechneten Winkeln berechnet und mit den Ergebnissen aus den Versuchen verglichen.

Tabelle 6-2: Zwischenergebnisse Bladestrike berechneter Winkel

Winkel [°]	Trefferwahrscheinlichkeit ohne MR [-]	Unterschied Gesamt [-]
39,06	0,091	0,034
48,22	0,078	
60,99	0,057	

### Vergleich der Überlebensraten

Vergleicht man nun die berechneten Daten mit denen aus den Versuchen, muss zuerst die Überlebenswahrscheinlichkeit berechnet werden. In diesem Fall wurde der *Mutilation Ratio* von Von Raben mit 43% gewählt.

In Abbildung 30 werden die Ergebnisse der Lebendfischversuche aufgezeigt und den Berechnungen gegenübergestellt. Für die Übersichtlichkeit werden nur die Ergebnisse mit dem größten Unterschied aufgelistet. Diese wären die Ergebnisse mit dem berechneten Winkel bei der Nabe und dem berechneten Winkel beim Außendurchmesser.

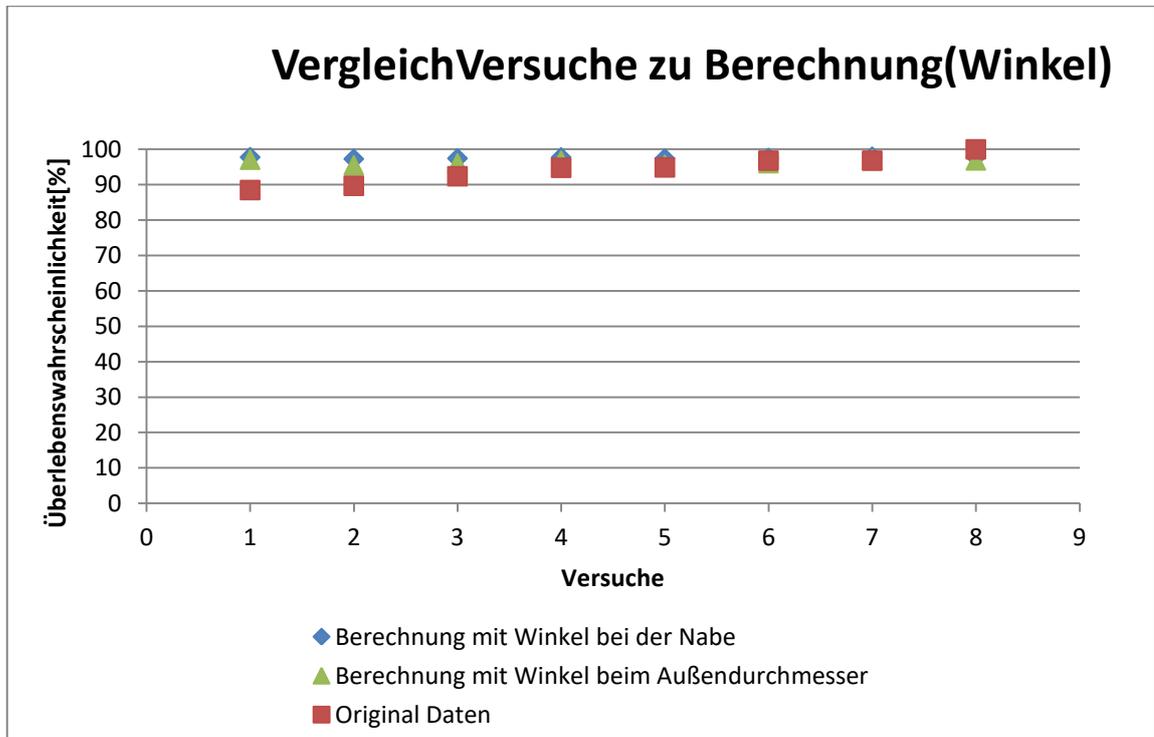


Abbildung 30: Vergleich Versuche zu Berechnung (Winkel)

Für den Vergleich der Ergebnisse werden die Versuche Nummer eins und sechs in der folgenden Tabelle herangezogen. Der Versuch Nummer eins wurde wegen des größten Unterschieds zwischen der Berechnung und den Daten aus den Lebendfischversuchen gewählt, der Versuch Nummer sechs wegen der Vergleichbarkeit mit den in Tabelle 6-1 und Tabelle 6-2 dargestellten Ergebnissen. Die Bezeichnung dieses Versuchs Nummer eins ist in der qualitativen Datengrundlage (Anhang) angeführt: Versuch Nr. 225 Wanapum.

Bei der Berechnung des Unterschieds wurden jeweils die grau hinterlegten und verbundenen Zellen miteinander verglichen. Besteht diese Verbindung über drei Zellen wurden jeweils der oberste und unterste Eintrag verglichen.

Tabelle 6-3: Vergleich Berechnung mit Versuchen

Ver- such Num- mer	Art	Überlebens- rate [%]	Unterschied (Berechnun- gen) [%]	Unter- schied (Versuch- Berech- nung) [%]	Unter- schied (Versuch- Berech- nung) [%]
1	Berechnung mit Winkel 25,82°	97,08	0,71	8,58	9,29
1	Berechnung mit Winkel 47,08°	97,79			
1	Lebendfischver- suche	88,5			
6	Berechnung mit Winkel 39,06°	96,11	1,46	0,69	0,77
6	Berechnung mit Winkel 60,99°	97,57			
6	Lebendfischver- suche	96,8			

Der maximale Einfluss des Winkels bei den Ergebnissen ist bei den Beispielen gering und liegt bei maximal 1,46%. Der maximale Unterschied der Berechnung zu den Lebendfischversuchen ist dabei mit 9,29% wesentlich höher.

Dies wird anhand eines Beispiels des Versuches Nummer eins nochmals deutlich.

Bei der Berechnung des Unterschieds werden die jeweils übereinanderliegenden Einträge miteinander verglichen. Zum Beispiel: die Berechnung mit dem Winkel von 30° und die Berechnung mit dem Winkel von 40° unterscheiden sich um 0,70% bzw. nach Abminderung mit dem *Mutilation Ratio* um 0,33%.

Die tatsächliche Überlebensrate (aus dem qualitativen Datensatz) ist wie in der letzten Zeile 88,50%. Die Streuung der Berechnungen liegt im Rahmen zwischen 97,08% und 97,91%.

Tabelle 6-4: Beispiel Unterschied Winkel

Winkel	Blade Strike Wahrscheinlichkeit [P] ohne MR	Unterschied	Überlebensrate mit MR [%] (Von Raben 43%)	Unterschied
30°	0,065	-	97,19	-
40°	0,058	0,7%	97,51	0,33%
50°	0,048	1,0%	97,91	0,41%
WR 25,82°	0,068	-	97,08	-
Wm 33,72°	0,063	0,5%	97,30	0,23%
Wr 47,08°	0,051	1,2%	97,79	0,50%
Versuch	-	-	88,50	-

Aufgrund der geringen Abweichung bei den Berechnungen mit unterschiedlichen Winkeln kann dieser, wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, in der Mitte berechnet werden ohne einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse zu erhalten.

### 6.1.2 Einfluss der Nabengröße auf die Bladestrike-Berechnung

Auch für dieses Kapitel werden zuerst die bekannten und berechneten Größen definiert. Weiters werden danach *Bladestrike* Berechnungen durchgeführt, um den Einfluss der Eingangsparameter auf die Ergebnisse zu erhalten.

### Einteilung

Bekannte Größen: In der Grundformel werden alle Größen fix angenommen, außer die Größe der Nabe. Somit wären die bekannten Größen: der Durchfluss  $Q$ , die Fischlänge  $l$ , die Umdrehungszahl  $N$ , der Winkel des Wasservektors auf die Schaufelachse  $\theta$  und die Anzahl der Schaufeln  $n$ . Um die Ergebnisse zu vergleichen, wird auch ein fixer *Mutilation Ratio* verwendet. Dabei wird jener von Von Raben mit 43% ausgewählt.

Berechnete Größen: Als berechnete Größe wird die Größe der Nabe angenommen, welche einen direkten Einfluss auf die durchströmte Fläche  $A_{TH}$  hat. Die Werte, werden dabei wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben, in einem Bereich von 0,41 bis 0,52 untersucht.

Für eine Vergleichbarkeit wurde in diesem Abschnitt dieselbe Wasserkraftanlage Wanapum für die Darstellung der Daten/Ergebnisse herangezogen.

### Berechnung

Im ersten Vergleich wird der Winkel des Wasservektors mit  $35^\circ$  angenommen und die *Bladestrike* Wahrscheinlichkeit wird mit einem Nabenverhältnis von 0,41, 0,45 und 0,52 (Kapitel 4.2.2) berechnet.

Anhand der Abbildung 31 ist zu erkennen, dass bei einem geringeren Verhältnis von Nabe zu Außendurchmesser die Trefferwahrscheinlichkeit höher ist.

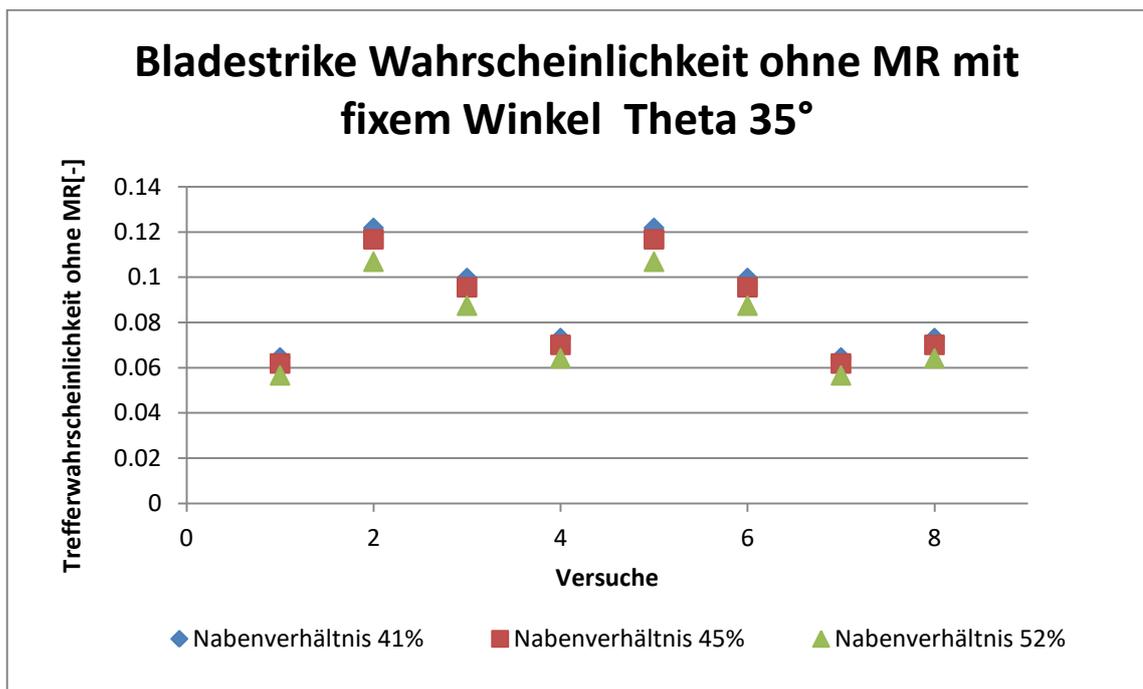


Abbildung 31: Unterschiedliche Nabengrößen Winkel fix

Für die Vergleichbarkeit wird auch in Tabelle 6-5 der Versuch Nummer sechs ausgewählt und dargestellt. Der Unterschied Gesamt ist der Vergleich der größten mit der kleinsten Trefferwahrscheinlichkeit.

Tabelle 6-5: Trefferwahrscheinlichkeit ohne MR Nebenverhältnis Winkel fix

Nebenverhältnis [-]	Trefferwahrscheinlichkeit ohne MR [-]	Unterschied Gesamt [-]
0,41	0,100	0,013
0,45	0,096	
0,52	0,087	

Bei einem Vergleich der Werte mit den Angaben in Tabelle 6-1 (welche denselben Versuch zeigen, jedoch mit dem Winkel als variabler Wert) ist festzustellen, dass die Abweichungen um ein Drittel geringer sind.

Im nächsten Schritt wird diese Berechnung nochmalig durchgeführt. Dabei wird jedoch der Winkel  $\theta$  nicht mit  $35^\circ$  angenommen, sondern wie in Kapitel 4.2.1 in der Mitte berechnet. Der Winkel nimmt dabei Werte von  $23,88^\circ$  bis  $45,41^\circ$  an.

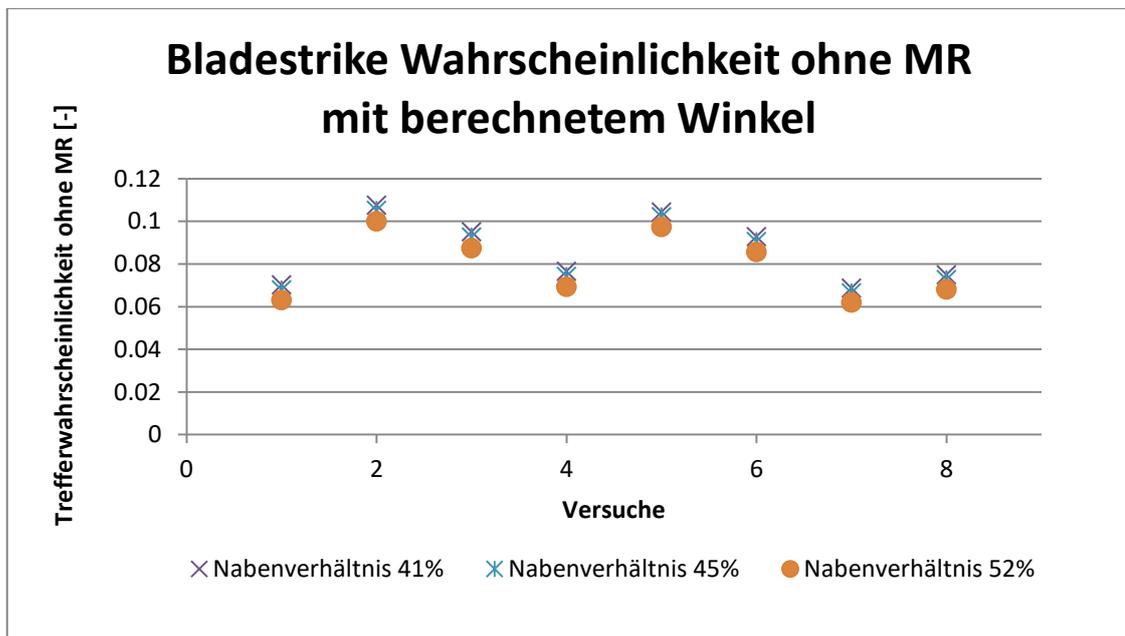


Abbildung 32: Unterscheidung Nabengröße Winkel berechnet

Die in Tabelle 6-5 berechneten Unterschiede der Ergebnisse sind dabei um die Hälfte kleiner als jene mit dem fixen Winkel. Wie in den aufgelisteten Tabellen (Tabelle 6-1, Tabelle 6-2) ist auch in dieser Aufstellung der repräsentative Versuch Nummer sechs ausgewählt worden.

Tabelle 6-6: Trefferwahrscheinlichkeit ohne MR Nabenverhältnis Winkel berechnet

Nabenverhältnis [-]	Trefferwahrscheinlichkeit ohne MR [-]	Unterschied Gesamt [-]
0,41	0,093	0,007
0,45	0,091	
0,52	0,086	

Der Einfluss des unterschiedlichen Nabenverhältnisses mit berechneten Winkeln auf die Trefferwahrscheinlichkeit ohne MR der *Bladestrike* Berechnung ist geringer als jener mit den fixen Winkeln.

### Einfluss auf die Überlebensrate

Für die Berechnungen der *Bladestrike* Wahrscheinlichkeit werden die Trefferwahrscheinlichkeit ohne MR mit dem *Mutilation Ratio* nach Von Raben multipliziert. Damit wird die Überlebenswahrscheinlichkeit berechnet.

Wie in Kapitel 6.1.2 behandelt, sind die Abweichungen bei einem berechneten Winkel  $\theta$  geringer als mit einem fixen Winkel  $\theta$  (siehe Tabelle 6-5 und Tabelle 6-6). Deswegen werden in Abbildung 33 die Versuche mit den größeren Abweichungen (den fixen Werten für den Winkel) den Lebendfischversuchen gegenübergestellt.

Für eine übersichtliche Darstellung der Ergebnisse der Überlebensraten werden die Berechnungen bei einem Nabenverhältnis von 0,41 und 0,52, mit den Ergebnissen der Lebendfischversuche verglichen. (Der Versuch mit dem Verhältnis von 0,45 wurde nicht dargestellt).

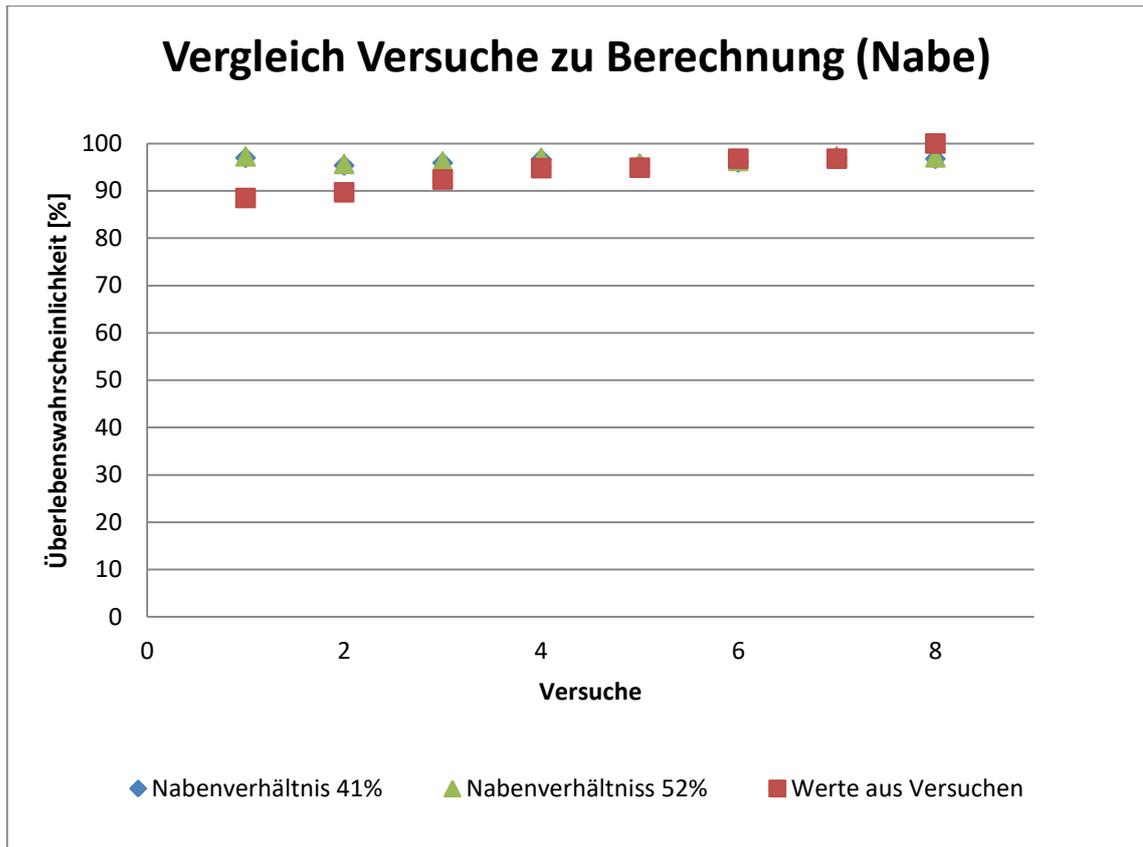


Abbildung 33: Vergleich Versuche zu Berechnung (Nabenverhältnis)

In Abbildung 33 ist ersichtlich, dass die Abweichungen der berechneten Werte zu den Werten aus den Lebendfischversuchen (der qualitativen Datengrundlage) deutlich größer sind als die Unterschiede bei den unterschiedlichen Naben zu Außendurchmesser-Verhältnissen. Des Weiteren sind die Abweichungen geringer als in Kapitel 6.1.1.

Daraus kann Folgendes abgeleitet werden: Der Unterschied bei den einzelnen Verhältnissen des Nabendurchmessers zum Außendurchmesser ist so gering, dass ein mittleres Verhältnis von 0,45 angenommen werden kann, ohne eine signifikante Auswirkung auf die Ergebnisse der Berechnungen zu erhalten.

Tabelle 6-7 zeigt eine Zusammenfassung anhand eines Beispiels mit den unterschiedlichen Werten bei einem Verhältnis von 0,41, 0,45 und 0,52.

Beispiel: Versuch NR. 225 Wanapum. (Nummer Eins)

Tabelle 6-7: Beispiel unterschied Nabendurchmesser

Verhältniss Nabe zu Außendurchmesser	Blade Strike Wahrscheinlichkeit [P] ohne Abminderung	Unterschied	Überlebensrate mit Von Raben Abminderung von 43%	Unterschied
0,41	0,0645	-	0,972	-
0,45	0,0618	4%	0,973	0,12%
0,52	0,0565	9%	0,976	0,23%

Aufgrund der in Kapitel 6.1 gewonnenen Erkenntnissen kann zusammengefasst werden:

- Der Einfluss des Winkels
- Der Einfluss der Nabe

ist nicht groß genug, um bei einer mittleren Annahme/ berechneten Größe einen signifikanten Unterschied bei den Auswirkungen auf die Ergebnisse der *Bladestrike* Modelle zu bewirken.

## 6.2 Mutilation Ratio

In diesem Kapitel wird die Anpassung der *Bladestrike* Grundformel (Kapitel 3.1) mit Hilfe des *Mutilation Ratio* (Kapitel 3.2.2) behandelt. Dabei werden zwei Arten der Anpassung (Von Raben 1957 und Turnpenny 1992) untersucht und mit den vorhandenen Daten (Kapitel 4.1) abgeglichen.

Im ersten Abschnitt (Kapitel 6.2.1) wird der *Mutilation Ratio* mit dem Modell nach Von Raben (1957) behandelt und anschließend im zweiten Abschnitt (Kapitel 6.2.2) das Modell nach Turnpenny (1992). Im dritten Abschnitt dieses Kapitels (Kapitel 6.2.3) werden diese miteinander verglichen und bewertet.

### 6.2.1 Mutilation Ratio mit Von Raben

In diesem Kapitel wird der *Mutilation Ratio* nach Von Raben erläutert und danach mit den qualitativen Daten aus Kapitel 4.1 ein neuer *Mutilation Ratio* berechnet. Eine weitere Verbesserung erfolgt durch die Berechnung weiterer artspezifischer *Mutilation Ratios*.

Das Modell nach Von Raben (1957) ist ein lineares Modell, bei dem die verschiedenen Einflussfaktoren (Beschreibung der Faktoren in Kapitel 3.2.1) mit einem linearen Faktor berücksichtigt werden. Der Faktor nach Von Raben (1957) beträgt 43 Prozent.

### Berechnung des *Mutilation Ratios* mit allen qualitativen Daten

Da aufgrund der unterschiedlichen Eingangsparameter der berechnete *Mutilation Ratio* variiert, wird dieser im Folgenden dreimal berechnet.

Bei den Berechnungen werden jeweils der Winkel und das Verhältnis der Nabe zum Außendurchmesser im Rahmen des in Kapitel 5.1.1 und Kapitel 5.1.2 aufgezeigten Bereiches variiert. Die Kombination der Eingangsparameter wurde dabei so gewählt, dass die Ergebnisse möglichst unterschiedlich sind.

In Tabelle 6-8 werden übersichtlich die Einteilung der Bezeichnungen und deren Einflussgrößen dargestellt. In der letzten Spalte ist dabei das Ergebnis des *Mutilation Ratios* als Mittelwert aller Versuche dargestellt. Abbildung 34 und Abbildung 35 zeigen die Ergebnisse der Berechnungen grafisch.

Tabelle 6-8: Übersicht Eingangsparameter für MR

Bezeichnung	Ort der Berechnung des Winkels	Verhältnis Nabe zu Außendurchmesser	Mittelwert MR
MR1	r	0,52	53%
MR2	R	0,41	35%
MR3	m	0,45	40%

Ortsbezeichnungen:

- r: bei der Nabe
- R: beim Außendurchmesser
- m: mittig zwischen Nabe und Außendurchmesser

Abbildung 34 zeigt die berechneten *Mutilation Ratios* für alle untersuchten Versuche, wobei die Berechnungen der *Mutilation Ratios* für die jeweiligen in Tabelle 6-8 dargestellten Varianten erfolgten.

Die Ergebnisse der Berechnungen variieren dabei zwischen 0% und 234%. Für die Darstellung des Ergebnisses wird in Abbildung 35 die Berechnung von MR3 als Boxplot gezeigt.

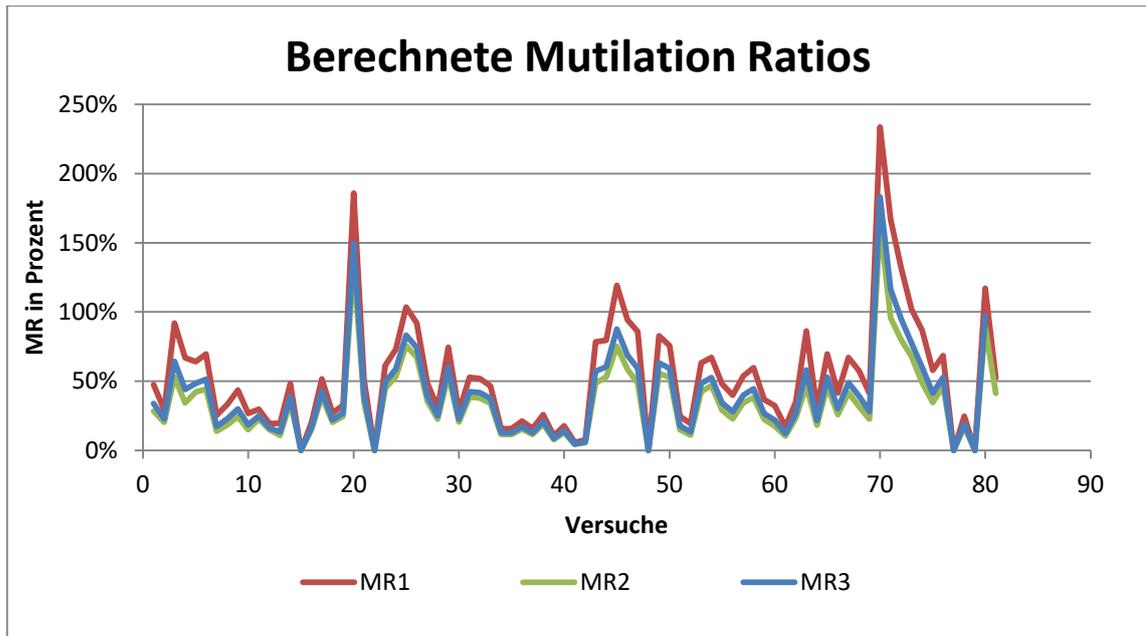


Abbildung 34: MR mit unterschiedlichen Eingangsparametern

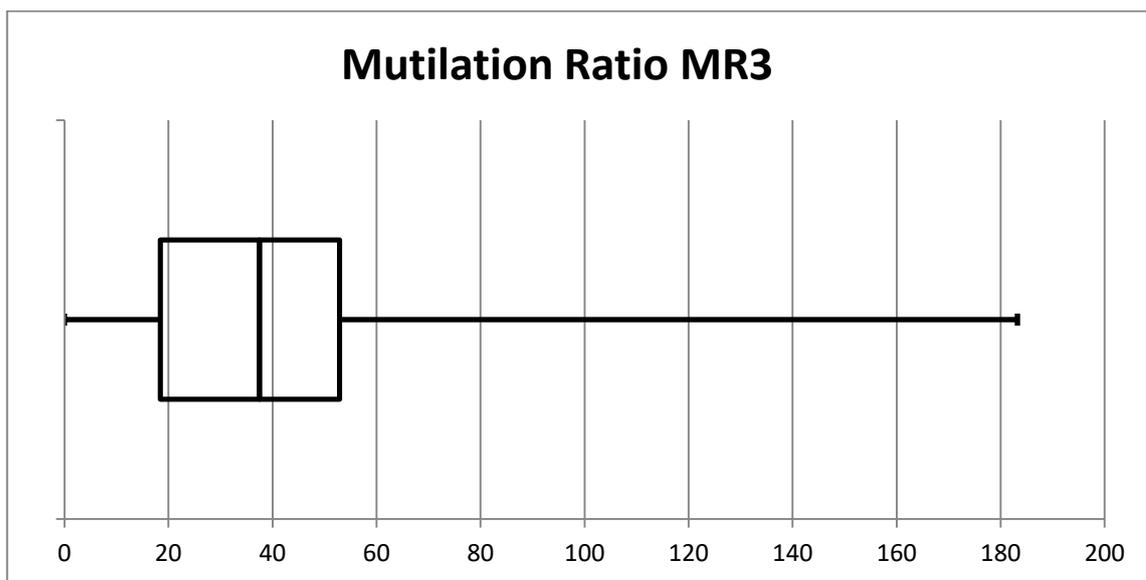


Abbildung 35: Boxplott von MR3

Bei genauerer Betrachtung der Daten und der Berechnung, wird ersichtlich, dass bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 100% bei den Lebendfischversuchen der *Mutilation Ratio* aufgrund der Berechnungsweise 0,00 wird. Dies trifft bei vier Versuchen zu. Weiters ist das Ergebnis des *Mutilation Ratios* bei fünf Berechnungen weit über 100%. Eliminiert man die oben erwähnten neun Versuche, so verändert sich das Ergebnis wie folgt:

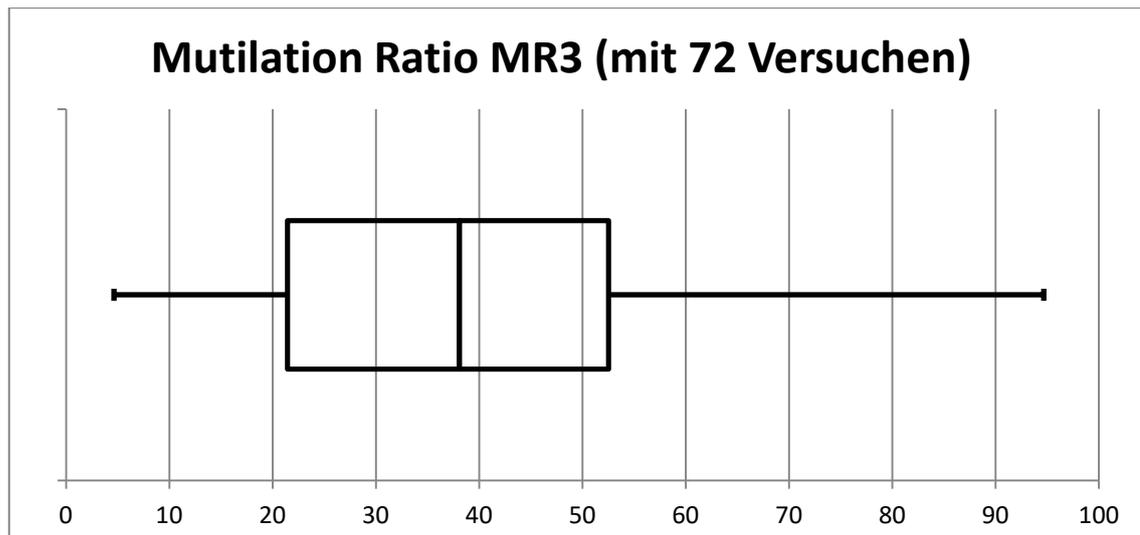


Abbildung 36: Boxplot von MR3 Datenüberprüfung

Bei den überprüften Daten im Vergleich zu den qualitativen Daten verändert sich der Median (von circa 38%) kaum. Jedoch liegt der Median mittiger im Datensatz und die Streuung der Daten ist wesentlich geringer.

Diese Ergebnisse der Berechnungen des *Mutilation Ratios* werden am Ende des Kapitels zusammengefasst und mit den Ergebnissen von Von Raben verglichen.

### Artspezifischer Mutilation Ratio

Die Versuche der Datengrundlage (Kapitel 4.1) können hinsichtlich der Fischart unterschieden werden. Die meisten Versuche wurden mit Salmoniden (Familie der Lachsfische) durchgeführt (insgesamt 42 Versuche). Diese werden aus den überprüften qualitativen Daten gefiltert und im Folgenden dargestellt:

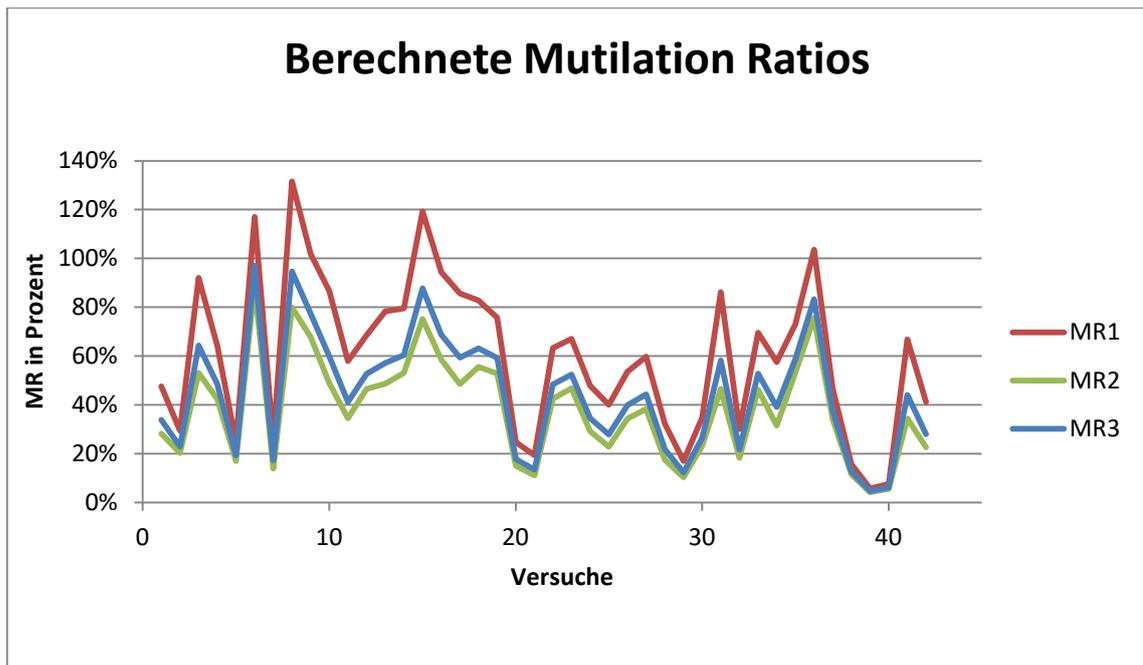


Abbildung 37: Mutilation Ratio für Salmoniden

Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-9 aufgelistet. Die berechneten Werte für den *Mutilation Ratio* sind dabei durchwegs größer als bei der Berechnung mit allen Fischarten. Auch bei diesen Versuchen wurde die Kombination der Eingangsparameter so gewählt, dass die Ergebnisse möglichst unterschiedlich ausfallen.

Tabelle 6-9: Übersicht Eingangsparameter für Mutilation Ratio Salmoniden

Bezeichnung	Ort der Berechnung des Winkels	Verhältnis Nabe zu Außendurchmesser	Mittelwert
MR1	r	0,52	60%
MR2	R	0,41	38%
MR3	m	0,45	45%

### Vergleich des Mutilation Ratios

In diesem Kapitel wurden nun mit verschiedenen Eingangsgrößen unterschiedliche *Mutilation Ratios* berechnet (mit 81 Versuchen, mit 72 Versuchen, mit Fischartspezifischen Versuchen). Diese werden übersichtlich zusammengefasst und mit dem *Mutilation Ratio* von Von Raben (1957) verglichen.

In Tabelle 6-10 sind die Mittelwerte der drei Berechnungen angeführt. Der erste Wert ist mit allen qualitativen Daten (81 Versuche) berechnet. Der zweite mit den überprüften qualitativen Daten (72 Versuche) und der dritte mit den überprüften qualitativen Daten der Salmoniden. In der Spalte Min/Max werden die minimalen und maximalen Ergebnisse des *Mutilation Ratios* mit den unterschiedlichen Eingangsparametern dargestellt.

Tabelle 6-10: Vergleich *Mutilation Ratio*

Daten	Mutilation Ratio (Mittelwert, M3)	Min/Max
Qualitativen Daten (81 Versuche)	40%	35%-53%
Überprüfte qualitativen Daten (72 Versuche)	38%	33%-50%
Überprüfte qualitativen Daten Salmonider Fische (42 Versuche)	45%	38%-60%
Von Raben (1957)	43%	-

Die Schwankungsbreite des *Mutilation Ratios* aufgrund des Einflusses der Eingangsparameter lässt den Schluss zu, dass der *Mutilation Ratio* von Von Raben mit 43% eine passende Annäherung darstellt. Dieser Wert kann bei Salmoniden etwas angehoben (auf 45%), aber bei generellen Berechnungen (keine Angabe über Fischart oder bei verschiedenen Arten) eher gesenkt werden (auf 38%-40%).

### 6.2.2 *Mutilation Ratio* mit Turnpenny

In Kapitel 6.2.2 wird der *Mutilation Ratio* nach Turnpenny (1992) beschrieben. Weiters werden Überlebensraten mit dem *Mutilation Ratios* nach Turnpenny (1992) mit den Datensätzen wie in Kapitel 6.2.1 berechnet.

Die Berechnung des *Mutilation Ratio* bei Turnpenny (1992) erfolgt über eine logarithmische Formel (Formel 2-11), in welcher die Länge des Fisches als Parameter mit einfließt.

## Berechnung mit den qualitativen Daten

Die Berechnung der Überlebensrate wird auch in diesem Abschnitt dreimal berechnet. Dabei werden die Eingangsparameter wie in Tabelle 6-8 variiert. Die Abkürzung S\_MW steht für die Auswertung der Überlebensrate bei den Lebendfischversuchen.

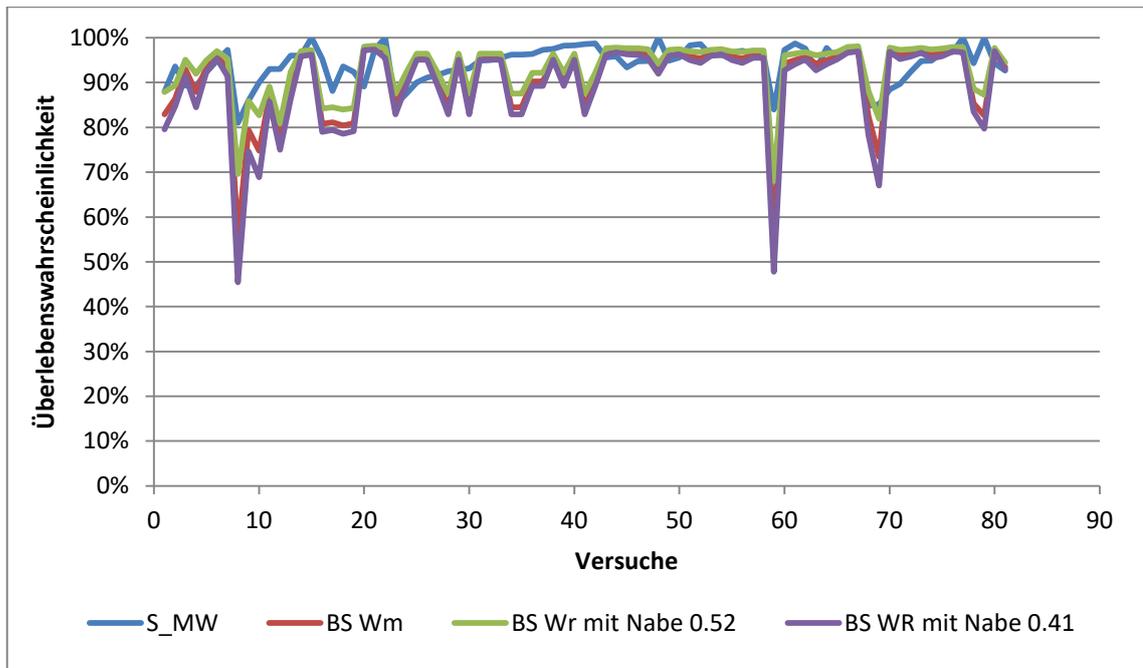


Abbildung 38: Vergleich Versuche zu Berechnungen

In Abbildung 38 ist ersichtlich, dass die Berechnungen sehr gut mit den Versuchen übereinstimmen, jedoch gibt es vereinzelt Ausreißer. Diese Ausreißer treten besonders bei Versuchen mit einer geringeren Überlebenswahrscheinlichkeit auf.

## Berechnung mit den Salmoniden

Wie bei den Berechnungen mit dem *Mutilation Ratio* von Von Raben wird in diesem Kapitel der Datensatz komprimiert (auf 42 Versuche, siehe Tabelle 6-10), um die Streuung der Ergebnisse zu minimieren. Da die Lebendfischversuche mit den Salmoniden den größten Datenstamm enthalten, werden diese herangezogen. Die Eingangsparameter sind dabei dieselben wie in den Berechnungen mit den qualitativen Daten.

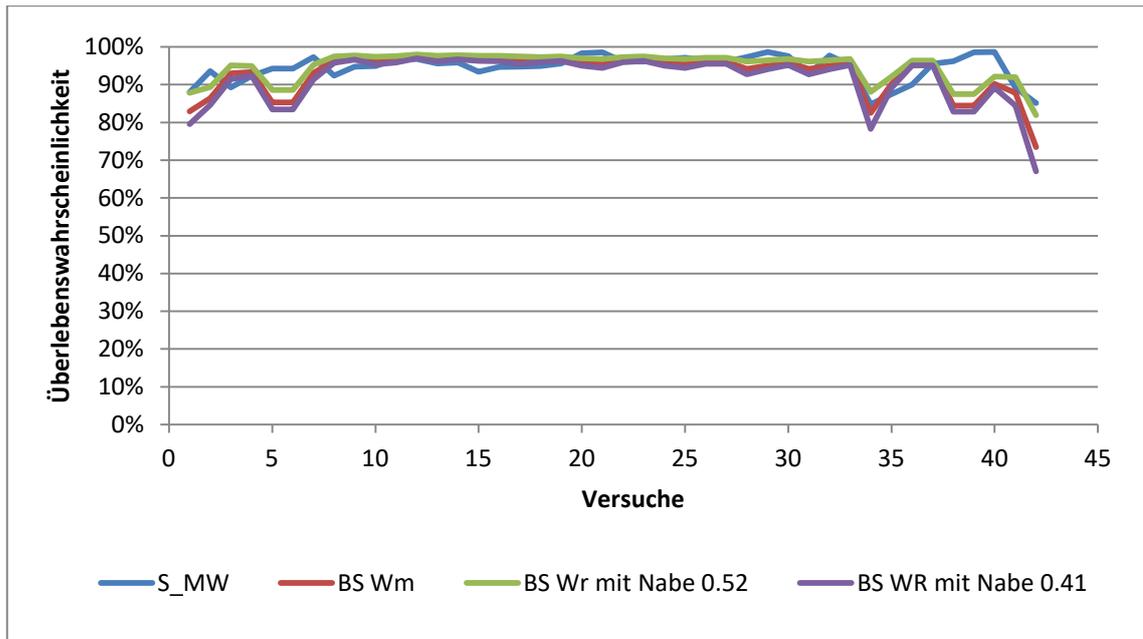


Abbildung 39: Vergleich Turnpenny nur Salmonide Fische

In Abbildung 39, die die Überlebenswahrscheinlichkeit der Salmoniden darstellt, unterscheiden sich die einzelnen Lastfälle kaum. Daraus folgt, dass die Berechnungen eine gute Annäherung an die Sterblichkeitsrate bei den Versuchen sind.

### 6.2.3 Vergleich des Mutilation Ratios von Von Raben und Turnpenny

In diesem Kapitel wird der *Mutilation Ratio* von Von Raben (1957) und Turnpenny (1992) mit den Ergebnissen der Lebendfischversuche verglichen und verifiziert.

#### Vergleich der *Mutilation Ratios* mit den qualitativen Daten

Aufgrund der in Kapitel 6.1 gezeigten geringen Einflüsse der Eingangsparameter durch die Nabe und den Winkel  $\theta$  können diese mit einer mittleren/berechneten-Größe angenommen werden.

Für das Verhältnis Naben zu Außendurchmesser wird der Mittelwert von 0,45 (Kapitel 4.2.2) verwendet und der Winkel  $\theta$  wird wie in Kapitel 4.2.1 berechnet.

In den folgenden zwei Abbildungen werden die Lebendfischversuche mit den berechneten Ergebnissen überlagert. Dabei werden die Berechnungen mit dem Mutilation Ratio von Turnpenny und von Von Raben verwendet.

In Abbildung 40 werden die Ergebnisse mit allen qualitativen Daten und in Abbildung 41 mit Salmoniden aufgezeigt.



Abbildung 40: Vergleich Von Raben/Turnpenny

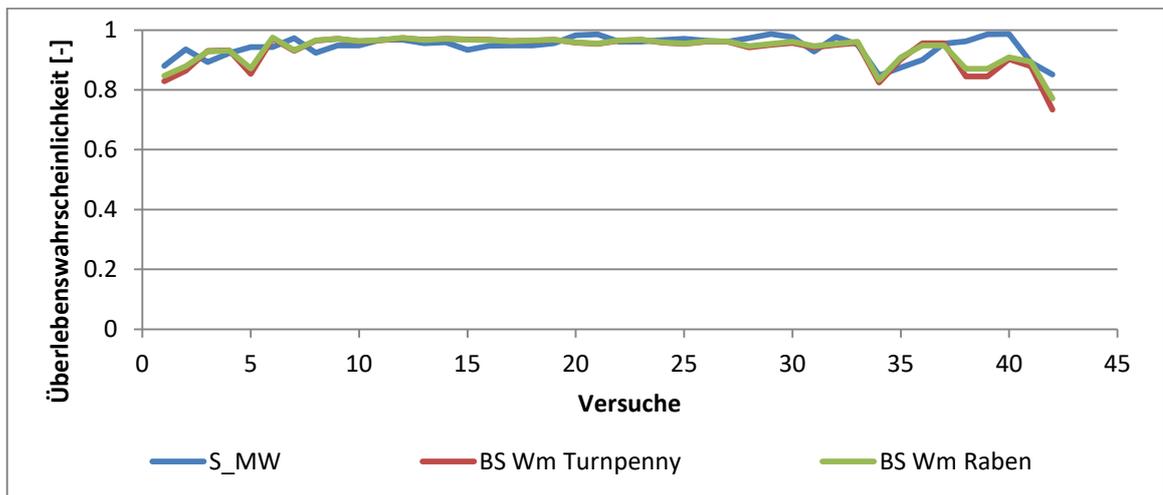


Abbildung 41: Vergleich Von Raben/Turnpenny – Salmoniden

In beiden Abbildungen sind die Abweichungen der Berechnungen mit dem *Mutilation Ratio* von Von Raben geringer als mit dem *Mutilation Ratio* von Turnpenny.

### 6.3 Versuche an der TU-Graz

Im Rahmen der in Kapitel 1.1 erwähnten Forschungsarbeit wurden an zwei Wasserkraftanlagen in Österreich Lebendfischversuche durchgeführt. Für die Versuche wurden dafür die Anlagen in Annabrücke und Friesach ausgewählt. Dabei wurden in beiden Wasserkraftanlagen verschiedene Arten/Altersgruppen von Fischen verwendet.

Mit den bekannten Werten von Anlage und Tieren wird in dieser Arbeit die Überlebensrate der Fische berechnet und mit jener aus den Versuchen verglichen. Bei den Berechnungen wird weder ein Unterschied der Fischart noch des Alters (adult, juvenile) gemacht.

Die folgenden Tabellen stellen jeweils zuerst den Vergleich der Berechnungen mit der Überlebensrate nach einer Stunde und anschließend mit der Überlebensrate nach 24 Stunden dar.

In Abbildung 42 und Abbildung 44 werden die Überlebenswahrscheinlichkeiten nach einer Stunde aus den Lebendfischversuchen mit den statistisch ausgewerteten Werten angeführt. Dabei wird zusätzlich die Standardabweichung dieser Werte gezeigt. Für jedes Kraftwerk wurde eine eigene Abbildung gewählt.

Für die Berechnungen wurde der *Mutilation Ratio* für generelle Berechnungen (40%) verwendet, welcher in Kapitel 6.2.1 beschrieben wurde. Die Berechnungen stimmen dabei mit den Versuchen gut überein. Dies wird in den folgenden Abbildungen noch detailliert dargestellt.

#### **Annabrücke:**

Beim Vergleich wird ersichtlich, dass ein Versuch (Nummer vier) bei den Berechnungen der Überlebenswahrscheinlichkeit einen höheren Wert liefert als die Auswertung der Lebendfischversuche inklusive der Standardabweichung.

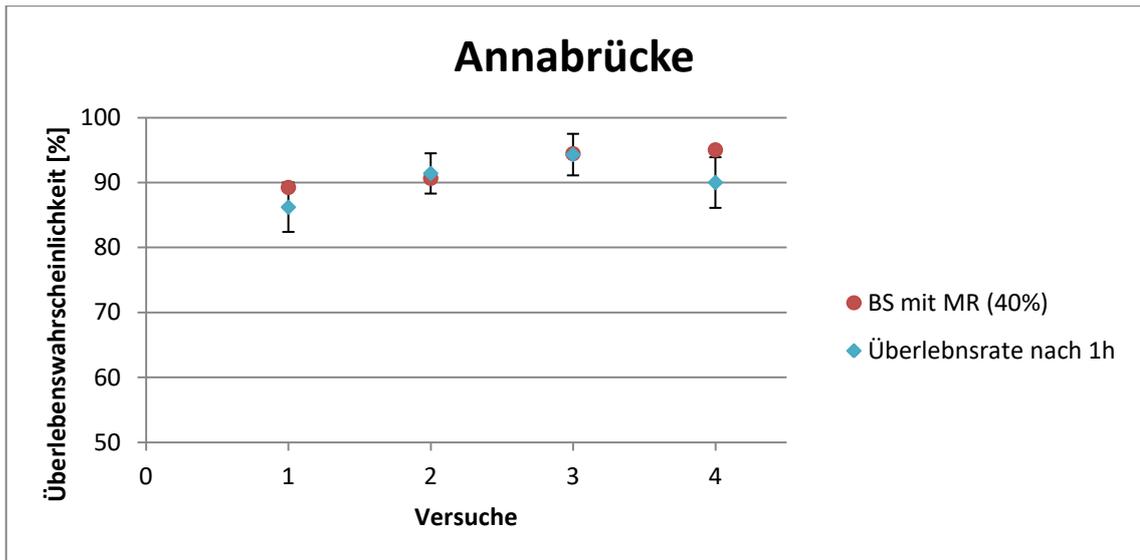


Abbildung 42: Annabrücke 1h Überlebenswahrscheinlichkeit zu Berechnungen

Beim Vergleich mit der Überlebenswahrscheinlichkeit nach 24 Stunden zeigen die Berechnungen teilweise deutlich zu hohe Werte an.

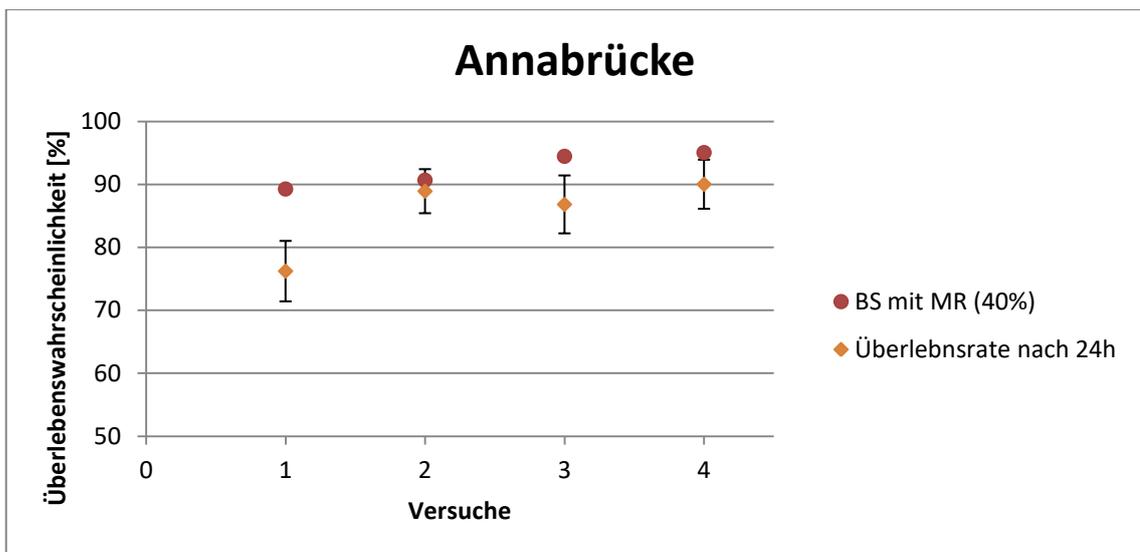


Abbildung 43: Annabrücke 24h Überlebenswahrscheinlichkeit zu Berechnungen

**Friesach:**

Bei der Anlage Friesach weisen alle Ergebnisse der Berechnungen einen höheren Wert für die Überlebenswahrscheinlichkeit als bei den Versuchen auf, wobei sich die Ergebnisse, mit Ausnahme des ersten, circa um die Standardabweichung unterscheiden.

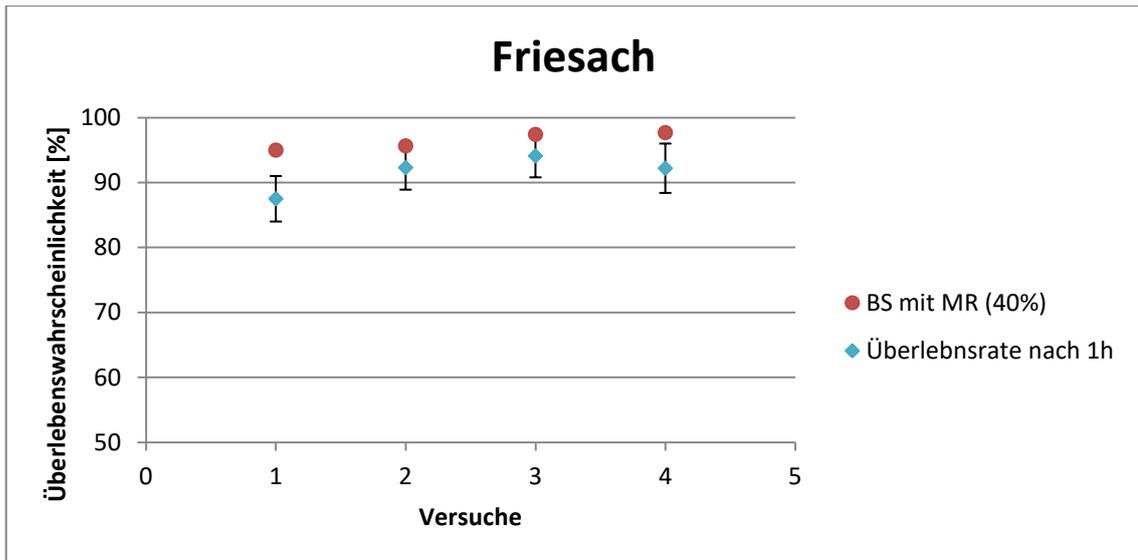


Abbildung 44: Friesach 1h Überlebenswahrscheinlichkeit zu Berechnungen

Wie auch bei den Berechnungen der Wasserkraftanlage bei Annabrücke weisen diese Ergebnisse bei der Wasserkraftanlage bei Friesach eine zu hohe Überlebenswahrscheinlichkeit gegenüber den Auswertungen der Lebendfischversuche nach 24 Stunden auf.

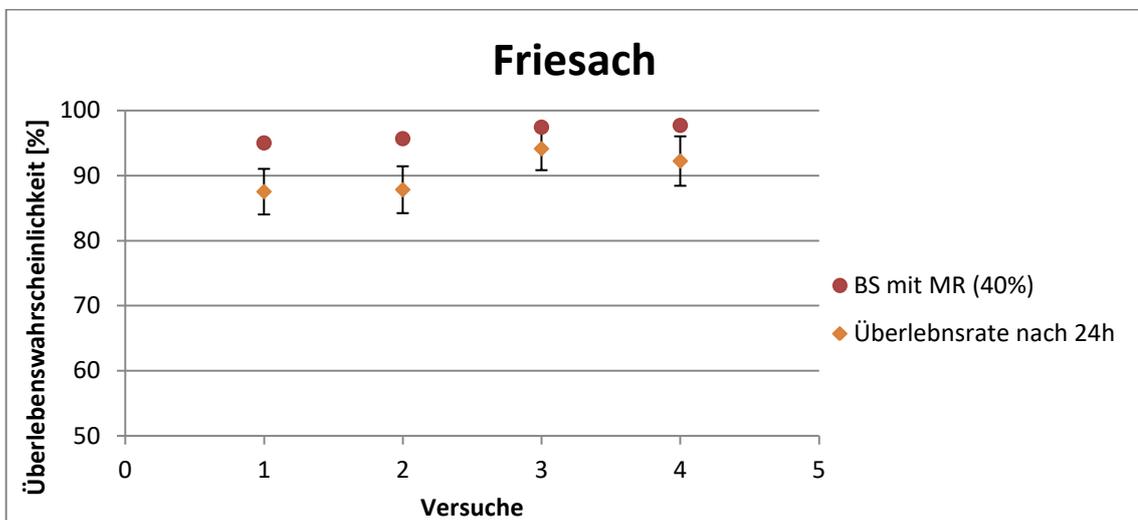


Abbildung 45: Friesach 24h Überlebenswahrscheinlichkeit zu Berechnungen

Aus dem Vergleich mit den durchgeführten Lebendfischversuchen, bei den zwei Wasserkraftanlagen, wurde folgendes gezeigt:

Die Bladestrike Berechnungen erweisen sich als gute Annäherung. Jedoch überschätzen die Berechnungen bei diesen beiden Wasserkraftanlagen die Überlebenswahrscheinlichkeiten der Lebendfischversuche in den meisten Fällen.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Das *Bladestrike* Modell ist eine Modellierung, um die Überlebenswahrscheinlichkeit von Fischen zu berechnen, die durch eine Turbine schwimmen.

Im Rahmen der Masterarbeit wurden:

- publizierte *Bladestrike* Modelle dargestellt und verglichen.
- als Grundlage für eine Validierung der Modelle eine Datenbank vorhandener Mortalitätsuntersuchungen an Turbinen zusammengestellt.
- einzelne Faktoren bzw. Eingangsparameter, welche für die Berechnung von *Bladestrike* Modellen erforderlich sind im Einzelnen genau untersucht und deren Einfluss auf die Ergebnisse der Modelle dargestellt.
- Durchgeführte Lebendfischversuche mit dem verifizierten *Bladestrike* Modell berechnet und die Ergebnisse verglichen.

Beim Vergleich der *Bladestrike* Modelle wurde ersichtlich, dass die Grundformel, welche die Berechnung der Trefferwahrscheinlichkeit darstellt, immer dieselbe ist. Jedoch unterscheiden sich die weiteren Berechnungsschritte, wie der *Mutilation Ratio* oder andere Anpassungen.

Zunächst wurde eine Datenbank aller zugänglichen Untersuchungen erstellt. Die meisten Eingangsparameter, wie der aktuelle Durchfluss, oder die Größe des Schaufelrades, waren als ausgewertete Daten in der zusammengefassten Datenbank vorhanden.

Die zusammengefasste Datenbank, aller in dieser Arbeit verwendeten Versuche, wurde dabei aus verschiedenen Werken zusammengetragen und geprüft, um eine stimmige und aussagekräftige Datenbank zu erhalten (Datenbank siehe Anhang).

Dabei wurde überprüft:

- Wiederholung der Daten (Dabei wurde überprüft, ob derselbe Versuch in unterschiedlichen Veröffentlichungen verwendet wurde).
- Stimmigkeit der Daten (Hierbei wurde geprüft, ob bei denselben Versuchen auch alle einzelnen Daten denselben Wert haben).
- Vollständigkeit der Daten (In diesem Rahmen wurde beurteilt, ob alle Parameter vorhanden sind, um die *Bladestrike* Berechnungen durchführen zu können).

Des Weiteren wurden zwei Faktoren, die nicht aus Datenquellen bestimmt werden können, in dieser Arbeit genauer untersucht.

Diese sind:

- Der Winkel  $\theta$  zwischen dem Wassergeschwindigkeitsvektor und der Achse der Nabe.
- Die Größe der Nabe.

Diese Faktoren konnten in einer Größenordnung bestimmt werden, damit kein signifikanter Unterschied bei den Ergebnissen der *Bladestrike* Berechnungen vorhanden ist.

Mithilfe dieser Grundformel können nun weitere Berechnungen durchgeführt werden.

Eine davon ist die Anpassung mit dem *Mutilation Ratio*. Dieser wurde in der Folge genauer betrachtet. Dabei wurden zwei verschiedene Modelle (nach Von Raben und Turnpenny) untersucht. Wobei das lineare Modell nach Von Raben bessere Ergebnisse lieferte, als die Berechnungen mit dem *Mutilation Ratio* nach Turnpenny.

Weitere Anpassungen oder Verbesserungen der Modellierung, wie eine Rotation, oder die Empfindlichkeit der Fische zu berücksichtigen, wurden angeführt, jedoch nicht ausgewertet.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen wurden anschließend Berechnungen durchgeführt und mit den Lebendfischversuchen der TU-Graz verglichen. Dabei wurden die Berechnungen der Überlebenswahrscheinlichkeit zum Mittelwert der Versuche meist überschätzt. Jedoch war der Unterschied oft im Rahmen der Standardabweichung der Versuche.

## 8. Literaturverzeichnis

- Bell, M. (1991). *Revised Compendium of the Success of Passage of Small Fish Through Turbines*. North Pacific Division, Portland, Oregon: Report to the U.S. Army Corps of Engineers.
- Benigni. (2017). *Hydraulische Strömungsmaschinen, Skriptum*. Graz: Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen, Technische Universität Graz.
- BMLFUW. (2010a). NGP. *Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2009*.
- BMLFUW. (2010b). QZV. *Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer – QZV Ökologie OG*.
- BMLFUW. (2014). [www.bmlfuw.gv.at](http://www.bmlfuw.gv.at). Abgerufen am 30. 03 2017 von [https://www.bmlfuw.gv.at/wasser/wasser-eu-international/eu\\_wasserrecht/Wasserrahmen-RL.html](https://www.bmlfuw.gv.at/wasser/wasser-eu-international/eu_wasserrecht/Wasserrahmen-RL.html)
- BMLFUW. (2015). NGP. *Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan*.
- Dadswell. (1994). *Macrotidal estuaries: a region of collision between migratory marine animals and tidal power development*. USA, Greenville: ICMR.
- Deng, Z., Carlson, T. J., Dauble, D. D., & Ploskey, G. R. (2011). *Fish Passage Assessment of an Advanced Hydropower Turbine and Conventional Turbine Using Blade-Strike Modeling*. Richland: Pacific Northwest National Laboratory.
- Deng, Z., Carlson, T. J., Ploskey, G. R., & Richmond, M. C. (2005). *Evaluation of Blade-Strike Models for Estimating the Biological Performance of Large Kaplan Hydro Turbines*. Richland, Washington: Pacific Northwest National Laboratory.
- Deng, Z., Carlson, T. J., Ploskey, G. R., Richmond, M. C., & Dauble, D. D. (6. 7 2007). Evaluation of blade-strike models for estimating the. *ecological modelling 208*, S. 167-176.
- Ebel, G. (2013). *Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen*. Halle (Saale): Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie.
- EG, E. P. (2000). RICHTLINIE 2000/60/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS. *zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik*.
- Encarta. (2009). Microsoft Encarta und Lernen und Wissen Program Manager. Redmond.

- EPRI. (2011). *Evaluation of Fish Injury and Mortality Associated with Hydrokinetic Turbines*. (Electric Power Research Institute): Prepared by Alden Research Laboratory, Inc. EPRI Report No. TR-1024569.
- G. R. Ploskey, T. J. (2004). *Comparison of Blade-Strike Modeling Results with Empirical Data*. Richland, Washington: Prepared for the U.S. Department of Energy under Contract DE-AC06-76RL01830, Pacific Northwest National Laboratory.
- Gomes, & Larinier. (2008). *Domages subis par les anguilles lors de leur passage au travers des turbines Kaplan*. Toulouse: Anguilles-ouvrages-Programme national de recherche-developpement.
- Haunschmid, Schotzko, Pet-Glechner, Honsig-Erlenburg, Schmutz, Spindler, . . . Sasano. (2010). Leitfaden für Erhebung der biologischen Qualitätselemente Teil A1 - Fische.
- Laringer, & Dartiguelongue. (1989). *La circulation des poissons migrateurs*. Bull.Fr. Peche Piscic.
- Manitoba. (2012). Keeyask Generation Project. *Environmental Impact Statement*.
- Monten. (1985). *Fish and turbines - Fish injuries during passage through power station turbines*. Stockholm (Vattenfall).
- Pavlov, L. K. (2002). *Downstream Migration of Fish Through Dams of Hydroelectric Power Plants*. Oak Ridge, Tennessee: Trans. T. Albert, trans. ed. G. F. Čada. ORNL/TR-02/02, Oak Ridge National Laboratory.
- Pratt, C. (13. 02 2015). Potential failure situation developing at Wanapum Dam. The Wenatchee World.
- Schneider, J., Zitek, A., & Ratschan, C. (2015). Collective Research Einreichung. *Flussabwärts gerichtete Fischwanderung an mittelgroßen Fließgewässern in Österreich*.
- Turnpenny, A., Clough, S., Hanson, K., Ramsay, R., & McEwan, D. (2000). Risk Assessment for Fish Passage Through Small, Low-Head Turbines. *Final Report*. Energy Technical Support Unit, Harwell, United Kingdom.
- Van Esch, B. (2014). Validation of a model to predict fish passage mortality in pumping stations. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 71.

Von Raben, K. (1957). *Regarding the problem of mutilations of fishes by hydraulic turbines*. Die Wasserwirtschaft (100):4:97. Fisheries Research Board of Canada Translation Series, No. 448, 1964.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verletzung durch Turbinenschaufel (Manitoba, 2012).....	8
Abbildung 2: Abtrennung durch Turbinenschaufel(Dadswell, 1994).....	9
Abbildung 3 Querschnitt einer Wasserkraftanlage am Columbia River mit Fischweg (Ploskey et al, 2004) .....	15
Abbildung 4: Graphische Darstellung Winkel $\theta$ (Bell, 1991).....	19
Abbildung 5: Graphische Darstellung Leitschaufelwinkel $\theta_{\text{wgt}}$ (Bell, 1991) .....	21
Abbildung 6: Bladestrike Überlebensrate bei Regenbogenforellen (EPRI 2011) .....	26
Abbildung 7: Fischrotation in der Turbine (Van Esch, 2014) .....	27
Abbildung 8: Rotation um Winkel $\alpha$ (Van Esch, 2014).....	28
Abbildung 9: $L_{\text{max}}$ in Abhängigkeit von $\theta$ (Van Esch, 2014).....	29
Abbildung 10: Beispiel effektive Länge (Van Esch, 2014).....	29
Abbildung 11: Stör und Lachs (Wikipedia, 2017) .....	30
Abbildung 12: Wanapum Damm(Pratt, 2015).....	34
Abbildung 13: Geschwindigkeitsvektoren.....	36
Abbildung 14: Grundlegende Anhalte für Überdruckturbinen nach Thomann (Benigni, 2017) .....	39
Abbildung 15: Schematische Ansicht Kaplan turbine .....	40
Abbildung 16: Profilschnitte (Kaplan turbine) mit Durchmesser 630mm (Benigni, 2017).....	41
Abbildung 17: Winkel $\theta$ bei verschiedenen Versuchen .....	44
Abbildung 18: Winkel $\theta$ bei Nabe .....	44
Abbildung 19: Winkel $\theta$ beim Außendurchmesser.....	45
Abbildung 20: Winkel $\theta$ in der Mitte der Schaufel.....	46
Abbildung 21: Winkel $\theta$ über den Schaufelraddurchmesser.....	48
Abbildung 22: Winkel in Abhängigkeit vom Durchfluss .....	49

Abbildung 23: Winkel Theta zu Q relativ .....	51
Abbildung 24: Diagramm laut Thomann für Berechnung der Nabengröße (Benigni, 2017) .....	53
Abbildung 25.: Vergleich der Turbinenschaufeln.....	55
Abbildung 26: Verhältnis von berechneter zu gemessener Schaufelradkantenbreite .....	56
Abbildung 27: LT-Verhältnis bei Salmoniden .....	57
Abbildung 28: Variation mit fixem Winkel .....	61
Abbildung 29: Variation mit berechnetem Winkel.....	63
Abbildung 30: Vergleich Versuche zu Berechnung (Winkel) .....	64
Abbildung 31: Unterschiedliche Nabengrößen Winkel fix.....	67
Abbildung 32: Unterscheidung Nabengröße Winkel berechnet.....	68
Abbildung 33: Vergleich Versuche zu Berechnung (Nabenverhältnis) .....	70
Abbildung 34: MR mit unterschiedlichen Eingangsparametern .....	74
Abbildung 35: Boxplott von MR3 .....	74
Abbildung 36: Boxplot von MR3 Datenüberprüfung .....	75
Abbildung 37: Mutilation Ratio für Salmoniden.....	76
Abbildung 38: Vergleich Versuche zu Berechnungen .....	78
Abbildung 39: Vergleich Turnpenny nur Salmonide Fische.....	79
Abbildung 40: Vergleich Von Raben/Turnpenny .....	80
Abbildung 41: Vergleich Von Raben/Turnpenny – Salmoniden .....	80
Abbildung 42: Annabrüche 1h Überlebenswahrscheinlichkeit zu Berechnungen .....	82
Abbildung 43: Annabrüche 24h Überlebenswahrscheinlichkeit zu Berechnungen .....	82
Abbildung 44: Friesach 1h Überlebenswahrscheinlichkeit zu Berechnungen ..	83
Abbildung 45: Friesach 24h Überlebenswahrscheinlichkeit zu Berechnungen	83

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Standardisierte Variablennamen und originale Namen (Ploskey et al., 2004 editiert) .....	16
Tabelle 4-1: Daten der Versuche .....	32
Tabelle 5-1: : Winkel $\theta$ bei Nabe .....	45
Tabelle 5-2: Winkel $\theta$ beim Außendurchmesser.....	45
Tabelle 5-3: Winkel $\theta$ in der Mitte der Schaufel.....	46
Tabelle 5-4: Ausgangswerte für Berechnung Winkel $\theta$ .....	47
Tabelle 5-5: Winkel $\theta$ bei Wanapum .....	48
Tabelle 5-6: Beispiel Nabendurchmesser Wanapum .....	53
Tabelle 6-1: Trefferwahrscheinlichkeit ohne MR fixer Winkel.....	62
Tabelle 6-2: Zwischenergebnisse Bladestrike berechneter Winkel .....	63
Tabelle 6-3: Vergleich Berechnung mit Versuchen .....	65
Tabelle 6-4: Beispiel Unterschied Winkel.....	66
Tabelle 6-5: Trefferwahrscheinlichkeit ohne MR Nabenverhältnis Winkel fix ...	68
Tabelle 6-6: Trefferwahrscheinlichkeit ohne MR Nabenverhältnis Winkel berechnet.....	69
Tabelle 6-7: Beispiel unterschied Nabendurchmesser .....	71
Tabelle 6-8: Übersicht Eingangsparameter für MR .....	73
Tabelle 6-9: Übersicht Eingangsparameter für Mutilation Ratio Salmoniden ...	76
Tabelle 6-10: Vergleich Mutilation Ratio.....	77

## Anhang

Der Anhang zeigt alle qualitativen Daten inkl. Fallhöhe. Um die Auflistung übersichtlich zu halten wurden die wichtigsten Daten für die Berechnungen dargestellt.

Lfd No kon solidiert	Site	head	Blades	Runner diameter (m)	Runner diameter info	rpm	taxon	size (m)	Method	flow (cms)	flow info	S_MW	beruht auf Datensatz	verglichen m.Datensatz	Quellen
1	Bar Mills, ME	6.7056	5	3.40		120	Atlantic Salmon	0.2010	HI-Z Turb'N Tag	27.18	Turbine Flow	88.0	694	1	FERC 405c,NORM20486
2	Bar Mills, ME	6.7056	5	3.40		120	Atlantic Salmon	0.2080	HI-Z Turb'N Tag	44.17	Turbine Flow	93.6	695	2	FERC 405c,NORM20486
44	Cathaleen's Falls Ir	28	5	3.86	Aussendurchmesser	187	Atlantic Salmon	0.1372	HI-Z Turb'N Tag	75.04	Turbine Flow	89.3	32	697	FERC 405c, NORM20486
53	Chalk Hill	8.8	5	3.43		100	Rainbow trout	0.2200		25.50	Turbine discharge	89.2	765		SKAL02
54	Cliff, Ireland	10	5	4.29	Aussendurchmesser	115	Atlantic Salmon	0.1372	HI-Z Turb'N Tag	73.91	Turbine Flow	92.3	37	699	FERC 405c, NORM20486
55	Conowingo, MD u8	27	6	5.72	Aussendurchmesser	120	American Shad	0.1245	HI-Z Turb'N Tag	226.53	Turbine Flow	94.9	38	565,606,743,788,840	FERC 405c, KLEIN 07,FERC 12717, FERC2232, SKAL02, KEYEY 12
56	Cowlitz, WA	27	5	4.55	Aussendurchmesser	150	Coho Salmon	0.1549	HI-Z Turb'N Tag	89.20	Turbine Flow	97.3	39	702	FERC 405c, NORM20486
57	Craggy Dam, NC	6.4	4	1.75	Aussendurchmesser	229	Channel Catfish	0.2769	HI-Z Turb'N Tag	5.66	Turbine Flow	81.0	40	673	FERC 405c, NORM20486
58	Craggy Dam, NC	6.4	4	1.75	Aussendurchmesser	229	Bluegill	0.1549	HI-Z Turb'N Tag	5.66	Turbine Flow	86.0	41	676	FERC 405c, NORM20486
59	Craggy Dam, NC	6.4	4	1.75	Aussendurchmesser	229	Channel Catfish	0.1803	HI-Z Turb'N Tag	5.66	Turbine Flow	90.0	42	677	FERC 405c, NORM20486
60	Craggy Dam, NC	6.4	4	1.75	Aussendurchmesser	229	Channel Catfish	0.1803	HI-Z Turb'N Tag	16.99	Turbine Flow	93.0	43	678	FERC 405c, NORM20486

61	Craggy Dam, NC	6.4	4	1.75	Aussen-durchmesser	229	Channel Catfish	0.2769	HI-Z Turb'N Tag	16.99	Turbine Flow	93.0	44	679	FERC 405c, NORM20486
62	Craggy Dam, NC	6.4	4	1.75	Aussen-durchmesser	229	Bluegill	0.0991	HI-Z Turb'N Tag	5.66	Turbine Flow	96.0	45	680	FERC 405c, NORM20486
63	Crescent, NY	8.2	5	2.74	Aussen-durchmesser	144	Blueback Herring	0.0914	HI-Z Turb'N Tag	43.04	Turbine Flow, Test discharge-	96.0	46		FERC 405c, FERC 1940, KLEIN 07,FERC 12717, NORM20486, FERC 2232
64	Crescent	8.2	5	2.74	Aussen-durchmesser	144	blueback herring	0.0864	Balloon Tag	43.04	Test discharge-Rated flow	100.0	506		FERC 1940
77	Fessenheim	15	4	6.67	Aussen-durchmesser	88	European eel	0.7036	Balloon Tag	359.62	Test discharge-Rated flow	95.3	507	850	FERC 1940, KEEY 12
78	Fessenheim	15	4	6.67	Aussen-durchmesser	88	European eel	0.7036	Balloon Tag	368.12	Test discharge-Rated flow	88.1	508	850	FERC 1940, KEEY 12
79	Fessenheim	15	4	6.67	Aussen-durchmesser	88	European eel	0.7036	Balloon Tag	351.13	Test discharge-Rated flow	93.6	509	850	FERC 1940, KEEY 12
80	Fessenheim	15	4	6.67	Aussen-durchmesser	88	European eel	0.7036	Balloon Tag	362.46	Test discharge-Rated flow	92.4	510	850	FERC 1940, KEEY 12
86	Hadley Falls, MA	16	5	3.96	Aussen-durchmesser	150	American Shad	0.0813	HI-Z Turb'N Tag	118.93	Turbine Flow	89.1	60	698	FERC 405c, NORM20486
88	Hadley Falls, MA u1	16	5	4.32	Aussen-durchmesser	128	American Shad	0.0813	HI-Z Turb'N Tag	118.93	Turbine Flow	97.3	62	441, 614, 722, 566, 700, 771	FERC 405c, FERC 1940, KLEIN 07,FERC 12717, NORM20486, FERC 2232, SKAL02
89	Hadley Falls, MA u1	16	5	4.32	Aussen-durchmesser	128	American Shad	0.0813	HI-Z Turb'N Tag	43.89	Turbine Flow	100.0	63	441, 614, 722, 701, 770	FERC 405c, FERC 1940, FERC 12717, NORM20486, FERC 2232, SKAL02
95	Herrings, NY	5.8	4	2.87	Aussen-durchmesser	138	Soft ray	0.2489	Full discharge netting	33.98	Turbine Flow	85.1	64		FERC 405c
96	Herrings, NY	5.8	4	2.87	Aussen-durchmesser	138	Salmonids	0.1753	Full discharge netting	33.98	Turbine Flow	87.5	65		FERC 405c

97	Herrings, NY	5.8	4	2.87	Aussen-durchmesser	138	Salmonids	0.0991	Full discharge netting	33.98	Turbine Flow	90.0	66		FERC 405c
98	Herrings, NY	5.8	4	2.87	Aussen-durchmesser	138	Percid	0.0991	Full discharge netting	33.98	Turbine Flow	91.1	67		FERC 405c
99	Herrings, NY	5.8	4	2.87	Aussen-durchmesser	138	Soft ray	0.1753	Full discharge netting	33.98	Turbine Flow	91.7	68		FERC 405c
100	Herrings, NY	5.8	4	2.87	Aussen-durchmesser	138	Centrar-chid	0.2489	Full discharge netting	33.98	Turbine Flow	92.5	69		FERC 405c
101	Herrings, NY	5.8	4	2.87	Aussen-durchmesser	138	Clupeids	0.0991	Full discharge netting	33.98	Turbine Flow	92.8	70		FERC 405c
102	Herrings, NY	5.8	4	2.87	Aussen-durchmesser	138	Centrar-chid	0.2489	Full discharge netting	33.98	Turbine Flow	93.2	71		FERC 405c
103	Herrings, NY	5.8	4	2.87	Aussen-durchmesser	138	Percid	0.0991	Full discharge netting	33.98	Turbine Flow	94.9	72		FERC 405c
104	Herrings, NY	5.8	4	2.87	Aussen-durchmesser	138	Centrar-chid	0.0991	Full discharge netting	33.98	Turbine Flow	95.0	73		FERC 405c
105	Herrings, NY	5.8	4	2.87	Aussen-durchmesser	138	Salmonids	0.0991	Full discharge netting	33.98	Turbine Flow	95.5	74		FERC 405c
106	Herrings, NY	5.8	4	2.87	Aussen-durchmesser	138	Percid	0.2489	Full discharge netting	33.98	Turbine Flow	96.2	75		FERC 405c
107	Herrings, NY	5.8	4	2.87	Aussen-durchmesser	138	Salmonids	0.2489	Full discharge netting	33.98	Turbine Flow	96.2	76		FERC 405c
108	Herrings, NY	5.8	4	2.87	Aussen-durchmesser	138	Centrar-chid	0.1753	Full discharge netting	33.98	Turbine Flow	96.4	77		FERC 405c
109	Herrings, NY	5.8	4	2.87	Aussen-durchmesser	138	Centrar-chid	0.1753	Full discharge netting	33.98	Turbine Flow	97.3	78		FERC 405c

110	Herrings, NY	5.8	4	2.87	Aussen-durchmesser	138	Soft ray	0.0991	Full discharge netting	33.98	Turbine Flow	97.5	79		FERC 405c
111	Herrings, NY	5.8	4	2.87	Aussen-durchmesser	138	Percid	0.1753	Full discharge netting	33.98	Turbine Flow	98.2	80		FERC 405c
112	Herrings, NY	5.8	4	2.87	Aussen-durchmesser	138	Centrar-chid	0.0991	Full discharge netting	33.98	Turbine Flow	98.3	81		FERC 405c
113	Herrings, NY	5.8	4	2.87	Aussen-durchmesser	138	Salmonids	0.2489	Full discharge netting	33.98	Turbine Flow	98.6	82		FERC 405c
114	Herrings, NY	5.8	4	2.87	Aussen-durchmesser	138	Salmonids	0.1753	Full discharge netting	33.98	Turbine Flow	98.7	83		FERC 405c
117	John Day	31	6	7.92	Aussen-durchmesser	90	Chinook Salmon	0.1372	Balloon Tag	448.82	Test discharge-Rated flow	95.6	443	831	FERC 1940, KEEY 12
118	John Day	31	6	7.92	Aussen-durchmesser	90	Chinook Salmon	0.1372	Balloon Tag	563.50	Test discharge-Rated flow	95.9	514	831	FERC 1940, KEEY 12
119	John Day	31	6	7.92	Aussen-durchmesser	90	Chinook Salmon	0.1372	Balloon Tag	470.06	Test discharge-Rated flow	93.4	515	831	FERC 1940, KEEY 12
120	John Day	31	6	7.92	Aussen-durchmesser	90	Chinook Salmon	0.1372	Balloon Tag	448.82	Test discharge-Rated flow	94.7	516	831	FERC 1940, KEEY 12
121	John Day	31	6	7.92	Aussen-durchmesser	90	Chinook Salmon	0.1372	Balloon Tag	334.14	Test discharge-Rated flow	94.8	517	831	FERC 1940, KEEY 12
132	Lowell, MA	12	5	3.76	Aussen-durchmesser	120	Atlantic Salmon	0.2032	HI-Z Turb'N Tag	102.39	Turbine Flow	100.0	90	696	FERC 405c, NORM20486
167	Priest Rapids, WA (10ft, Unit 8)	24	6	7.21	Aussen-durchmesser	86	Chinook Salmon	0.1549	HI-Z Turb'N Tag	424.75	Turbine Flow	94.9	106	455	FERC 405c, FERC 1940
168	Priest Rapids, WA (10ft, Unit 8)	24	6	7.21	Aussen-durchmesser	86	Chinook Salmon	0.1549	HI-Z Turb'N Tag	481.39	Turbine Flow	95.6	107	455	FERC 405c, FERC 1940
169	Priest Rapids, WA	24	6	7.21	Aussen-durchmesser	86	Chinook Salmon	0.1549	HI-Z Turb'N Tag	311.48	Turbine Flow	98.3	108	455	FERC 405c, FERC 1940

	(10ft, Unit 8)														
170	Priest Rapids, WA (10ft, Unit 8)	24	6	7.21	Aussen-durchmesser	86	Chinook Salmon	0.1549	HI-Z Turb'N Tag	254.85	Turbine Flow	98.6	109	455	FERC 405c, FERC 1940
171	Priest Rapids, WA (30ft, Unit 8)	24	6	7.21	Aussen-durchmesser	86	Chinook Salmon	0.1549	HI-Z Turb'N Tag	424.75	Turbine Flow	96.1	110	455	FERC 405c, FERC 1940
172	Priest Rapids, WA (30ft, Unit 8)	24	6	7.21	Aussen-durchmesser	86	Chinook Salmon	0.1549	HI-Z Turb'N Tag	481.39	Turbine Flow	96.1	111	455	FERC 405c, FERC 1940
173	Priest Rapids, WA (30ft, Unit 8)	24	6	7.21	Aussen-durchmesser	86	Chinook Salmon	0.1549	HI-Z Turb'N Tag	311.48	Turbine Flow	96.7	112	455	FERC 405c, FERC 1940
174	Priest Rapids, WA (30ft, Unit 8)	24	6	7.21	Aussen-durchmesser	86	Chinook Salmon	0.1549	HI-Z Turb'N Tag	254.85	Turbine Flow	97.1	113	455	FERC 405c, FERC 1940
175	Priest Rapids	24	6	7.21	Aussen-durchmesser	86	Chinook Salmon	0.1549	Balloon Tag	368.12	Test discharge-Rated flow	96.5	527	833	FERC 1940, KEEY 12
176	Priest Rapids	24	6	7.21	Aussen-durchmesser	86	Chinook Salmon	0.1549	Balloon Tag	368.12	Test discharge-Rated flow	96.1	528	833	FERC 1940, KEEY 12
178	Robert Moses Station, NY	25	6	6.10	Aussen-durchmesser	95	American eel	1.0008	HI-Z Turb'N Tag	254.85	Turbine Flow	84.0	115	852	FERC 405c, KLEIN 07
191	Rocky Reach U5 3m	28	6	7.11		90	Chinook salmon	0.1840		226.50	Turbine discharge	97.3	789	120, 124, 463-466, 624-629, 746-751	SKAL02, FERC 405c, FERC 1940, FERC 12717, FERC 2232
192	Rocky Reach U5 3m	28	6	7.11		90	Chinook salmon	0.1840		339.80	Turbine discharge	98.7	790	120, 124, 463-466, 624-629, 746-751	SKAL02, FERC 405c, FERC 1940, FERC 12717, FERC 2232
193	Rocky Reach U5 3m	28	6	7.11		90	Chinook salmon	0.1840		453.10	Turbine discharge	97.6	791	120, 124, 463-466, 624-629, 746-751	SKAL02, FERC 405c, FERC 1940, FERC 12717, FERC 2232
194	Rocky Reach,	28	6	7.11		90	Chinook salmon	0.1840		226.50	Turbine discharge	92.8	792	120, 124, 463-466,	SKAL02, FERC 405c, FERC 1940, FERC

	Washington (Unit 5, 9.1m)													624-629, 746-751	12717, FERC 2232
195	Rocky Reach, Washington (Unit 5, 9.1m)	28	6	7.11		90	Chinook salmon	0.1840		339.80	Turbine discharge	97.7	793	120, 124, 463-466, 624-629, 746-751	SKAL02, FERC 405c, FERC 1940, FERC 12717, FERC 2232
196	Rocky Reach, Washington (Unit 5, 9.1m)	28	6	7.11		90	Chinook salmon	0.1840		453.10	Turbine discharge	95.2	794	120, 124, 463-466, 624-629, 746-751	SKAL02, FERC 405c, FERC 1940, FERC 12717, FERC 2232
207	Safe Harbor Ug	16.8	7	6.15		75	Shad	0.1118		226.50	Turbine discharge	97.8	786	637	SKAL02, FERC 12717
208	Safe Harbor Ug	16.8	6	6.15		75	Shad	0.1171		226.50	Turbine discharge	96.8	787	638	SKAL02, FERC 12717
214	T. W. Sullivan, OR	14	6	1.75	Aussen-durchmesser	242	Chinook Salmon	0.1651	HI-Z Turb'N Tag	11.04	Turbine Flow	84.8	131	674	FERC 405c, NORM20486
215	T. W. Sullivan, OR	14	6	1.75	Aussen-durchmesser	242	Steelhead	0.2261	HI-Z Turb'N Tag	11.04	Turbine Flow	85.1	132	675	FERC 405c, NORM20486
225	Wanapum, WA (10ft, Unit 9)	23.5	5	7.24	Aussen-durchmesser	86	Coho Salmon	0.1549	HI-Z Turb'N Tag	481.39	Turbine Flow	88.5	139	647-654, 735-742, 776-783	FERC 405c, FERC 1940, FERC 12717, FERC 2232, SKAL02
226	Wanapum, WA (10ft, Unit 9)	23.5	5	7.24	Aussen-durchmesser	86	Coho Salmon	0.1549	HI-Z Turb'N Tag	254.85	Turbine Flow	89.7	140	647-654, 735-742, 776-783	FERC 405c, FERC 1940, FERC 12717, FERC 2232, SKAL02
227	Wanapum, WA (10ft, Unit 9)	24	5	7.24	Aussen-durchmesser	86	Coho Salmon	0.1549	HI-Z Turb'N Tag	311.48	Turbine Flow	92.4	141	647-654, 735-742, 776-783	FERC 405c, FERC 1940, FERC 12717, FERC 2232, SKAL02
228	Wanapum, WA (10ft, Unit 9)	24.5	5	7.24	Aussen-durchmesser	86	Coho Salmon	0.1549	HI-Z Turb'N Tag	424.75	Turbine Flow	94.8	142	647-654, 735-742, 776-783	FERC 405c, FERC 1940, FERC 12717, FERC 2232, SKAL02
229	Wanapum, WA (30ft, Unit 9)	25	5	7.24	Aussen-durchmesser	86	Coho Salmon	0.1549	HI-Z Turb'N Tag	254.85	Turbine Flow	94.9	143	647-654, 735-742, 776-783	FERC 405c, FERC 1940, FERC 12717, FERC 2232, SKAL02
230	Wanapum, WA (30ft, Unit 9)	25.5	5	7.24	Aussen-durchmesser	86	Coho Salmon	0.1549	HI-Z Turb'N Tag	311.48	Turbine Flow	96.8	144	647-654, 735-742, 776-783	FERC 405c, FERC 1940, FERC 12717, FERC 2232, SKAL02

231	Wanapum, WA (30ft, Unit 9)	26	5	7.24	Aussen-durchmesser	86	Coho Salmon	0.1549	HI-Z Turb'N Tag	481.39	Turbine Flow	96.8	145	647-654, 735-742, 776-783	FERC 405c, FERC 1940, FERC 12717, FERC 2232, SKAL02
232	Wanapum, WA (30ft, Unit 9)	26.5	5	7.24	Aussen-durchmesser	86	Coho Salmon	0.1549	HI-Z Turb'N Tag	424.75	Turbine Flow	100.0	146	647-654, 735-742, 776-783	FERC 405c, FERC 1940, FERC 12717, FERC 2232, SKAL02
255	West Buxton, ME	7.9248	6	3.38		120	Atlantic Salmon	0.2170	HI-Z Turb'N Tag	50.97	Turbine Flow	94.3	692		NORM20486
256	West Buxton, ME	7.9248	6	3.38		120	Atlantic Salmon	0.2170	HI-Z Turb'N Tag	38.51	Turbine Flow	100.0	693		NORM20486
259	Wilder	15.5	5	2.74	Aussen-durchmesser	113	Atlantic Salmon	0.1880	Balloon Tag	127.43	Test discharge-Rated flow	94.3	558		FERC 1940
260	York Haven	6.4008	4	2.36		200	American Shad	0.1180	HI-Z Turb'N Tag	31.15	Turbine Flow	92.7	681		NORM20486

Kuerzel	Zitat	
FERC 405a	Normandeau Associates, Inc. 2012a	ESTIMATION OF SURVIVAL OF ADULT AMERICAN SHAD PASSED THROUGH FRANCIS AND KAPLAN TURBINES RSP 3.2 CONOWINGO HYDROELECTRIC PROJECT FERC PROJECT NUMBER 405
FERC 405b	Normandeau Associates, Inc. 2012b	FINAL STUDY REPORT ESTIMATION OF SURVIVAL OF JUVENILE AMERICAN SHAD PASSED THROUGH FRANCIS TURBINES RSP 3.2 CONOWINGO HYDROELECTRIC PROJECT FERC PROJECT NUMBER 405
	Normandeau Associates, Inc. 2012c	FINAL STUDY REPORT DOWNSTREAM FISHPASSAGE EFFECTIVENESS ASSESSMENT RSP 3.2 CONOWINGO HYDROELECTRIC PROJECT FERC PROJECT NUMBER 405
FERC 1940	HDR ENGINEERING, INC 2014	TOMAHAWK HYDROELECTRIC PROJECT (FERC No. 1940) FISH ENTRAINMENT MORTALITY STUDY
KLEIN 07	Kleinschmidt 2007	Desktop Review of Downstream Passage & Turbine Survival of Diadromous Fishes Passing Through the Redeveloped Holtwood Station
FERC 12717	Kleinschmidt 2009	NORTHERN ILLINOIS HYDROPOWER, LLC BRANDON ROAD HYDROPOWER PROJECT APPLICATION FOR LICENSE FOR MAJOR PROJECT – EXISTING DAM MAY 2009
DAD 94	DADSWELL 1994	Macrotidal estuaries: a region of collision between migratory marine animals and tidal power development, M. J. Dadswell R. A. RULIFSON
FERC-13953	Lake Milton 2010	Lake Milton Hydroelectric Project, Fish Impingement, Entrainment and Turbine Mortality Analysis
NORM20486	Normandeau Project No. 20486.000	DOWNSTREAM PASSAGE SURVIVAL ESTIMATION AT THE TRAIL BRIDGE DEVELOPMENT, MCKENZIE RIVER, OREGON
FERC 2232	CATAWBA 2005	FISH ENTRAINMENT EVALUATION (AQUATICS 05), CATAWBA-WATEREE PROJECT (FERC NO. 2232), Project Number: GK3366
SKAL02	SKALSKI 2002	Effects of Turbine Operating Efficiency on Smolt Passage Survival, North American Journal of Fisheries Management 22:1193–1200, 2002
KEYEY 12	Keyeask 2012	Keyeask Generation Project, Environmental Impact Statement, June 12
FERC 1869	Thompson Falls 2008	Thompson Falls Project FERC No. 1869, Biological Evaluation PPL Montana