

Konzept für ein Wasserkraftanlagen- Management zum Schutz abwandernder Blankaale in der Lahn

Ausführliche Zusammenfassung

Autoren:

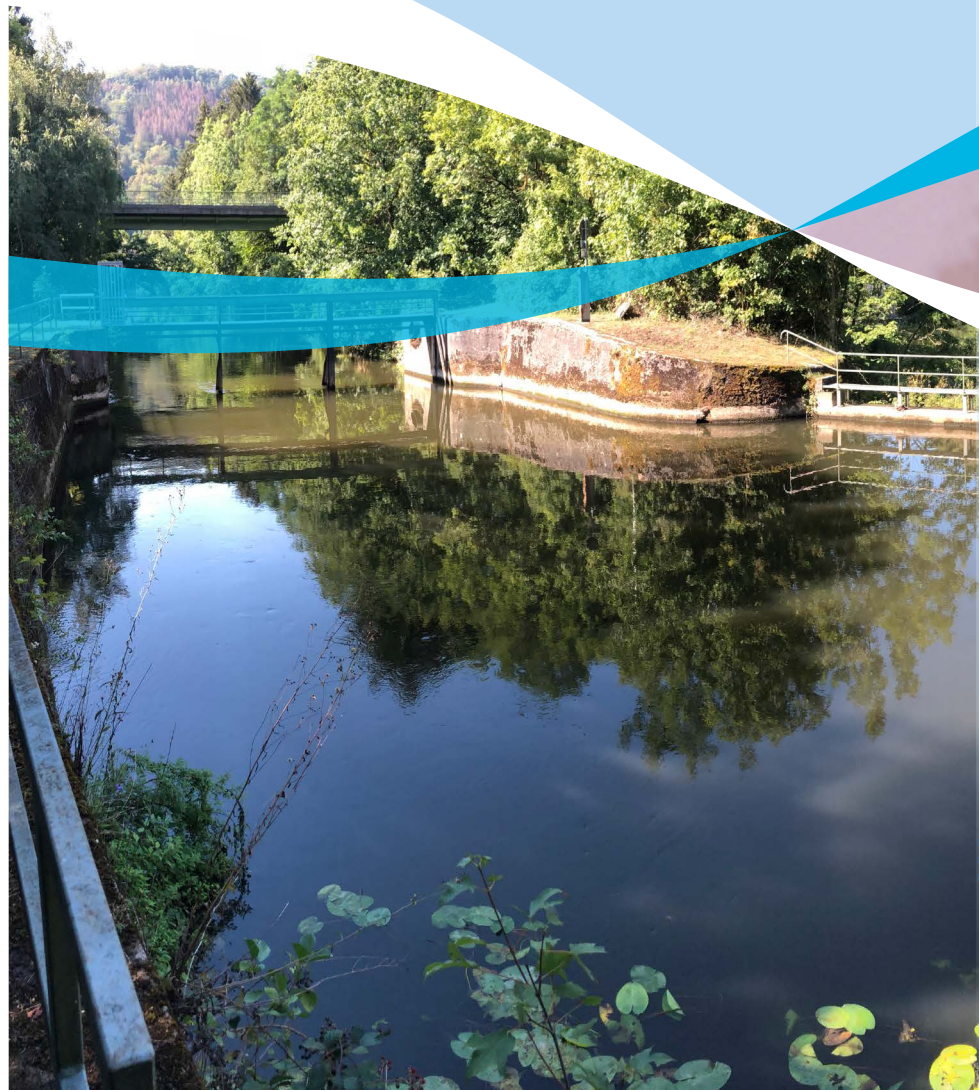
Julia Gatzweiler, Klemens Kauppert,
Sven Mögeltönder-Löwenberg und Marq Redeker

November 2025

Auftraggeber:



Regierungspräsidium Gießen



**CDM
Smith**

ingenieurbüro
kauppert



Institut für angewandte Ökologie GmbH

Konzept für ein Wasserkraftanlagen-Management zum Schutz abwandernder Blankaale in der Lahn

Management Concept for Hydropower Plants to Improve Downstream Migration of Silver Eels in the River Lahn



Auftraggeber / Client:

REGIERUNGSPRÄSIDIUM GIEßEN



**CDM
Smith**

ingenieurbüro
kauppert

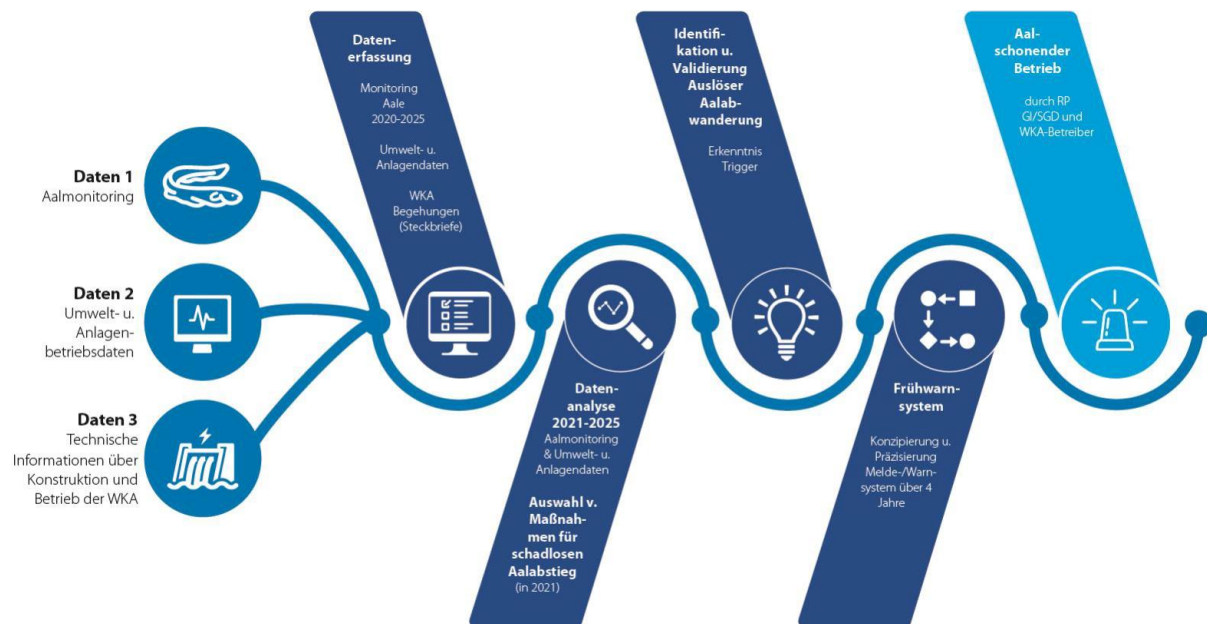


Ausführliche Zusammenfassung

Einleitung und Projektbeschreibung

Die Lahn ist ein 242 Kilometer langer rechter Nebenfluss des Rheins im Westen Deutschlands. Der staugeregelte Fluss verfügt über 40 Wasserkraftanlagen (WKA) unterschiedlicher Größe, Turbinentypen (Kaplan-, Francisturbinen und Wasserräder) und Automatisierungsgraden. Die WKA erzeugen insgesamt ca. 20 MW und versorgen bei Volllast rechnerisch etwa 29.400 Haushalte mit klimafreundlichem Strom.

Im Rahmen des EU-LIFE-Projekts „LiLa Living Lahn - ein Fluss, viele Interessen“ wurde zwischen 2020 und 2025 ein Konzept für das Management von WKA entlang der Lahn entwickelt, um die Abwanderung des Europäischen Aals (*Anguilla anguilla*) - insbesondere im Blankaal-Stadium - möglichst schadlos zu ermöglichen. Ein Frühwarnsystem sollte die Betreiber von 40 WKA rechtzeitig über bevorstehende Aalabwanderungen informieren, damit sie einen Aal-schonenden Betrieb (ASB) ihrer Anlagen einleiten können. Das Projektgebiete umfasst die untere und mittlere Lahn sowie wichtige Zuflüsse, die als natürliche Verbreitungsgebiete des Aals gelten. Zu den Aufgaben gehörten die Entwicklung eines Monitoringsystems an zehn WKA-Standorten, die Dokumentation der WKA, die Analyse der Abwanderung und die Entwicklung eines Managementkonzepts.



Prozessschema der Erarbeitung des WKA-Managementkonzepts (Grafik: CDM Smith)

Lebenszyklus und Gefährdung des Europäischen Aals

Der Europäische Aal hat einen komplexen, katadromen Lebenszyklus: Sein Laichgebiet befindet sich in der Sargassosee im Nordatlantik, östlich von Florida. Die Larven driften über den Atlantik zu europäischen Flüssen, wo sie nach einer Metamorphose als Glasaale einwandern und sich schließlich zu sog. Gelbaalen entwickeln. Nach mehreren Jahren wandeln sie sich zu sog. Blankaaalen um und wandern zur Fortpflanzung stromabwärts. Die Fortpflanzung erfolgt nur einmal. Die Abwanderung im Süßwasser ist daher für den Bestand kritisch, da jeder verlorene Aal die Reproduktion mindert.

Die Abwanderung durch die zahlreichen WKA und Staustufen in Europa, und somit auch an der Lahn, stellt für Aale ein erhebliches Risiko dar. Es entstehen Schäden durch Prädation in Staubereichen, Kollisionen an Bauwerken, Impingement an Rechen und Turbinenschäden. Aufgrund seiner Morphologie ist der Aal besonders gefährdet. Die kumulative Wirkung der WKA und Stauanlagen kann zu hohen Mortalitätsraten führen, was angesichts des Lebenszyklus des Aals besonders kritisch ist. Die EU-Verordnung Nr. 1100/2007 fordert deshalb Maßnahmen, um die Überlebensrate abwandernder Aale zu erhöhen. Landesgesetze und Priorisierungskonzepte ergänzen die Anforderungen an den Fischschutz und die Durchgängigkeit.

Monitoring der Aalabwanderungen

Zur Erarbeitung des WKA-Managementkonzepts wurde über fünf Jahre hinweg an ausgewählten WKA-Standorten entlang der Lahn ein ichthyologisches Monitoring mittels akustischer Telemetrie durchgeführt. Für das Monitoring wurden zehn WKA-Standorte ausgewählt, die eine ununterbrochene Abfolge bilden und eine hohe Datenausbeute erwarten ließen. Die Standorte lagen zwischen Löhnberg (Hessen) und Kalkofen (Rheinland-Pfalz). Die Besatzstelle für die markierten Aale befand sich 20 km stromauf von Löhnberg; diese Distanz vom Besatzpunkt bis zum ersten Monitoring-Standort in Löhnberg stellte sicher, dass Ortsbewegungen nicht durch eine Besatzflucht überlagert wurden. An jedem Standort wurden Hydrophone im Ober- und Unterwasser der WKA/Staustufe installiert, um die Bewegungen der besenderten Aale zu erfassen. Diese Methode ermöglichte eine hohe Detektionsrate.

Von 2020 bis 2025 wurden jährlich 250 Aale mit akustischen Sendern markiert und in die Lahn eingesetzt. Die Sender wurden intraabdominal implantiert und die Aale vor dem Besatz in einer Hälteranlage kurzzeitig überwacht. Die Besenderung der Aale unter Narkose und ihre Hälterung nach der Markierung waren vom Veterinärdezernat des RP Gießen für die Projektlaufzeit tierschutzrechtlich genehmigt. Die Hydrophone zeichneten die Signale jeweils von Anfang Oktober bis Ende Februar auf, um Wanderbewegungen zeitlich und räumlich zu erfassen.

Dokumentation der Wasserkraftanlagen

Es erfolgte eine umfassende Recherche zu allen WKA-Standorten, u. a. Wasserrechte, Planunterlagen und Wasserbuchdaten. Die Recherche wurde pandemiebedingt digital durchgeführt. Die erhobenen Daten stammen von Wasser- und Umweltbehörden in Hessen und Rheinland-Pfalz sowie der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung.

Fast alle WKA wurden besichtigt, um Abstiegsmöglichkeiten für Aale, Rechensysteme, Fischschutzanlagen, Turbinenaufstellung und Betriebsmodi zu dokumentieren. Die Automatisierungsgrade der Anlagen variieren stark. Einige Anlagen stellen bei Hochwasser den Betrieb ein, was alternative Abstiegskorridore schafft. Die Zuständigkeiten für WKA und Wehre sind teilweise getrennt, was Abstimmungen während den ASBen erfordert.

Neun WKA verfügen über Fischschutzrechen und Fischabstiegsanlagen, drei erfüllen aktuelle Aalschutzkriterien. Zwei WKA betreiben ein Turbinenmanagement mit Abschaltung während Aalabwanderung. Für den Aal-schonenden Betrieb wurden sechs Maßnahmen definiert, darunter temporäre Außerbetriebnahme, Reduzierung der Rechen-Anströmgeschwindigkeit, optimierte Turbinensteuerung und „Trap & Truck“-Systeme. Viele ASB-Maßnahmen erfordern manuellen Personaleinsatz, da keine Fernsteuerung vorhanden ist.

Erkenntnisse aus dem Aal-Monitoring und der Korrelation mit Umweltparametern

Ergebnisse aus den Aalmonitoring-Kampagnen:

- Die durchschnittliche Totallänge der besenderten Aale über alle fünf Untersuchungskampagnen lag bei 73,3 cm.
- Abwanderbereite Aale waren an schwarzen Neuromasten entlang der Seitenlinie und silbrig-weißer Bauchseite erkennbar.
- Von 1.250 besenderten Aalen wurden 284 mindestens einmal von den Hydrophonen detektiert. Die jährlichen Detektionsraten lagen zwischen 17% und 25,3%.
- Etwa 20% der besenderten Aale sind aus dem Untersuchungsgebiet jährlich stromabwärts gewandert.
- Die Aale sind vor allem nachtaktiv, mit Wanderungen zwischen Dämmerung und Sonnenaufgang, aber auch tagsüber bei Hauptereignissen.
- Die Abwanderereignisse variierten in Dauer und Zeitpunkt, ohne dass ein bevorzugter Monat identifiziert werden konnte. Abwanderereignisse dauerten 2 bis 13 Tage.
- Die Abwanderung aus Zuflüssen erfolgte zeitgleich mit der im Hauptfluss Lahn.
- An den untersuchten Wehrstandorten mit WKA wurde ein Verlust an besenderten Aalen festgestellt, der von Saison zu Saison zwischen maximal 90% und 20% schwankte. Hochwasser, wenn die Wehre überströmt waren, begünstigten dabei eine Abwanderung.
- In einem Parallelprojekt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt e.V. wurden alle weiteren sieben WKA-/Staustufen-Standorte im rheinland-pfälzischen Lahnabschnitt bis zur Mündung in den Rhein mit der gleichen akustischen Telemetrie ausgestattet. Dabei wurde dokumentiert, dass nur etwa 25% der abwandernden Aale die Passage der 17 Staustufen mit Wasserkraftnutzung von Löhnberg bis zur Mündung in Lahnstein bewältigten.

Korrelation der Aalabwanderungen mit Umweltparametern:

- Es wurden ca. 200 Zeitreihen aus fünf Parametergruppen analysiert: Astronomie, Chemie, Hydrologie, Meteorologie und Physik.
- Die wichtigsten korrelierten Parameter sind Sonnenstand/Helligkeit und Abflussänderungen.
- Die Abwanderereignisse dauern in der Regel von Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang. Bei mehrtägigen (Haupt-)Ereignissen wandern die Aale allerdings nicht nur nachts, sondern auch über den Tag.
- Abwanderereignisse finden unabhängig von der Abflussmenge (Q_{Lahn}) statt. Es lässt sich kein Grenzwert feststellen, ab dem mit einer Abwanderung von Aalen gerechnet werden könnte. Abwanderungen korrelieren vielmehr mit Abflussanstiegen (ΔQ_{Lahn}). Eine Abflussabnahme scheint hingegen keinen Einfluss auf das Abwandergeschehen zu haben.
- Eine Korrelation mit der Mondphase konnte nicht bestätigt werden.

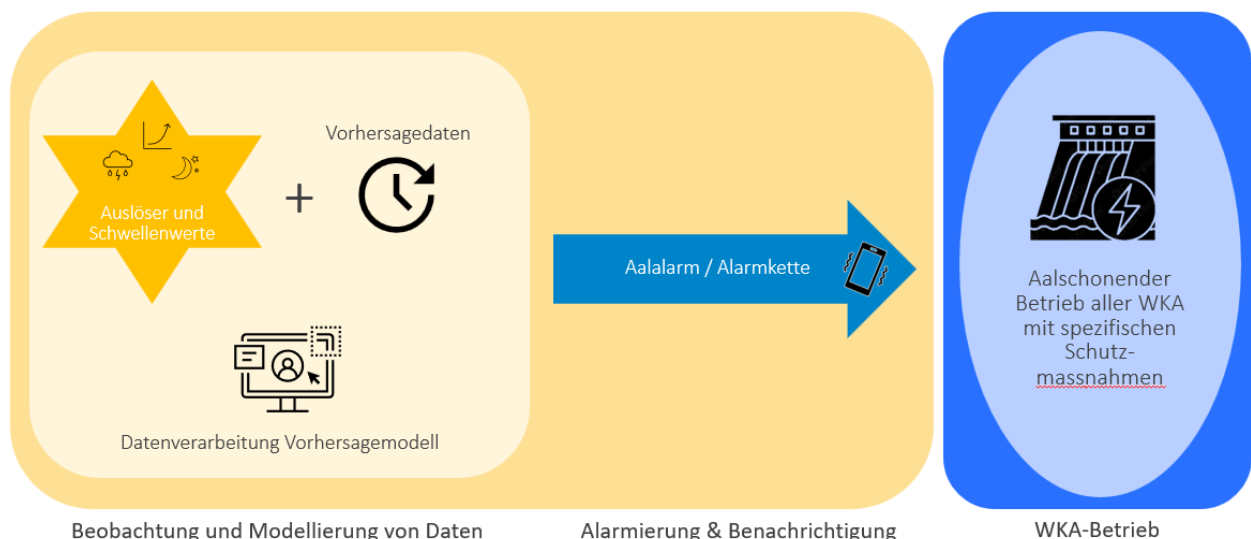
Die Telemetriedaten bestätigen ein kollektives, variabel zeitlich verteiltes Abwanderungsverhalten der Blankaale, das durch Umweltfaktoren wie Abflussanstieg und Tageslicht ausgelöst wird. Die Detektionsrate und die Datenqualität bildeten eine solide Basis für die Entwicklung des Frühwarnsystems.

Aal-schonendes Wasserkraftanlagen-Management

Konzeption und Komponenten des WKA-Management:

Das WKA-Management für die Lahn kombiniert biologische Erkenntnisse aus dem Monitoring mit Umweltparametern und technischen Informationen der WKA/Staustufen. Das entwickelte WKA-Management besteht aus mehreren wesentlichen Komponenten, die zusammenarbeiten, um künftige Aalabwanderereignisse zu erkennen, potenziell Betroffene rechtzeitig zu informieren und letztlich standortspezifische Aalschutzmaßnahmen umzusetzen. Die wesentlichen Elemente sind:

- Frühwarn- und Meldesystem
 - Beobachtung und Integration von Vorhersagedaten
 - Datenverarbeitung / Modellierung der Daten in einem Vorhersagemodell
 - Alarmierung und Benachrichtigung
- Aal-schonender WKA-Betrieb



Komponenten des Aal-schonenden WKA-Managements für die Lahn (Grafik: CDM Smith)

Vorhersagemodell:

Es wurde ein Vorhersagemodell entwickelt, das Aal-Abwanderereignisse anzeigt, sobald bestimmte Schwellenwerte überschritten werden bzw. typische Merkmalskombinationen eintreten. Das hydrologiebasierte Vorhersagemodell basiert auf einem statistischen Ensemble-Ansatz (*Boosted Regression Trees*) (TEICHERT ET AL. 2020) und nutzt amtliche Wasserstand- bzw. Abflussdaten der Lahn-Pegel Kalkofen und Leun. Das Modell wurde für die Lahn mit Monte-Carlo-Simulationen und Permutationsanalysen kalibriert und validiert. Die Vorhersagegenauigkeit liegt über 80%.

Datenintegration und Vorhersagemodellierung:

Die Umweltdaten werden automatisiert vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie und der Bundesanstalt für Gewässerkunde bezogen und gespeichert. Das Modell läuft automatisiert auf einem Server und nutzt Echtzeit- und Prognosedaten der Pegel Leun und Kalkofen. Wenn eine neue Pegelvorhersage vom Datenlieferanten bereitgestellt wird, erfolgt automatisch ein Lauf des Vorhersagemodells.

Alarmierung und Benachrichtigung:

Mithilfe des Vorhersagemodells werden Zeiträume ermittelt, in denen Aalabwanderungen sehr wahrscheinlich sind. Werden solche Zeiträume mit hoher Wahrscheinlichkeit prognostiziert, werden die WKA-Betreiber per E-Mail gewarnt und aufgefordert, nachts während der prognostizierten Zeit den ASB einzuleiten. Es ist grundsätzlich vorgesehen, dass die Meldung 48 Stunden vor dem Beginn der prognostizierten Abwanderung erfolgt, um die Anlagensteuerung in den ASB zu versetzen.

Operativer Betrieb des WKA-Management:

In der letzten Monitoring-Saison 2024/2025 wurde ein operativer Testbetrieb durchgeführt. Elf Betreiber mit insgesamt 21 WKA nahmen daran teil. Im September und Oktober 2024 fanden Informationsgespräche mit den Betreibern der WKA zur Durchsprache und Festlegung der individuellen, standortspezifischen ASB-Maßnahmen statt. Das Frühwarnsystem lief ab Mitte Oktober 2024 im operativen Modus in Echtzeit. Es wurden 48- und 24-Stunden-Vorauswarnungen versandt, bei Bedarf auch (mehr)tägige Verlängerungen. Während der Monitoring-Saison wurden sechs Abwanderereignisse identifiziert und die WKA-Betreiber entsprechend gewarnt. Nach Auswertung der Detektionen und Alarme wurden 99,7% der Aaldetektionen durch Warnungen abgedeckt. Ende März 2025 wurde die Testphase mit einem Erfahrungsaustausch der Teilnehmer über den Testbetrieb abgeschlossen.

Ausblick

Das LiLa Living Lahn-Projekt zeigt, dass ein effektives WKA-Management zur Unterstützung der Aalabwanderung technisch und organisatorisch umsetzbar ist. Mit dem entwickelten Aal-Frühwarnsystem steht erstmals weltweit ein System zum operationellen Einsatz bereit, das mit einem integrierten, mit mehrjährigen Aalmonitoringdaten kalibrierten Vorhersagemodell sowie mit abiotischen Vorhersagedaten (Wasserstand/Abfluss) arbeitet.

Das Projekt hat gezeigt, dass sich die Güte bzw. Genauigkeit des Vorhersagemodells durch mehrere Saisons mit unterschiedlichen hydrologischen Charakteren optimieren lässt. Die Prognosegenauigkeit des Modells beträgt zum Abschluss des Projekts ~90% und liegt damit deutlich über der vergleichbarer Umweltparameter gestützter Frühwarnmodelle. Sie ist vergleichbar mit der des einzigen verfügbaren, operationellen biotischen Frühwarnsystems für Aal-Abwanderungen (Migromat®).

Das WKA-Management kann an der Lahn sowohl als Interims- als auch als Dauerlösung eingesetzt werden. Für den Regelbetrieb werden weitere Abstimmungen mit den WKA-Betreibern empfohlen. Darüber hinaus wird angeregt, das Monitoring (a) zur weiteren Optimierung des Vorhersagemodells und (b) zum Nachweis des Aal-Abstiegs über die gesamte WKA-Kette bis in den Rhein zeitweilig fortzuführen. Das Monitoringkonzept sollte entsprechend angepasst werden, um die unteren WKA in Rheinland-Pfalz abzudecken.

Grundsätzlich ist eine Übertragbarkeit des WKA-Management auf andere Gewässer möglich, sofern geeignete, zeitlich und räumlich aufgelöste hydrologische Daten in einem weiterverarbeitbaren Format für das Vorhersagemodell zur Verfügung stehen. Je nach örtlichen Rahmenbedingungen (z. B. in größeren Einzugsgebieten) wird zur Anpassung bzw. Fortschreibung des Frühwarnsystems an die jeweilige Situation („Modelltraining“) (a) ein temporäres Aal-Monitoring inklusive dessen Evaluierung sowie (b) die Anpassung/Verfeinerung mit gewässerspezifischen hydrologischen Daten empfohlen.

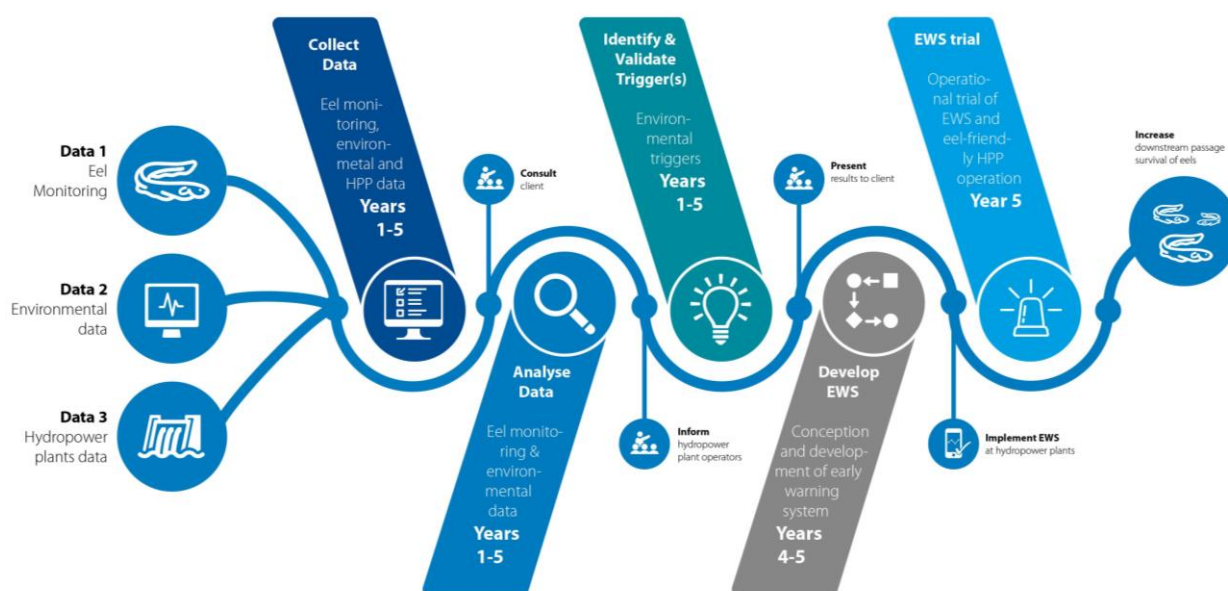
Perspektivisch sind Weiterentwicklungen wie eine App-basierte Alarmierung oder die Signalgebung des Alarms an eine WKA-Steuerung (SPS) denkbar. Auch die Dokumentation der ergriffenen ASB-Maßnahmen sollte weiterentwickelt werden.

Extended Summary

Introduction and project description

The River Lahn is a 242-kilometre-long right tributary of the River Rhine in western Germany. The impounded river has over 40 hydroelectric power plants (HPPs) of varying sizes, turbine types (Kaplan and Francis turbines, and water wheels) and degrees of automation. The HPPs generate a total of approx. 20 MW and, at full load, supply around 29,400 households with climate-friendly electricity.

As part of the EU LIFE project "LiLa Living Lahn - one river, many interests", a concept for the management of HPPs along the River Lahn was developed between 2020 and 2025 to enhance the downstream migration of European eels (*Anguilla anguilla*) – especially in the silver eel stage – with as little harm as possible. An early warning system (EWS) was to inform the operators of 40 HPPs in good time about impending eel migrations so that they could initiate eel-friendly operation (EFO) of their plants. The project area covers the lower and middle reaches of the River Lahn and important tributaries, which are considered natural distribution areas for eels. The tasks included the development of a monitoring system at ten HPPs, the analysis of eel migration, the technical documentation of the HPPs, and the development of a management concept.



Process diagram for the development of the hydroelectric power plant management concept (Figure: CDM Smith)

Life cycle and threats to the European eel

The European eel has a complex, catadromous life cycle: its spawning grounds are located in the Sargasso Sea in the North Atlantic, east of Florida. The larvae drift across the Atlantic Ocean to European rivers, where they migrate as glass eels and elvers after metamorphosis and eventually develop into so-called yellow eels. After several years, they transform into silver eels and migrate downstream to reproduce. They reproduce only once. The migration in fresh water is therefore critical for the population, as every eel lost reduces reproduction.

Migration through the numerous HPPs and weirs in Europe, including those on the River Lahn, poses a considerable risk to eels. Damage occurs because of predation in impounded areas, collisions with

hydraulic structures, impingement on screens and turbine entrainment. Due to its morphology, the eel is particularly vulnerable. The cumulative effect of HPPs can lead to high mortality rates, which is particularly critical given the life cycle of eels. EU Regulation No. 1100/2007 therefore calls for measures to increase the survival rate of migrating eels. State laws and prioritisation concepts supplement the requirements for fish protection and passage.

Monitoring of eel migration

To develop the HPP management concept, ichthyological monitoring using acoustic telemetry was carried out over a period of five years at selected HPPs along the River Lahn. Ten HPP sites were selected for monitoring, which formed an uninterrupted sequence and promised a high data yield. The sites were located between Löhnberg (Hesse) and Kalkofen (Rhineland-Palatinate). The stocking site for the tagged eels was located 20 km upstream from Löhnberg; this distance from the stocking point to the first monitoring site in Löhnberg ensured that movements were not overlaid by stocking escape. At each HPP location, hydrophones were installed upstream and downstream of the HPP/weir to record the movements of the tagged eels. This method enabled a high detection rate.

From 2020 to 2025, 250 eels were tagged with acoustic transmitters each year and released into the River Lahn. The transmitters were implanted intra-abdominally and the eels were monitored briefly in a holding tank before release. The tagging of the eels under anaesthesia and their holding after tagging were approved by the veterinary department of the Giessen Regional Council for the duration of the project in accordance with animal welfare legislation. The hydrophones recorded the signals from the beginning of October to the end of February to record downstream migratory movements in terms of time and space.

Documentation of hydroelectric power plants

Comprehensive research was carried out on all HPPs, including water rights, planning documents, as built drawings and water register data. Due to the pandemic, the research was conducted digitally. The data collected originates from water and environmental authorities in Hesse and Rhineland-Palatinate as well as the Federal Waterways and Shipping Administration.

Almost all HPPs were visited to document downstream passage options for eels, screen systems, fish protection facilities, turbine installation and operating modes. The degree of automation of the plants varies greatly. Some plants cease operation during floods, which creates alternative descent corridors. Responsibilities for HPPs and weirs are sometimes separate, which requires coordination during EFO.

Nine HPPs have fish protection screens and downstream passage facilities, and three meet current eel protection criteria. Two HPPs operate a management system that shuts down turbines during eel migration. Six measures have been defined for eel-friendly operation, including temporary shutdown, reduction of screen intake velocity, optimised turbine control and "trap & truck" operation. Many EFO measures require manual personnel deployment as there is no remote control available.

Findings from eel monitoring and correlation with environmental parameters

Results from the eel monitoring campaigns:

- The average total length of the tagged eels across all five study seasons was 73.3 cm.
- Eels ready to migrate were recognisable by black neuromasts along the lateral line and a silvery-white belly.

- Of 1,250 eels tagged, 284 were detected at least once by the hydrophones. The annual detection rates ranged between 17% and 25.3%.
- Approximately 20% of the tagged eels migrated downstream from the study area each year.
- The eels are mainly nocturnal, migrating between dusk and dawn, but also during the day during major events.
- The migration events varied in duration and timing, with no preferred month being identified. Migration events lasted between 2 and 13 days.
- The migration from tributaries occurred at the same time as in the main River Lahn.
- At the barriers with HPPs that were studied, a loss of tagged eels was observed, which fluctuated between a maximum of 90% and 20% from season to season. Flooding, when the weirs were overflowing, favoured migration.
- In a parallel project conducted by the German Federal Environmental Foundation (*Deutsche Bundesstiftung Umwelt*), all seven other HPPs/weirs in the Lahn section of Rhineland-Palatinate up to the confluence with the River Rhine were equipped with the same acoustic telemetry system. This documented that only about 25% of migrating eels manage to pass the 17 weirs with HPPs from Löhnberg to the confluence in Lahnstein.

Correlation of eel migration with environmental parameters:

- Approximately 200 time series from five parameter groups were analysed: astronomy, chemistry, hydrology, meteorology and physics.
- The most important correlated parameters are sun position/brightness and changes in river discharge.
- The migration events usually last from sunset to sunrise. However, in the case of major events lasting several days, the eels migrate not only at night but also during the day.
- Migration events take place independently of the discharge volume (Q_{Lahn}). No threshold value can be determined at which eel migration can be expected.
Instead, migrations correlate with increases in discharge (ΔQ_{Lahn}). A decrease in discharge, on the other hand, does not seem to have any influence on migration.
- A correlation with the phase of the moon could not be confirmed.

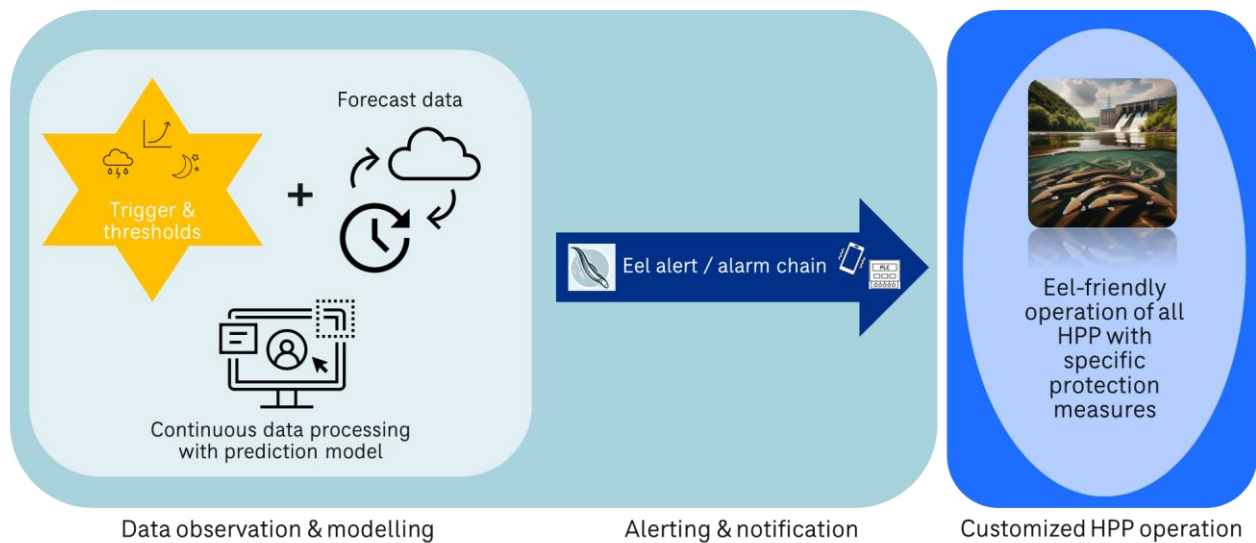
The telemetry data confirm a collective, variably distributed migration behaviour of silver eels, which is triggered by environmental factors such as increases in discharge and daylight. The detection rate and data quality formed a solid basis for the development of the EWS.

Eel-friendly hydropower plant management

Concept and components of HPP management:

HPP management for the Lahn combines findings from biological monitoring with environmental parameters and technical information from the HPP/weirs. The HPP management system developed consists of several key components that work together to identify future eel migration events, inform those operators potentially affected in good time and ultimately implement site-specific eel protection measures. The key elements are:

- Early warning and reporting system
 - Observation and integration of forecast data
 - Data processing / modelling of data in a prediction model
 - Alarm and notification
- Eel-friendly hydroelectric power plant operation



Components of the eel-friendly hydropower plant management for the Lahn (Figure: CDM Smith)

Prediction model:

A prediction model has been developed that indicates eel downstream migration events as soon as certain thresholds are exceeded or typical combinations of characteristics occur. The hydrology-based prediction model is based on a statistical ensemble approach (Boosted Regression Trees) (TEICHERT ET AL. 2020) and uses official water level and discharge data from the Lahn gauges at Kalkofen and Leun. The model was calibrated and validated for the Lahn using Monte Carlo simulations and permutation analyses. The prediction accuracy is over 80%.

Data integration and prediction modelling:

The environmental data is automatically obtained and stored by the Hessian Agency for Nature Conservation, Environment and Geology and the Federal Institute of Hydrology. The model runs automatically on a server and uses real-time and forecast data from the Leun and Kalkofen gauges. When a new gauge forecast is provided by the data supplier, the prediction model runs automatically.

Alerts and notifications:

The prediction model is used to determine periods in which eel migration is very likely. If such periods are predicted with a high probability, the HPP operators are warned by email and requested to initiate the EFO at night during the predicted period. As a rule, the notification is to be issued 48 hours before the start of the predicted migration in order to switch the HPP control system to EFO mode.

Operational trial of the HPP management:

An operational test run was carried out during the last monitoring season in 2024/2025. Eleven operators with a total of 21 HPPs took part. In September and October 2024, information meetings were held with the HPP operators to discuss and define individual, site-specific EFO measures. The early warning

system ran in real time in operational mode from mid-October 2024. 48- and 24-hour advance warnings were sent out, with extensions of several days if necessary. During the monitoring season, six migration events were identified, and the HPP operators were warned accordingly. After evaluating the detections and alarms, 99.7% of eel detections were covered by warnings. At the end of March 2025, the test phase was completed with an exchange of experiences between the participants about the trial operation.

Outlook

The LiLa Living Lahn project shows that effective HPP management to support eel downstream migration is technically and organisationally feasible. The eel EWS developed is the first system in the world ready for operational use that works with an integrated prediction model calibrated with several years of eel monitoring data and abiotic prediction data (water level and/or discharge).

The project has shown that the quality and accuracy of the prediction model can be optimised over several seasons with different hydrological characteristics. At the end of the project, the model's forecast accuracy was ~90%, which is significantly higher than comparable early warning models based on environmental parameters. It is comparable to that of the only available operational biotic early warning system for eel migration (Migromat®).

HPP management can be used on the River Lahn both as an interim and a permanent solution. Further coordination with HPP operators is recommended for regular operation. In addition, it is suggested that monitoring be continued temporarily (a) to further optimise the prediction model and (b) to verify eel descent along the entire HPP chain into the River Rhine. The monitoring concept should be adapted accordingly to cover the lower HPPs in Rhineland-Palatinate.

In principle, the HPP management can be transferred to other water bodies, provided there is adequate hydrological forecast data with temporal and spatial resolution available in a format that can be processed by the prediction model. Depending on local conditions (e.g., in larger catchment areas), the following is recommended for adapting or updating the EWS to the respective situation ("model training"): (a) temporary eel monitoring, including evaluation, and (b) adaptation/refinement with river-specific hydrological data.

Further developments such as app-based alarms or alarm signalling to a HPP control system (PLC) are conceivable in the future. The documentation of the EFO measures taken should also be further developed.