



Universität Kassel
Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald

U N I K A S S E L
V E R S I T Ä T

Analyse der hessischen Wasserkraftnutzung und Entwicklung eines Planungswerkzeuges „WKA-Aspekte“

Erläuterungsbericht

August 2011



Auftraggeber:



Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie,
Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Wiesbaden

BEARBEITUNG DURCH:



Universität Kassel
Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald
Dipl.-Ing. Frank Roland
Dipl.-Ing. Alexander Rötz
Kurt-Wolters-Straße 3
34125 Kassel
Internet: <http://www.uni-kassel.de/cms/wawi>
Tel.: +49 (0)561 804-2749
Fax: +49 (0)561 804-3952

AUFTRAGGEBER:



Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft
und Verbraucherschutz
Abteilung III - Wasser und Boden
Mainzer Straße 80
65189 Wiesbaden
Internet: <http://www.hmuenv.hessen.de>
Tel.: +49 (0)611 815-1355
Fax: +49 (0)611 815-1941

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
1.1	Veranlassung	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Projektstruktur und -bearbeitung	5
2	DATENGRUNDLAGEN	7
2.1	Datenbank „Wanderhindernisse“	7
2.2	Hydrologische Daten	8
3	METHODISCHES VORGEHEN	10
3.1	Filterung der WKA-Datensätze	10
3.2	Ergänzung der WKA-Datensätze	12
3.2.1	Ergänzung und Plausibilisierung der technischen Daten	12
3.2.2	Abbildung des Wasserdargebotes	17
3.2.3	Ergänzung weiterer Informationen	20
3.3	Energetische Berechnungen	21
4	KENNZAHLEN ZUR WASSERKRAFTNUTZUNG IN HESSEN	26
4.1	Ist-Zustand	26
4.1.1	Anzahl und räumliche Verteilung	26
4.1.2	Leistung und Jahresarbeitsvermögen	28
4.1.3	Auf- und Abwärtspassierbarkeit	32
4.1.4	Ausleitungsstrecken und Betriebsgräben	36
4.1.5	Wasserrechtliche Informationen	38
4.2	Szenarienrechnungen	39
4.2.1	Restwasserszenarien	39
4.2.2	Abschätzung des Wasserkraftpotenzials	41
5	ANSÄTZE ZUR WIRTSCHAFTLICHEN ANALYSE DES EINZELFALLS	48
5.1	Eingabe von Verbesserungsmaßnahmen	48
5.2	Ermittlung der jährlichen Einnahmen	50
5.3	Betriebswirtschaftliche Analyse	51
5.3.1	Annuitätenmethode	51
5.3.2	Kapitalwertmethode	53
6	PLANUNGSWERKZEUG „WKA-ASPEKTE“	56
6.1	Ansatz und Konzept	58
6.2	Implementierung in die hessische Wasserwirtschaftsverwaltung	61
7	ZUSAMMENFASSUNG	63
8	VERWENDETE LITERATUR UND UNTERLAGEN	65

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1.1:	Organisationsstruktur des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens „Wasserkraftnutzung und WRRL in Hessen“	5
Abb. 2.1:	Hierarchischer Aufbau der DB Wanderhindernisse (vgl. auch [31])	7
Abb. 2.2:	Verteilung der Pegelstandorte.....	9
Abb. 3.1:	Grafische Darstellung der Abfrageroutine zur Filterung der WKA-Datensätze aus der DB Wanderhindernisse	10
Abb. 3.2:	Verteilung der Wasserkraftanlagen an den hessischen Fließgewässern (dargestellt sind die aus der DB Wanderhindernisse gefilterten WKA-Standorte)....	11
Abb. 3.3:	Datendichte der vier Parameter Q_A , h_f , P_A und E_A bei den Datensätzen zu den 627 Laufwasserkraftwerken (nach Filterung der DB Wanderhindernisse)	12
Abb. 3.4:	Datendichte der vier Parameter Q_A , h_f , P_A und E_A bei den Datensätzen zu den 621 Laufwasserkraftwerken (nach händischer Ergänzung, Stand: Juli 2011).....	14
Abb. 3.5:	Beispiel für das Vorgehen bei der Zuordnung und Umrechnung der Pegeldata auf die WKA-Standorte (Kartenhintergrund (TK25): Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation).....	17
Abb. 3.6:	Ermittlung der mittleren Abflussdauerlinien für die beiden Abflusstypen I und II (rechts im Bild) auf Basis der Abflusscharakteristika der hessischen Fließgewässer nach [38] (links im Bild).....	18
Abb. 3.7:	Umrechnung der mittleren Abflusstypendauerlinien auf die WKA-Standorte	19
Abb. 3.8:	Ermittlung der Längen von Ausleitungsstrecken und Betriebsgräben durch GIS-basierte Digitalisierungen und Abfragen	20
Abb. 3.9:	Wasserdargebot und Turbinendurchfluss für eine beispielhaft ausgewählte Wasserkraftanlage	24
Abb. 3.10:	Berechnete Leistungsdauerlinie und Jahresarbeit für eine beispielhaft ausgewählte Wasserkraftanlage	24
Abb. 3.11:	Auswirkung einer Restwasserabgabe auf den Turbinendurchfluss und die Leistung einer beispielhaft ausgewählten Wasserkraftanlage	25
Abb. 4.1:	Verteilung der WKA auf die Zuständigkeitsbereiche der Regierungspräsidien	26
Abb. 4.2:	Verteilung der WKA-Standorte und deren Einzugsgebietsgröße an der Fulda	27
Abb. 4.3:	Verteilung des Jahresarbeitsvermögens der hessischen WKA-Standorte bezogen auf unterschiedliche Leistungsklassen (Stand: Juli 2011)	29
Abb. 4.4:	Die Stromerzeugung aus Lauf- und Speicherwasserkraftwerken in Hessen zwischen 1996 und 2007 (ohne Pumpspeicherkraftwerke) nach [29] und [36]	31
Abb. 4.5:	Zusammenstellung der installierten Leistung an den Wasserkraftanlagen der hessischen Lahn	32
Abb. 4.6:	Bewertung der Aufwärtspassierbarkeit für die WKA-Standorte der Fulda ([31])	35
Abb. 4.7:	Die Längen der Ausleitungsstrecken an den hessischen WKA-Standorten	37
Abb. 5.1:	Beispielhafte Verbesserungsmaßnahmen an einem WKA-Standort	49
Abb. 5.2:	Veranschaulichung der Kapitalwertberechnung durch Auf- und Abzinsung aller mit der Investition verbundenen Einnahmen und Ausgaben	54
Abb. 6.1:	Inhalte des Handbuchs zum Planungswerkzeug „WKA-Aspekte“	57
Abb. 6.2:	Datentransfer zwischen dem Planungswerkzeug „WKA-Aspekte“ und der DB Wanderhindernisse	58
Abb. 6.3:	Trennung zwischen Benutzeroberfläche und Rechenkern	59
Abb. 6.4:	Screenshot der Benutzeroberfläche des Planungswerkzeuges „WKA-Aspekte“	60

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 2.1:	Anzahl der berücksichtigten Pegelstandorte.....	9
Tab. 3.1:	Durch die „händische“ Ergänzung aktualisierte Daten (Stand: Juli 2011)	13
Tab. 3.2:	Matrix zur „automatisierten“ Datenergänzung.....	16
Tab. 3.3:	Datenquellen zur Ermittlung des Wasserdargebotes an den WKA-Standorten	19
Tab. 3.4:	Beispielhafter Auszug aus der tabellarischen Darstellung des Leistungsplans.....	25
Tab. 4.1:	Anzahl, Ausbauleistung und Jahresarbeitsvermögen der hessischen WKA-Standorte bezogen auf unterschiedliche Leistungsklassen (Stand: Juli 2011).....	28
Tab. 4.2:	Vergleich zwischen berechnetem Jahresarbeitsvermögen und Referenzgrößen für die Wasserkraftanlagen in Hessen mit einer Ausbauleistung ≥ 1 MW	30
Tab. 4.3:	Bewertung der Passierbarkeit an den WKA-Standorten (nach [31])	33
Tab. 4.4:	In der DB Wanderhindernisse dokumentierte Rechenanlagen (vgl. [31]).....	34
Tab. 4.5:	Anzahl der Ausleitungs- und Flusskraftwerke in Hessen (Stand: Juli 2011)	36
Tab. 4.6:	Die Längenverteilung der Unterwassergräben an den Ausleitungskraftwerken	38
Tab. 4.7:	In der DB Wanderhindernisse dokumentierte Wasserrechte (vgl. [31]).....	38
Tab. 4.8:	Auswirkungen der potentiellen RW-Abgaben auf das mittlere Jahresarbeitsvermögen der hessischen Wasserkraftanlagen (Stand: Juli 2011).....	40
Tab. 4.9:	Potenzielle Standorte mit einem signifikanten Wasserkraftpotenzial durch Neubau bzw. Reaktivierung (Stand: Juli 2011).....	43
Tab. 4.10:	Das Wasserkraftpotenzial in Hessen bezogen auf die installierte Leistung (Stand: Juli 2011)	46
Tab. 4.11:	Das Wasserkraftpotenzial in Hessen bezogen auf das Jahresarbeitsvermögen (Stand: Juli 2011)	46
Tab. 5.1:	Vergütungssätze gemäß EEG (vgl. [11], [12] und [13])	50
Tab. 5.2:	Abschätzung der jährlichen Einnahmesituation (beispielhafter Auszug aus den Ergebnisausdrucken des Planungswerkzeuges „WKA-Aspekte“)	51
Tab. 5.3:	Abschätzung der betriebswirtschaftlichen Auswirkungen auf Basis der Annuitätenmethode (beispielhafter Auszug aus den Ergebnisausdrucken des Planungswerkzeuges „WKA-Aspekte“).....	52
Tab. 5.4:	Abschätzung der betriebswirtschaftlichen Auswirkungen auf Basis der Kapitalwertmethode (beispielhafter Auszug aus den Ergebnisausdrucken des Planungswerkzeuges „WKA-Aspekte“).....	54
Tab. 6.1:	Zusammenstellung der durchgeführten Testphasen	61
Tab. 6.2:	Anzahl und Verteilung der im Rahmen der Testphasen berücksichtigten Beispieldatensätze	62

1 EINLEITUNG

1.1 Veranlassung

Die Wasserkraftnutzung bedingt ein Spannungsfeld zwischen Gewässerschutzzielen einerseits und regenerativer Stromerzeugung andererseits.

So stellt die energetische Nutzung des Wassers in Deutschland mit einer Erzeugung von 20,8 TWh aus Laufwasser- und Speicherkraftwerken sowie dem natürlichem Zulauf in Pumpspeicherwerken im Jahr 2008 - dies entspricht einem Anteil von ca. 3,4 % des Endenergieverbrauchs - nach wie vor eine der bedeutendsten regenerativen Energiequellen dar (vgl. [6]). Aktuelle Untersuchungen zum Potenzial der Wasserkraftnutzung in Deutschland weisen unter den aktuellen Rahmenbedingungen ein Zubaupotenzial von etwa 4,4 TWh aus, von denen 3,3 TWh als realisierbar eingeschätzt werden (vgl. [2]). Insgesamt kann somit davon ausgegangen werden, dass die Wasserkraft vermutlich auch in Zukunft einen wesentlichen Beitrag zur regenerativen Stromerzeugung leisten wird.

Demgegenüber belegen zahlreiche Untersuchungen, die u. a. auch im Zusammenhang mit der Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) durchgeführt wurden, dass die Wasserkraftnutzung die gewässermorphologischen Parameter unserer Fließgewässer nachteilig beeinflusst. So unterbrechen oder erschweren zahlreiche Anlagenstandorte die Durchgängigkeit sowohl für verschiedene Fischarten als auch für Kleinorganismen und verursachen zudem eine Veränderung des Abflussregimes, wodurch die Eignung der entsprechenden Gewässerabschnitte als Lebensraum und Laichhabitat eingeschränkt wird. Folglich spielt auch die Verbesserung der gewässerökologischen Situation im Einflussbereich der Kraftwerke eine wichtige Rolle für das Erreichen eines guten Zustandes der Fließgewässer wie er von der WRRL gefordert wird [16].

Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel, sowohl die Wasserkraftnutzung als auch eine Verbesserung der gewässerökologischen Situation im Einklang zu fördern. Zur Stärkung entsprechender Anreize wurden daher im Rahmen der Novellierungen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) die Vergütungssätze für kleine Anlagen (bis 5 MW Ausbauleistung) an- und formale Beschränkungen für die Anerkennung von Leistungserhöhungen bei größeren Anlagen aufgehoben sowie sämtliche Leistungsklassen an ökologische Kriterien gebunden (vgl. auch [14] und [15]). Somit kommt neben den großen Wasserkraftanlagen auch den zahlreichen kleineren Standorten eine umweltpolitische Bedeutung zu.

Folglich sind sowohl bei der Aufstellung von überregionalen Bewirtschaftungsplänen und Maßnahmenprogrammen gem. WRRL als auch bei der Planung von Einzelvorhaben gewässerökologische und wirtschaftliche Fragestellungen zu berücksichtigen, um daraus die kosteneffizientesten Maßnahmenkombinationen zur Steigerung der Leistungsfähigkeit und Verbesserung des gewässerökologischen Zustandes ableiten zu können.

Aufgrund dieser Anforderungen und der Vielzahl von WKA-Standorten sind vertiefte Kenntnisse zu den jeweiligen wasserbaulichen, rechtlichen, gewässerökologischen und ressourcenökonomischen Randbedingungen von besonderer Bedeutung. Darüber hinaus sind Methoden und Planungswerkzeuge erforderlich, die zum einen die strategische Vorgehensweise auf überregionaler Ebene unterstützen und zum anderen auch die detaillier-

te Analyse des lokalen „Einzelfalls“ ermöglichen. So stellen sich auf den verschiedenen Handlungsebenen bzw. -feldern folgende beispielhaft aufgeführte Fragestellungen:

Oberste (überregionale) Planungsebene:

- Wie kann bei der Umsetzung der WRRL eine überregionale „wirtschaftliche Analyse“ der Wasserkraftnutzung effektiv und belastbar gewährleistet werden?
- Durch welche weiteren wasserwirtschaftlichen und ökonomischen Instrumente mit Bezug zur Wasserkraftnutzung sollten die gewässerökologischen Zielsetzungen der WRRL ggf. unterstützt werden?
- Wie groß ist das Potential der Wasserkraft unter den aktuellen wasserrechtlichen und ökonomischen Rahmenbedingungen und wie kann dieses erschlossen werden?
- Welche Daten sollten aufgrund der sehr großen Individualität der Standorte in die überregionale Prioritätenfindung Eingang finden und welche Methoden sollten angewendet werden?

Mittlere (regionale) Planungsebene:

- Wie kann bei der Planung von gewässerökologischen Verbesserungsmaßnahmen die Berücksichtigung der wirtschaftlichen Zumutbarkeit anlagenübergreifend vergleichbar und transparent gewährleistet werden?
- Wie kann der Abstimmungsprozess zwischen den verschiedenen beteiligten Interessensgruppen (i. d. R. Wasserkraft, Wasserwirtschaft sowie Fischerei und Naturschutz) unterstützt werden?

Untere (lokale) Planungsebene:

- Welches ist die kosteneffizienteste Maßnahmenkombination zur Steigerung der Leistungsfähigkeit bzw. Verbesserung der gewässerökologischen Situation an der einzelnen Wasserkraftanlage?

1.2 Zielsetzung

Vor dem dargelegten Hintergrund hat das Hessische Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUELV) im Dezember 2008 das Fachgebiet (FG) Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Kassel beauftragt, eine Analyse der hessischen Wasserkraftnutzung durchzuführen und darüber hinaus ein Planungswerkzeug zur wirtschaftlichen Bewertung von gewässerökologischen Verbesserungsmaßnahmen im Bereich von Wasserkraftanlagen für die hessische Wasserwirtschaftsverwaltung zu entwickeln (Kurtitel „Wasserkraftnutzung und WRRL in Hessen“). Beide Aspekte sollen einen wasserkraftbezogenen Input zur Umsetzung der Maßnahmenprogramme gemäß WRRL liefern und somit die Beantwortung der oben beispielhaft aufgeführten Fragestellungen unterstützen. Hierdurch wird angestrebt, sowohl einen Beitrag zur Förderung der Kleinwasserkraft als erneuerbarer Energiequelle als auch zur Verbesse-

rung der gewässerökologischen Situation im Einflussbereich der jeweiligen Anlagenstandorte zu leisten. Dazu wurden die im Folgenden skizzierten Projektbausteine bearbeitet.

Datenergänzung und -plausibilisierung

Grundlage für eine Erfolg versprechende Entscheidungsunterstützung ist eine breite Datenbasis, die zum einen möglichst alle hessischen Anlagenstandorte umfasst und zum anderen auch die jeweils relevanten Detailinformationen - beispielhaft genannt seien hydrologische, technische, wasserrechtliche und gewässerökologische Kenngrößen - enthält. Eine im Auftrag des RP Kassel im Frühjahr 2008 vom FG Wasserbau und Wasserwirtschaft durchgeführte Auswertung der hessischen DB Wanderhindernisse (vgl. [31]) lieferte zwar bereits einen guten und durchaus belastbaren Gesamtüberblick über die Wasserkraftnutzung in Hessen¹, jedoch reichen die vorliegenden Informationen noch nicht für den wasserwirtschaftlichen Vollzug des Maßnahmenprogramms zur „Hydromorphologie“ aus. Im Rahmen eines ersten Bearbeitungsschrittes galt es daher, die in der DB Wanderhindernisse zu den einzelnen Anlagenstandorten vorhandenen Datensätze zu plausibilisieren und bei Bedarf zu ergänzen. Darüber hinaus wurde die jeweilige hydrologische Situation erfasst und gemeinsam mit weiteren relevanten anlagenspezifischen Daten in dem zu entwickelnden Planungswerkzeug bereitgestellt.

Leistungsplanberechnung und Ist-Zustand

Ziel dieses Bausteins war die „automatisierte“ Erstellung einfacher Leistungspläne auf Basis von aussagekräftigen Kenngrößen, um den gegenwärtigen Zustand der hessischen Wasserkraftanlagen in Bezug auf die gewässerökologischen und energetischen Gesichtspunkte erfassen und bewerten zu können. Dadurch sollte zudem die Grundlage für weitergehende Untersuchungen und die umweltökonomische Bewertung von Maßnahmen unter Einbeziehung der Umwelt- und Ressourcenkosten (externe Effekte) geschaffen werden.

Durchführung von Szenarienrechnungen

Wie bereits erwähnt, bedingen die sehr unterschiedlichen Rahmenbedingungen im Bereich von Wasserkraftanlagen (Stichworte: Leistungsfähigkeit, technische Ausstattung, räumliche Verhältnisse, wasserrechtliche Situation) besondere Anforderungen an den wasserwirtschaftlichen Vollzug. So ist insbesondere die genaue fachliche Ausgestaltung von ökologischen Verbesserungen in den verschiedenen Gesetzestexten nicht definiert, sondern den einzelnen Planungsvorhaben vorbehalten. Vor diesem Hintergrund galt es im Rahmen dieses Arbeitsschrittes die für die jeweiligen Anlagenstandorte resultierenden

¹ Die Ergebnisse wurden im Mai 2008 der verwaltungsinternen Arbeitsgruppe (AG) „Ökonomie“ übergeben und fanden Eingang in die ökonomischen Abschnitte des Maßnahmenprogramms und des Bewirtschaftungsplanes zur wirtschaftlichen Analyse und Bewertung der Wasserkraftnutzung.

energetischen und ökonomischen Auswirkungen der Restwasser (RW)- Szenarien „1/3 MNQ“, „1/2 MNQ“ und „keine RW-Abgabe“ zu ermitteln.

Darüber hinaus waren aufbauend auf den Daten der DB Wanderhindernisse und unter Berücksichtigung der aktuellen umweltökonomischen bzw. gewässerökologischen Zielsetzungen und Randbedingungen als ein weiteres Szenario Untersuchungen zu dem in Hessen verfügbaren technischen Wasserkraftpotenzial durchzuführen.

Wirtschaftliche Analyse des Einzelfalls

Bei den zuvor genannten Arbeitsschritten werden investive Maßnahmen, wie z. B. mögliche Umgestaltungsvarianten zur Verbesserung der gewässerökologischen Situation (Stichworte: Fischaufstiegsanlagen, Maßnahmen zum Fischschutz) und die damit einhergehenden Kosten, zunächst bewusst nicht berücksichtigt. Die Abschätzung der konkreten betriebswirtschaftlichen Auswirkungen möglicher Verbesserungsmaßnahmen ist jedoch ein wichtiger Faktor für die Realisierbarkeit und spätere Umsetzung. Folglich sollte auch im konkreten Einzelfall unter funktionalen, ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten eine nachvollziehbare Variantenanalyse durchgeführt werden. Der Baustein „wirtschaftliche Untersuchung des Einzelfalls“ zielte daher darauf ab, dass die späteren Anwender des zu entwickelnden Planungswerkzeuges die betriebswirtschaftlichen Auswirkungen verschiedener Planungsvarianten für jeden Wasserkraftstandort analysieren können.

Entwicklung und Implementierung des Planungswerkzeuges „WKA-Aspekte“

Wie bereits erläutert, ist es Ziel des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens neben den o. g. Analysen und Untersuchungen der hessischen Wasserwirtschaftsverwaltung einen Prototypen des Planungswerkzeuges „WKA-Aspekte“ zur Verfügung zu stellen. Hierdurch werden die Fach- und Vollzugsbehörden in die Lage versetzt, im Rahmen der Maßnahmenplanung bzw. von Genehmigungsverfahren für jeden Wasserkraftstandort nicht nur einen einfachen Leistungsplan zu erstellen, sondern auch die energetischen, betriebswirtschaftlichen und umweltökonomischen Auswirkungen verschiedener Planungsvarianten und gewässerökologischer Auflagen vergleichend zu hinterfragen. Aus diesem Grund wurden bereits die verschiedenen im Projektverlauf entstehenden Entwicklungsstufen des Planungswerkzeuges in der Wasserwirtschaftsverwaltung eingesetzt und getestet.

1.3 Projektstruktur und -bearbeitung

Die Projektleitung des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens „Wasserkraft und WRRL in Hessen“ wurde vom HMUELV, das gleichzeitig Auftraggeber der durchgeführten Untersuchungen ist, wahrgenommen. Dem FG Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Kassel oblag als Auftragnehmer die inhaltliche Projektbearbeitung. Diese wurde - wie in Abb. 1.1 veranschaulicht - durch eine Projektgruppe begleitet, in der Vertreter verschiedener Abteilungen des HMUELV (Oberste Wasserbehörde, Oberste Fischereibehörde sowie Energieabteilung), der bei den Regierungspräsidien (RP'n) angesiedelten Oberen Wasser- und Fischereibehörden und des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (HLUG) vertreten waren. Darüber hinaus wurde zur frühzeitigen Abstimmung der Arbeitsergebnisse ein projektbegleitender „Beirat“ etabliert. An diesem wurden zusätzlich zu den genannten Institutionen die Interessenverbände der Wasserkraft (Arbeitsgemeinschaft Hessischer Wasserkraftwerke (AHW) und Hessischer Landesverein zur Erhaltung und Nutzung von Mühlen e. V.), der Fischerei (Verband Hessischer Fischer) und des Naturschutzes beteiligt.

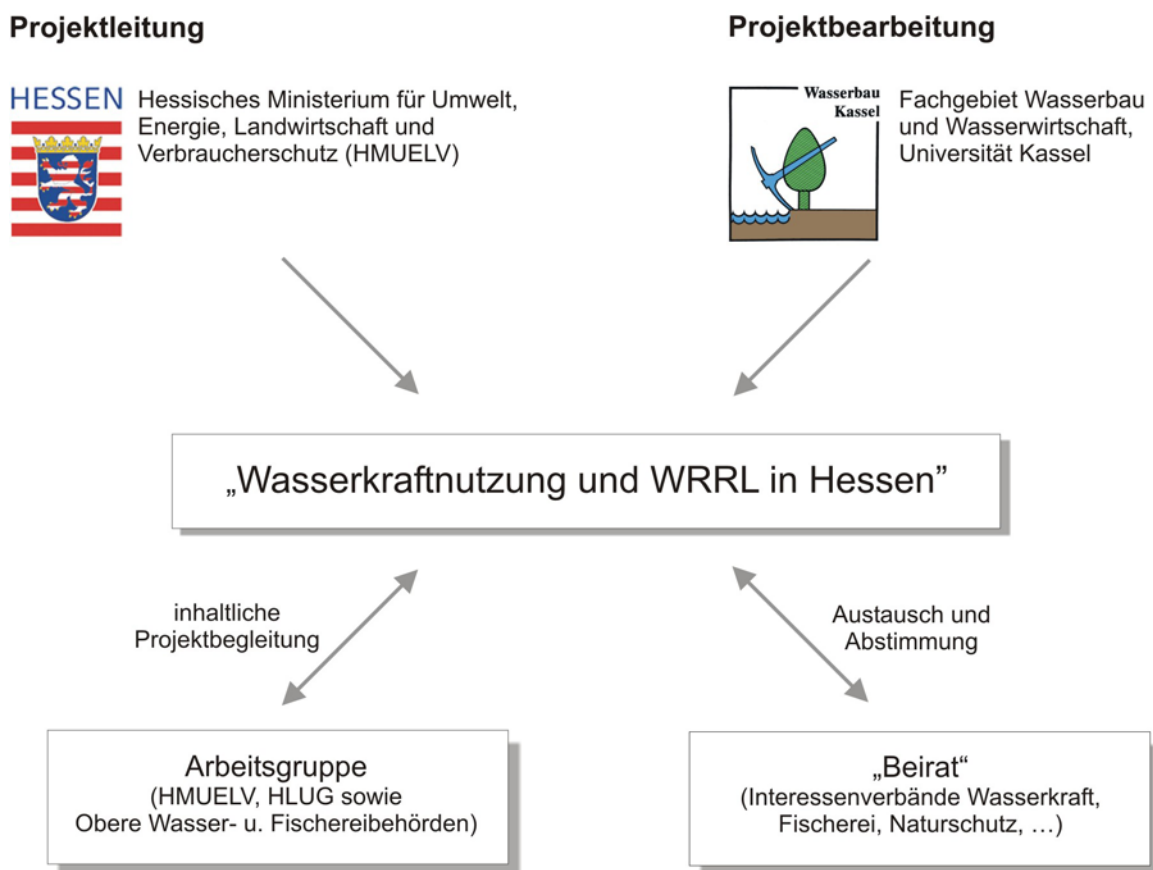


Abb. 1.1: Organisationsstruktur des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens „Wasserkraftnutzung und WRRL in Hessen“

Im Rahmen des Auftakterminals am 24. März 2009 wurde mit der projektbegleitenden Arbeitsgruppe die in den Kapiteln 3.1 und 3.2 näher erläuterte methodische Vorgehensweise zur Ergänzung und Plausibilisierung der Grundlagendaten vereinbart. Die entsprechenden Arbeitsschritte wurden im Laufe der Bearbeitung von den jeweils zuständigen Oberen Wasserbehörden durch diverse bilaterale Arbeitstreffen begleitet und unterstützt. Die daran anschließende Auswahl und gemeinsame Festlegung der zu berechnenden Restwasserszenarien erfolgte ebenso wie die Abstimmung der Methodik zur Ermittlung des Potenzials im Rahmen der zweiten Arbeitsgruppensitzung am 20. Oktober 2009. Eine weitergehende diesbezügliche Abstimmung fand beim Treffen des „Beirates“ am 11. Dezember 2009 statt. Darauf aufbauend konnten die vorläufigen Berechnungsergebnisse zu den Restwasserszenarien und der Potenzialermittlung der projektbegleitenden Arbeitsgruppe am 05. Februar 2010 vorgestellt werden. Bei all diesen Treffen wurde neben den inhaltlichen Komponenten zur Analyse der Wasserkraftnutzung in Hessen auch die jeweilige Weiterentwicklung des Planungswerkzeuges „WKA-Aspekte“ vorgestellt und abgestimmt. In diesem Kontext fanden parallel zu den AG-Treffen zudem zwei Testeinweisungen und -phasen statt, die in Kap. 6.2 dokumentiert sind.

Im vorliegenden Erläuterungsbericht werden die Datengrundlagen, die methodische Vorgehensweise sowie die ermittelten Kennzahlen zur Wasserkraftnutzung in Hessen dargestellt. Darüber hinaus enthält der Bericht eine zusammenfassende Beschreibung der Ansätze zur wirtschaftlichen Analyse des Einzelfalls und des Planungswerkzeuges „WKA-Aspekte“. Eine detaillierte Erläuterung der darin implementierten Berechnungsansätze und Funktionen sowie ein Tutorial zur Anwendung der Benutzeroberfläche sind im separaten Handbuch zur Arbeitshilfe enthalten.

2 DATENGRUNDLAGEN

2.1 Datenbank „Wanderhindernisse“

Als eine Grundlage für die Erstellung des Maßnahmenprogramms zur WRRL hat das Land Hessen in dem Zeitraum von Herbst 2006 bis Ende 2007 eine einheitliche und flächendeckende Erfassung der Wanderhindernisse an den WRRL-relevanten Fließgewässern, die in Hessen eine Gesamtlänge von etwa 8.250 km aufweisen, durchgeführt. Als Grundlage für diese Arbeiten diente eine von Fachleuten der hessischen Wasserwirtschafts- und Fischereiverwaltung entwickelte Datenbankanwendung auf Basis von MS Access (DB Wanderhindernisse), in die alle erhobenen Daten eingepflegt wurden.

Im Zuge der Kartierungen wurden sowohl die klassischen Querbauwerke (Wehre, Abstürze, Sohlenrampen und -gleiten, etc.) als auch Verrohrungen, Durchlässe und Massivsohlenabschnitte berücksichtigt. Zudem erfolgte - wie in Abb. 2.1 schematisch dargestellt - neben der Dokumentation der geometrischen Randbedingungen und der Bewertung der Auf- und Abwärtspassierbarkeit auch eine umfangreiche Sammlung von Informationen zu den jeweils identifizierten Nutzungen (vgl. [31]). Folglich bildet die DB Wanderhindernisse die zentrale Datengrundlage für die Analyse der hessischen Wasserkraftnutzung.

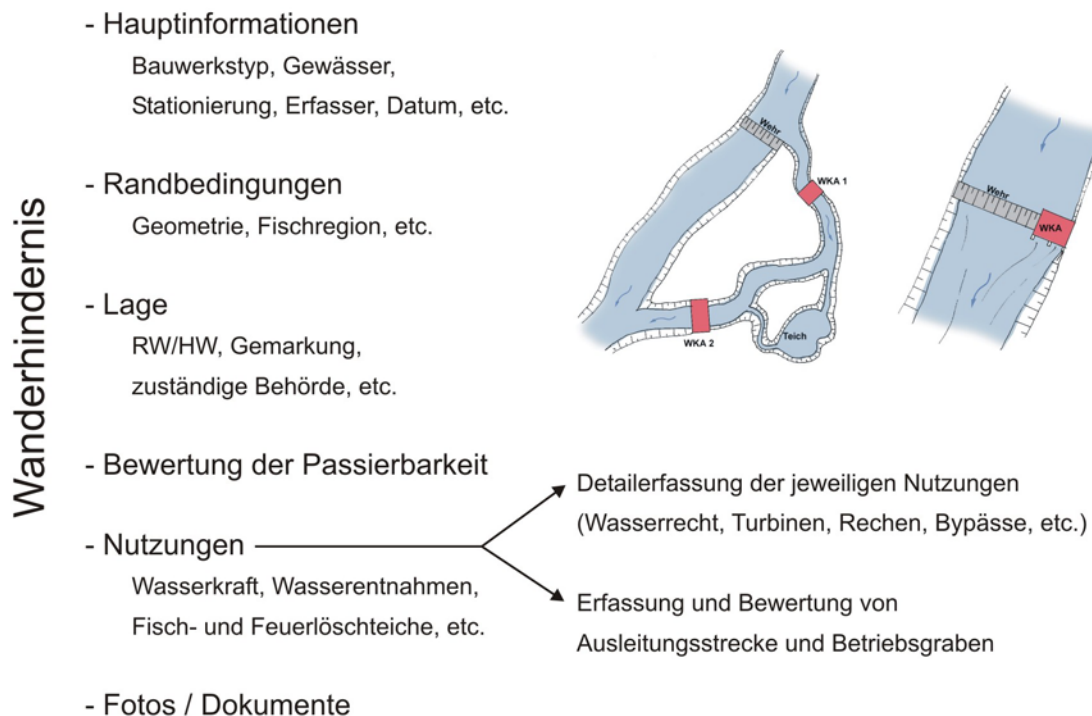


Abb. 2.1: Hierarchischer Aufbau der DB Wanderhindernisse (vgl. auch [31])

Die Bereitstellung der DB Wanderhindernisse (Version 3.6) erfolgte am 03.02.2009 durch das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG). Der übernommene Datensatz umfasste alle kartierten Gewässer mit Ausnahme des Mains und insgesamt 19.279 Wanderhindernisse. Inkl. den verknüpften Fotos und Lageplänen betrug der Speicherbedarf knapp 51 GByte (ca. 900 Verzeichnisse, ca. 52.000 Dateien).

2.2 Hydrologische Daten

Die Erfassung der hydrologischen Situation an den Wanderhindernissen war nicht Gegenstand der o. g. Querbauwerkskartierung. Die Kenntnis des Wasserdargebotes stellt jedoch eine zentrale Eingangsgröße für die Beurteilung eines Wasserkraftstandortes und die entsprechenden Leistungsplanberechnungen dar (vgl. Kapitel 3.3). Die Grundlage hierfür bildeten die folgenden Daten zu den hessischen Pegelanlagen:

- Lage (Gewässer-km) und Einzugsgebietsgröße
- statistische Hauptwerte (MNQ, MQ, ...)
- Jahresdauerlinien
- Jahresganglinien (in Einzelfällen für gezielte Nachrechnungen / Kalibrierungen)

Die Datenlieferung des HLUG vom 06.04.2009 enthielt Informationen zu den 108 Pegelstandorten, die vom Land Hessen betrieben werden. Zu 85 dieser Anlagen liegen neben den Stammdaten auch die Jahresdauerlinien vor, die für die nachfolgenden Arbeitsschritte ebenfalls übernommen und in das Planungswerkzeug eingepflegt wurden (vgl. Tab. 2.1).

Neben den landeseigenen Messstellen werden in Hessen von verschiedenen Wasserverbänden 42 Pegel, die meist der Steuerung von Talsperren und Hochwasserrückhaltungen dienen, betrieben (vgl. [25]). Eine entsprechende Datenanfrage ergab, dass aufgrund dieser Aufgabenstellung häufig keine Jahresdauerlinien oder W/Q-Beziehungen vorhanden sind sowie einige Pegel nicht durchgängig betrieben werden bzw. außer Betrieb genommen wurden. Dennoch konnten zu 13 dieser Pegelanlagen Jahresdauerlinien berücksichtigt werden. Darüber hinaus hat der Wasserverband (WV) Schwalm umfangreiche Abflussaufzeichnungen der Zu- und Ablaufpegel für die HRB Treysa-Ziegenhain, Heidelbach und die Antrifftalsperre für den Zeitraum 2001 - 2009 zur Verfügung gestellt.

Ergänzend hat die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) Daten zu ausgewählten Pegeln an Eder (Zu- und Ablauf Edertalsperre), Fulda und Main, die von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) betrieben werden, bereit gestellt. Weitere Informationen wurden dem Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch (DGJ) entnommen, so dass für die durchgeführten Untersuchungen die in Tab. 2.1 zusammengestellte Anzahl von Pegelstandorten herangezogen werden konnte.

Tab. 2.1: Anzahl der berücksichtigten Pegelstandorte

Kategorie	Landes- pegel	Verbands- pegel	Pegel des Bundes (WSV)	Summe
Anzahl Pegel	108	42	16	166
davon mit Jahresdauerlinie	86 ¹⁾	13 ¹⁾	16 ^{1, 2, 3)}	115

¹⁾ Datenlieferung des HLUg vom 06.04.2009

²⁾ Datenlieferung der BfG vom 02.02.2010

³⁾ Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch

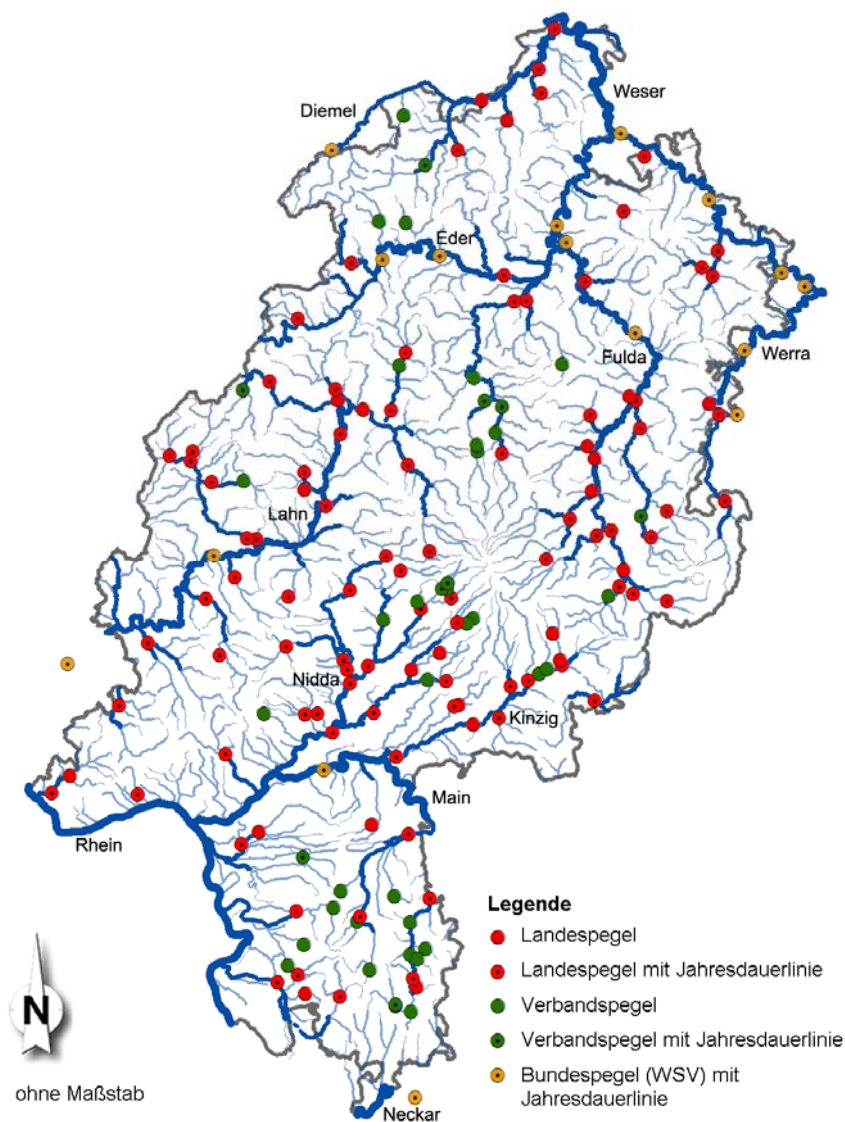


Abb. 2.2: Verteilung der Pegelstandorte

3 METHODISCHES VORGEHEN

3.1 Filterung der WKA-Datensätze

Zur weitergehenden Analyse der Wasserkraftnutzung in Hessen galt es zunächst, die Wasserkraftstandorte aus den über 19.000 in der DB Wanderhindernisse dokumentierten Querbauwerken herauszufiltern. Dabei war zu berücksichtigen, dass in der landesweiten Datenbank Wasserkraftanlagen über verschiedene Parameterkombinationen eingegeben bzw. abgebildet werden können, so dass in Abhängigkeit der abgefragten Datenbankfelder die Anzahl der gefilterten Anlagenstandorte deutlich variiert. Daher wurden zunächst in einem ersten Schritt fünf verschiedene Abfragen durchgeführt, um bei der Filterung möglichst alle in der DB Wanderhindernisse enthaltenen WKA-Standorte zu erfassen. Durch eine detaillierte Analyse und Kontrolle der jeweiligen Abfrageergebnisse konnten einzelne Datensätze identifiziert werden, die bei einer einfachen Filterung keine Berücksichtigung gefunden hätten. Bei diesen Datenbankeinträgen wurden einzelne Eingabefelder angepasst (z. B. Aktivierung des Optionsfeldes „Hauptinformation - Funktion - Wasserkraft“), um die WKA-Standorte durch eine einzelne Abfrageroutine selektieren zu können. Zudem wurden die Wasserkraftwerke am Main händisch ergänzt (5 Datensätze).

Aufbauend auf diesen Vorarbeiten erfolgte eine erneute Filterung der WKA-Datensätze aus der DB Wanderhindernisse mit der in Abb. 3.1 dokumentierten Abfrageroutine. Demnach müssen zur erfolgreichen Selektion eines Datensatzes in dem Formular „Hauptinformation“ die Eingabefelder „Funktion WKA“ und „Nutzung“ und in dem Unterformular „Nutzung“ die Option „WKA“ gleichzeitig aktiviert sein bzw. den Eintrag „ja“ enthalten.

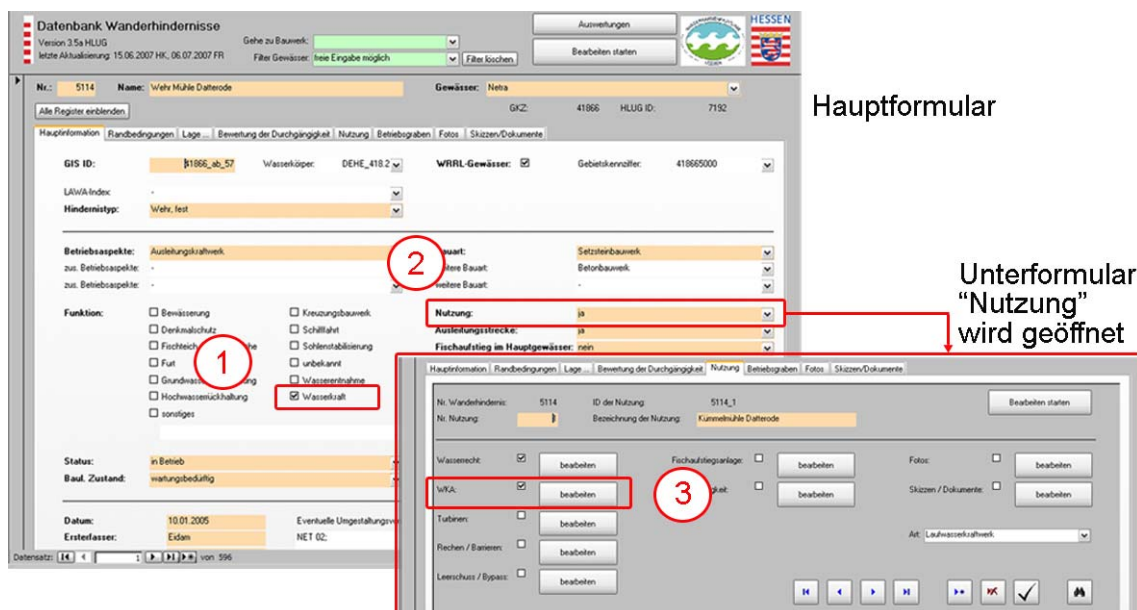


Abb. 3.1: Grafische Darstellung der Abfrageroutine zur Filterung der WKA-Datensätze aus der DB Wanderhindernisse

Als Ergebnis der o. g. Arbeitsschritte wurden aus der DB Wanderhindernisse 596 Wanderhindernisse mit 629 Wasserkraftanlagen gefiltert, die in 627 Laufwasserkraftwerke und zwei Pumpspeicherkraftwerke² unterschieden werden können. Aufgrund der geringen Anzahl der Pumpspeicherkraftwerke und deren besonderen Betriebsbedingungen sowie der in Bezug auf Umsetzungsaspekte der WRRL geringen Relevanz, wurden für die durchgeführten Untersuchungen nur die Laufwasserkraftwerke berücksichtigt. Durch die fortlaufende Plausibilisierung und Ergänzung der einzelnen Datensätze (vgl. Kap. 3.2) ergaben sich während der Projektlaufzeit in Bezug auf die Gesamtanzahl der Wasserkraftanlagen in Hessen geringfügige Änderungen. Die resultierenden Ergebnisse sowie deren Interpretation sind dem Kapitel 4.1.1 zu entnehmen.

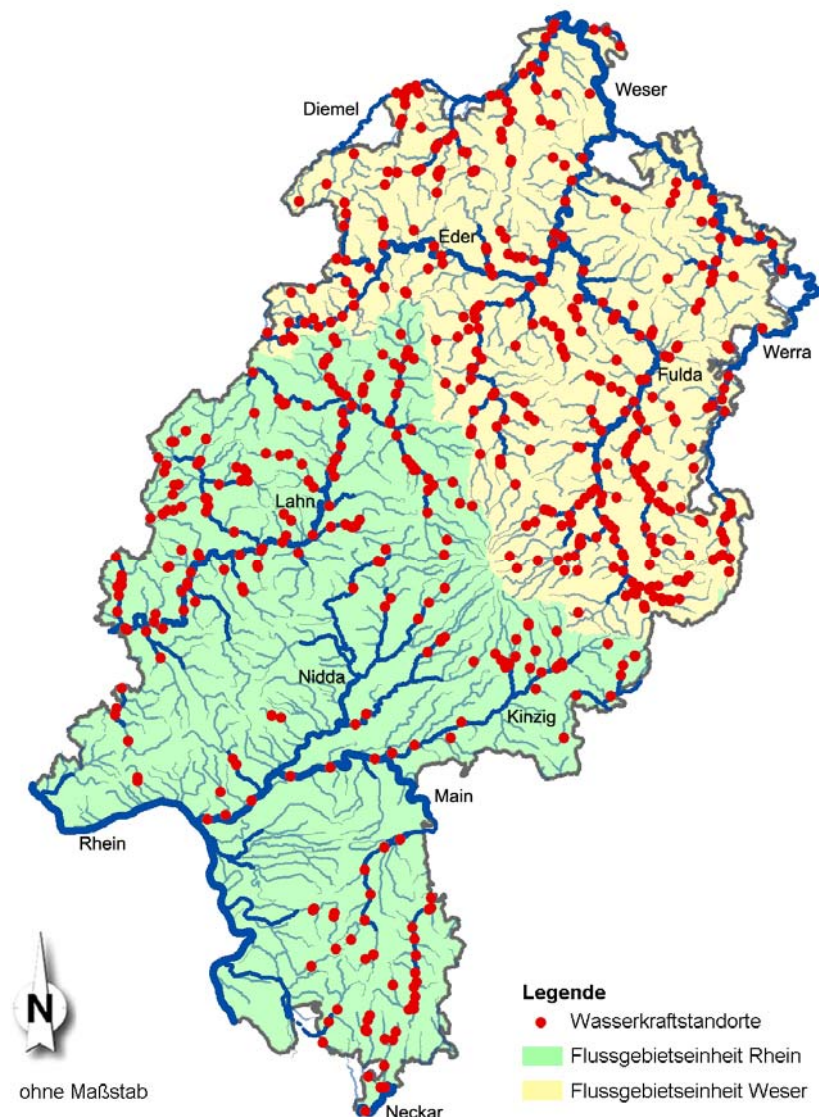


Abb. 3.2: Verteilung der Wasserkraftanlagen an den hessischen Fließgewässern (dargestellt sind die aus der DB Wanderhindernisse gefilterten WKA-Standorte)

² Hierbei handelt es sich um die beiden Pumpspeicherkraftwerke Waldeck 1 und 2 am Edersee.

3.2 Ergänzung der WKA-Datensätze

3.2.1 Ergänzung und Plausibilisierung der technischen Daten

Wie in Kapitel 3.3 ausführlich erläutert, ist für die energetischen Berechnungen die Kenntnis bestimmter Parameter der zu untersuchenden WKA-Standorte von besonderer Bedeutung. Zu den wichtigsten technischen Kenngrößen einer Anlage zählen

- der Ausbaudurchfluss (Q_A),
- die Ausbaufallhöhe (h_f),
- die Ausbauleistung (P_A) und
- das Jahresarbeitsvermögen (E_A).

Die Datendichte dieser vier Kennzahlen bei den aus der DB Wanderhindernisse gefilterten „Ur-Datensätzen“ verdeutlicht, dass vor Durchführung weiterer Arbeitsschritte die Detailinformationen zu den hessischen WKA-Standorten weiter zu verdichten waren. So wurden durch die landesweite Wanderhinderniserfassung gemäß Abb. 3.3 nur für 147 Wasserkraftanlagen, dies entspricht einem Anteil von 23 %, alle vier o. g. Parameter und für 260 WKA-Standorte (41 %) noch drei dieser Kenngrößen erfasst.

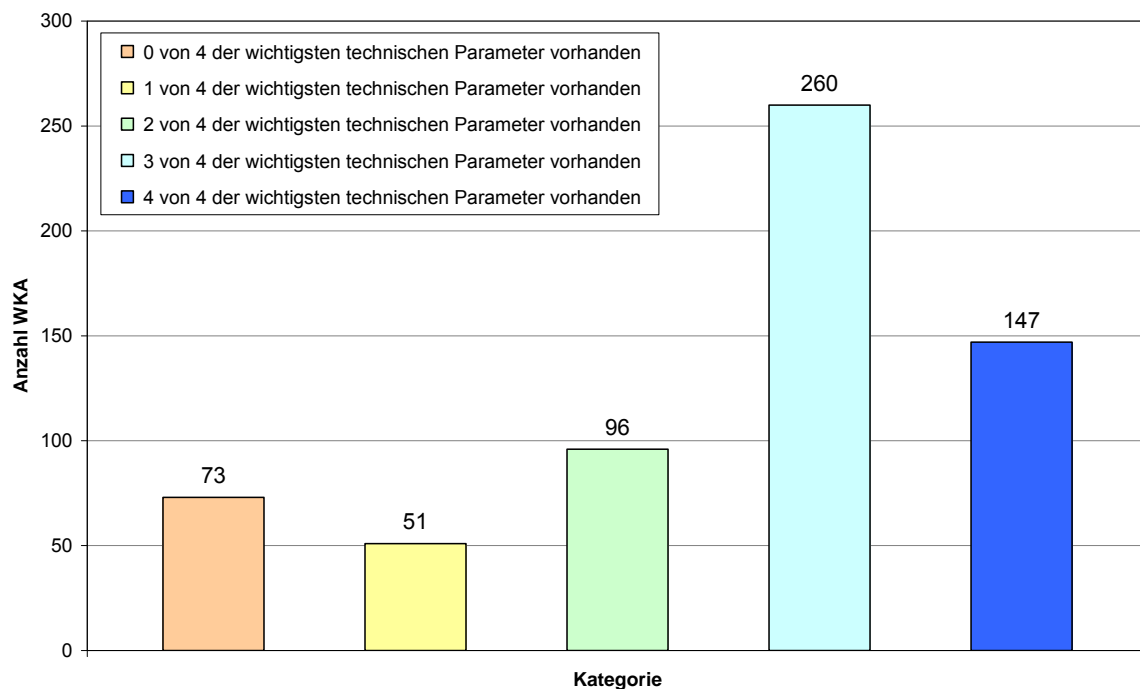


Abb. 3.3: Datendichte der vier Parameter Q_A , h_f , P_A und E_A bei den Datensätzen zu den 627 Laufwasserkraftwerken (nach Filterung der DB Wanderhindernisse)

Zur Ergänzung der fehlenden technischen Daten wurde in enger Abstimmung mit der projektbegleitenden Arbeitsgruppe folgendes zweistufiges Vorgehen vereinbart und umgesetzt:

- Händische Datenergänzung für Wasserkraftanlagen mit einer Ausbauleistung > 50 kW auf Basis einer zusätzlichen Wasserbuchrecherche durch das FG Wasserbau und Wasserwirtschaft und der Unterstützung der Oberen Wasserbehörden.
- Automatisierte Datenergänzung durch Hochrechnung der anschließend noch fehlenden Kenngrößen auf Basis der vorhandenen Parameter.

Eine vollständige Nachkartierung bzw. Neuerfassung fehlender Daten sollte aufgrund des damit verbundenen Aufwandes im Rahmen dieses Projektes nicht durchgeführt werden.

Die Recherchearbeiten zur „händischen“ Datenergänzung konzentrierten sich sowohl auf die Wasserkraftanlagen mit einer Ausbauleistung > 50 kW und einer unzureichenden Dokumentation der technischen Parameter als auch auf eine Verifizierung der Daten zu den WKA-Standorten an den größeren und potenzialreicheren Fließgewässern (z. B. Werra, Fulda, Eder, Diemel und Lahn). Durch diese Vorgehensweise sollte gewährleistet werden, dass insbesondere die Datensätze der leistungsfähigeren Wasserkraftanlagen aussagekräftig und belastbar sind. Insgesamt wurden im Zuge der „händischen“ Datenergänzung zu 186 WKA-Standorten zusätzliche Informationen erhoben und vorhandene Datensätze plausibilisiert. Wie der Tab. 3.1 zu entnehmen ist, konnten für diese Wasserkraftanlagen in Bezug auf die vier o. g. technischen Parametern Q_A , h_f , P_A und E_A 389 Einträge ergänzt bzw. aktualisiert werden.

Darüber hinaus wurden die Inhalte 1.466 weiterer Datenfelder überarbeitet. Dazu zählen beispielsweise die Ergänzung von zusätzlich recherchierten wasserrechtlichen Informationen und Turbinendaten sowie die Änderung der Bezeichnung von diversen Wasserkraftanlagen. Letzteres war erforderlich, da im Rahmen der Wanderhinderniserfassung die Benennung zahlreicher Wehre und Wasserkraftanlagen von den jeweiligen Kartierern lediglich durch interne Kodierungen und/oder den Eintrag „WKA“ erfolgte. Hieraus resultierte eine sehr schlechte Lesbarkeit und Zuordnung dieser Datensätze, gerade dieser Aspekt ist jedoch für die weitergehenden Auswertungen von zentraler Bedeutung.

Tab. 3.1: Durch die „händische“ Ergänzung aktualisierte Daten (Stand: Juli 2011)

RP	Anzahl der Ergänzungen und Aktualisierungen		
	WKA-Standorte	Datenfelder	
		insgesamt	davon techn. Parameter
RP Kassel	66	499	127
RP Gießen	69	610	151
RP Darmstadt	51	746	111
Summe	186	1.855	389

Durch die mit der Datenergänzung einhergehende Plausibilisierung der WKA-Datensätze und fallweisen Detailrecherche konnten vier zusätzliche und zuvor nicht berücksichtigte Wasserkraftanlagen identifiziert werden. Zudem wurden neun Standorte aus der Zusammenstellung gelöscht, da an diesen zum Zeitpunkt der Überprüfung keine Wasserkraftnutzung mehr erfolgte oder die Anlagen doppelt erfasst waren. Hieraus ergibt sich eine Gesamtanzahl von 621 Laufwasserkraftanlagen in Hessen (vgl. Kap. 4.1).

Die erzielte quantitative Verbesserung der Datengrundlagen wird durch Abb. 3.4 dokumentiert. So konnte die Anzahl der Datensätze mit keiner oder nur einer Information zu einer der Parameter Q_A , h_f , P_A bzw. E_A von 124 auf 67 reduziert werden. Bei diesen noch wenig dokumentierten Standorten handelt es sich fast ausschließlich um Kleinanlagen mit einem geringen Jahresarbeitsvermögen. Gleichzeitig hat der Anteil der Datensätze mit drei bzw. vier entsprechenden Einträgen um etwa 12 % zugenommen und beträgt nun 78 % (= 486 Datensätze). Darüber hinaus erfolgten auch qualitative Verbesserungen vorhandener Daten, die u. a. auch auf zahlreichen Hinweisen der Oberen Wasserbehörden beruhen.

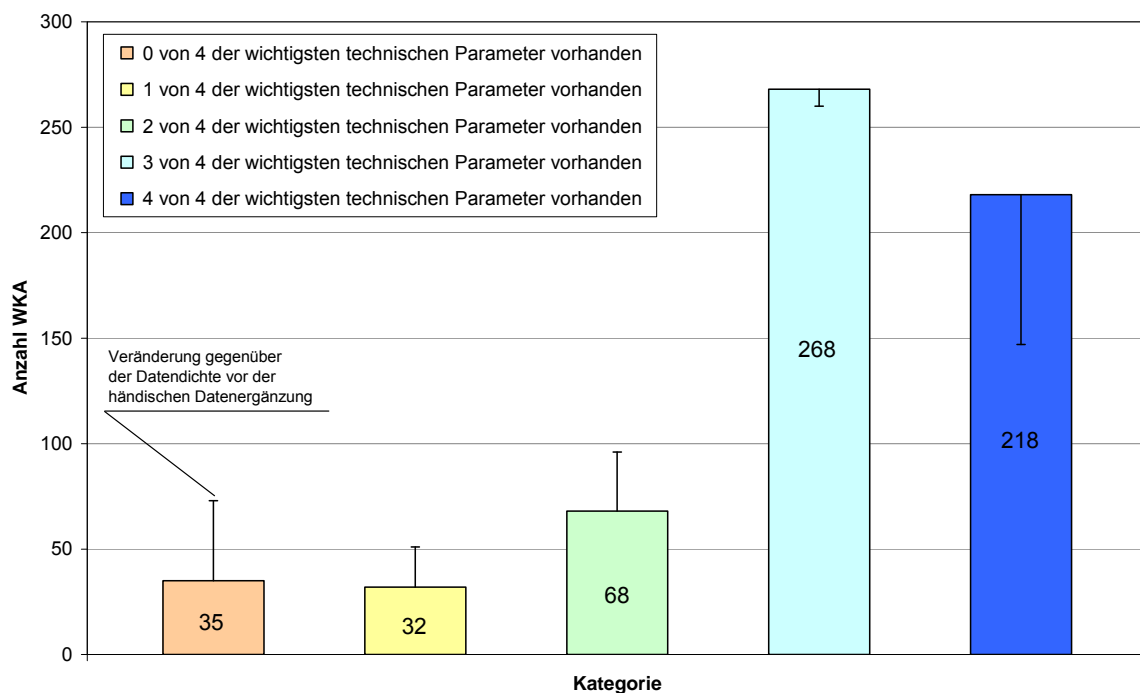


Abb. 3.4: Datendichte der vier Parameter Q_A , h_f , P_A und E_A bei den Datensätzen zu den 621 Laufwasserkraftwerken (nach händischer Ergänzung, Stand: Juli 2011)

Die beschriebenen Ergänzungen und Änderungen wurden in dem aus der DB Wanderhindernisse herausgefilterten WKA-Datensatz vorgenommen (vgl. Kapitel 3.1) sowie zur Übernahme in die landesweite Datenbank getrennt für die jeweils zuständigen Oberen Wasserbehörden dokumentiert.³

Im Anschluss an die „händische“ Datenergänzung und als Grundlage für die Durchführung der überschlägigen energetischen Berechnungen galt es, zur Vervollständigung der technischen Kenngrößen Q_A , h_f , P_A und E_A die jeweils noch nicht bekannten Eingangsgrößen abzuschätzen bzw. auf Basis der vorhandenen Parameter hochzurechnen. Diese „automatisierte“ Datenergänzung basiert auf den in Kapitel 3.3 erläuterten Zusammenhängen und deren Umstellung nach dem jeweils gesuchten Kennwert. Für die damit verbundene Hochrechnung wurden pauschal ein Anlagenwirkungsgrad von 80 % und eine Auslegung von 4.500 Volllaststunden pro Jahr angesetzt. War aufgrund zu wenig bekannter Eingangsgrößen auch diese Rückrechnung nicht möglich, wurden bei Bedarf zusätzlich der Ausbaudurchfluss Q_A und/oder die Ausbaufallhöhe h_f abgeschätzt. Dazu wurde der in der DB Wanderhindernisse vorhandene Mittelwasserabfluss MQ an dem jeweiligen WKA-Standort vereinfachend als Ausbaudurchfluss Q_A angesetzt. Als Ausbaufallhöhe h_f wurde die am Wehr kartierte und ebenfalls in der Datenbank dokumentierte Wasserspiegeldifferenz übernommen. Die hieraus resultierende Berechnungsmatrix ist in Tab. 3.2 dargestellt und wurde in das Planungswerkzeug „WKA-Aspekte“ (vgl. Kap. 6) implementiert.

Dieses Vorgehen ermöglicht es, bei jedem Import neuer Datensätze in das Planungswerkzeug, die Vollständigkeit der technischen Parameter Q_A , h_f , P_A und E_A zu prüfen und ggf. auf Basis dieses Schemas zu ergänzen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Hochrechnung der fehlenden Daten und insbesondere die Abschätzung von Ausbaudurchfluss Q_A und Ausbaufallhöhe h_f mit Unsicherheiten behaftet ist. So kann davon ausgegangen werden, dass - gerade bei Ausleitungskraftwerken - die Fallhöhe am Krafthaus größer als am Wehrstandort sein dürfte und somit durch die o. g. Methode eine Unterschätzung der realen Verhältnisse erfolgt. Andererseits verfügen gerade die kleineren Wasserkraftanlagen häufig über einen Ausbaudurchfluss, der kleiner als der jeweilige Mittelwasserabfluss am Standort ist, so dass in diesen Fällen die wirklichen Verhältnisse überschätzt werden. Folglich sind bei der Beurteilung der Berechnungsergebnisse für einzelne Anlagen Informationen zur Qualität bzw. Herkunft der technischen Eingangsgrößen von besonderer Bedeutung. Aus diesem Grund und zur Gewährleistung einer größtmöglichen Transparenz wird in dem WKA-Datensatz, der die Basis für die durchgeführten energetischen Berechnungen darstellt und der der Wasserwirtschaftsverwaltung des Landes Hessen mit dem Planungswerkzeug zur Verfügung gestellt wird, für jeden technischen Parameter angegeben, ob dieser der DB Wanderhindernisse bzw. der händischen Datenergänzung oder der automatisierten Datenergänzung entstammt und somit hochgerechnet bzw. abgeschätzt wurde. Weitergehende Informationen zu den im Planungswerkzeug integrierten Möglichkeiten der Datenergänzung, -plausibilisierung und -kennzeichnung können dem Handbuch zum Tool entnommen werden.

Da durch die DB Wanderhindernisse und die „händische“ Datenergänzung die Datenlage zu den technischen Kenngrößen der größeren Wasserkraftanlagen in Hessen wie bereits

³ Im Rahmen der projektbegleitenden Arbeitsgruppentreffen wurde vereinbart, dass die Eingabe der Ergänzungen und Änderungen in das aktuelle Gewässerstrukturgüteinformationssystem des Landes Hessen (GESIS 2), in das die DB Wanderhindernisse integriert wurde, händisch durch die jeweils zuständigen und schreibberechtigten Oberen Wasserbehörden erfolgt.

erwähnt als recht gut einzustufen ist, wurde die „automatisierte“ Datenergänzung vorwiegend für die wenig dokumentierten Kleinanlagen durchgeführt. Trotz der erwähnten und mit den „automatisierten“ Ergänzungsroutinen verbundenen Unsicherheiten im Einzelfall, dürften diese Unwägbarkeiten für die auf das Land Hessen bezogenen Gesamtergebnisse eine relativ geringe Bedeutung haben, da die kleinen WKA-Standorte aufgrund ihres geringen Jahresarbeitsvermögens nur einen kleinen Anteil an der Gesamtstromerzeugung aus Wasserkraft in Hessen verfügen (vgl. Kap. 4.1.2).

Zusammenfassend gewährleistet die gewählte Vorgehensweise zur Ergänzung der technischen Daten somit eine fundierte Dokumentation der leistungsfähigen Wasserkraftwerke, liefert erste Hilfsgrößen für die weniger bekannten Standorte und ermöglicht zudem landesweite Auswertungen unter Berücksichtigung aller hessischen Wasserkraftanlagen.

Tab. 3.2: Matrix zur „automatisierten“ Datenergänzung

In der DB vorhandene technische Daten		für die Erstellung der Leistungspläne benötigte technische Daten			
		Ausbau-durchfluss	Ausbau-fallhöhe	Ausbau-leistung	Jahresarbeits-vermögen
1	Q_A, h_f, P_A, E_A	-	-	-	-
2	Q_A, h_f, P_A	-	-	-	$E_A = P_A * t$
3	Q_A, h_f, E_A	-	-	$P_A = \rho * g * Q_A * h_f * \eta$	-
4	Q_A, P_A, E_A	-	$h_f = P_A / \rho * g * Q_A * \eta$	-	-
5	h_f, P_A, E_A	$Q_A = P_A / \rho * g * h_f * \eta$	-	-	-
6	Q_A, h_f	-	-	$P_A = \rho * g * Q_A * h_f * \eta$ (1)	$E_A = P_A * t$ (2)
7	Q_A, P_A	-	$h_f = P_A / \rho * g * Q_A * \eta$ (1)	-	$E_A = P_A * t$ (1)
8	Q_A, E_A	-	$h_f = P_A / \rho * g * Q_A * \eta$ (2)	$P_A = E_A / t$ (1)	-
9	h_f, P_A	$Q_A = P_A / \rho * g * h_f * \eta$ (1)	-	-	$E_A = P_A * t$ (1)
10	h_f, E_A	$Q_A = P_A / \rho * g * h_f * \eta$ (2)	-	$P_A = E_A / t$ (1)	-
11	P_A, E_A	Q_A schätzen (1)	h_f schätzen (2)	-	-
12	Q_A	-	h_f schätzen (1)	$P_A = \rho * g * Q_A * h_f * \eta$ (2)	$E_A = P_A * t$ (3)
13	h_f	Q_A schätzen (1)	-	$P_A = \rho * g * Q_A * h_f * \eta$ (2)	$E_A = P_A * t$ (3)
14	P_A	Q_A schätzen (1)	h_f schätzen (2)	-	$E_A = P_A * t$ (3)
15	E_A	Q_A schätzen (1)	h_f schätzen (2)	$P_A = E_A / t$ (3)	-
16	Keine Angaben	Q_A schätzen (1)	h_f schätzen (2)	$P_A = \rho * g * Q_A * h_f * \eta$ (3)	$E_A = P_A * t$ (4)

Legende:

t Volllaststunden [h/a], pauschal mit 4.500 h angesetzt

η Gesamtwirkungsgrad [-], pauschal mit 0,8 angesetzt

(1), (2), ... Reihenfolge der Arbeitsschritte

3.2.2 Abbildung des Wasserdargebotes

Als Grundlage für die energetischen Berechnungen war es das Ziel, die hydrologischen Randbedingungen für möglichst viele WKA-Standorte direkt über eine Zuordnung der in Kapitel 2.2 dokumentierten Pegelmessstellen abzubilden. Dazu wurden die Jahresdauerlinien der jeweils zugeordneten Pegel durch lineare Interpolation der Einzugsgebietsgrößen auf den Anlagenstandort umgerechnet, um Aussagen über die dortigen Abflussverhältnisse und das statistisch mittlere Wasserdargebot zu ermöglichen (vgl. Abb. 3.5).

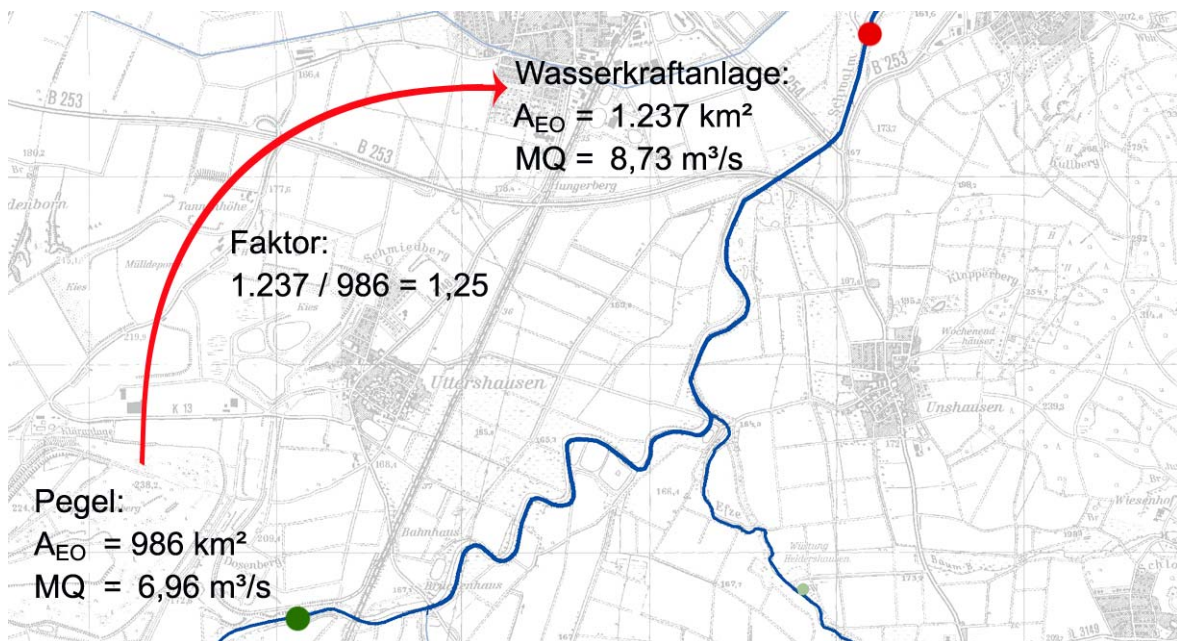


Abb. 3.5: Beispiel für das Vorgehen bei der Zuordnung und Umrechnung der Pegeldaten auf die WKA-Standorte (Kartenhintergrund (TK25): Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation)

Dieses Vorgehen konnte für 333 Wasserkraftanlagen, dies entspricht einem Anteil von 53 %, umgesetzt werden. Zahlreiche WKA-Standorte befinden sich jedoch an kleineren Gewässern, an denen keine Messstellen betrieben werden und für die eine direkte Zuordnung und Umrechnung einzelner Pegeldaten folglich mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Zur Abschätzung des Wasserdargebotes für diese kleinen Wasserkraftanlagen konnte auf einen Ansatz zur Regionalisierung und Typisierung der Abflusscharakteristika der hessischen Fließgewässer zurückgegriffen werden, der Mitte der neunziger Jahre an der TU Darmstadt erarbeitet wurde und in Hessen u. a. auch als Grundlage für die Ermittlung und Festsetzung der Mindestwassermengen in Ausleitungsstrecken herangezogen wird (vgl. [26] und [38]). Dazu wurden in einem ersten Schritt die umhüllenden Jahresdauerlinien der seinerzeit eingeführten Abflusstypen I und II digitalisiert. Anschließend konnten die aktuellen Jahresdauerlinien von 101 Pegeln einer dieser beiden Abflusstypen zugeordnet und wie in Abb. 3.6 dargestellt zwei mittlere Jahresdauerlinien ermittelt werden. Demnach basiert die für den Abflusstyp I neu generierte mittlere Jahresdauerlinie auf 70 Pegeln und die des Abflusstyps II auf 31 Pegelstandorten.

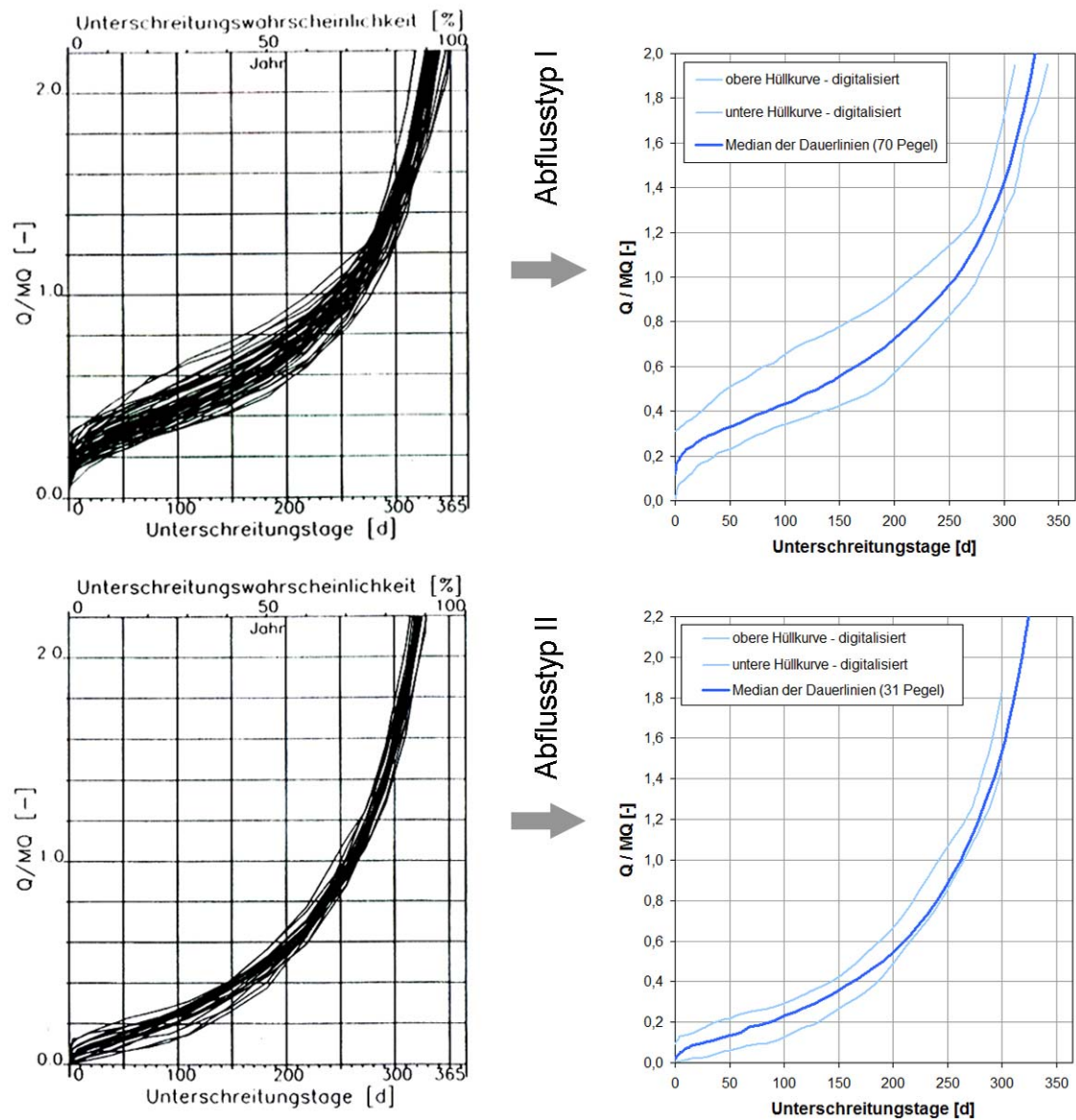


Abb. 3.6: Ermittlung der mittleren Abflussdauerlinien für die beiden Abflusstypen I und II (rechts im Bild) auf Basis der Abflusscharakteristika der hessischen Fließgewässer nach [38] (links im Bild)

Darauf aufbauend erfolgte die Zuordnung der einzelnen Wasserkraftanlagen zu einem der beiden Abflusstypen in Abhängigkeit des Verhältnisses von MQ zu MNQ am jeweiligen Standort und die Umrechnung der entsprechenden mittleren Abflussdauerlinie gemäß der in Abb. 3.7 dokumentierten Vorgehensweise. Die jeweiligen Angaben zu MQ, MNQ und A_{EO} wurden der DB Wanderhindernisse, in der jedem Querbauwerk diese Kennwerte aus dem gewässerkundlichen Flächenverzeichnis des Landes Hessen zugewiesen sind, entnommen. Der Grenzwert von $MQ/MNQ = 5,55$ entstammt dem hessischen Verfahren zur Ermittlung der Mindestwassermenge in Ausleitungsstrecken (vgl. [38] und [34]).

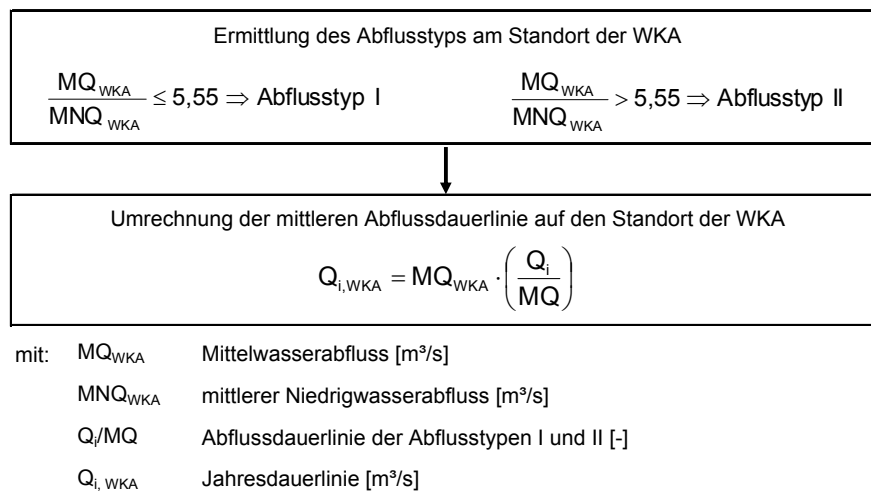


Abb. 3.7: Umrechnung der mittleren Abflusstypendauerlinien auf die WKA-Standorte

Auf diese Weise wurde als Grundlage für die energetischen Berechnungen das Wasserdargebot für 278 Wasserkraftanlagen abgeschätzt. Darüber hinaus sind im Rahmen der Projektbearbeitung aufgrund örtlicher Besonderheiten für 10 WKA-Standorte individuelle Jahresdauerlinien erstellt worden. Für eine solche Situation können beispielhaft die Wasserkraftanlagen an der Unteren Eder unterhalb der Schwalmündung genannt werden, da sich hier die hydrologische Situation durch den deutlich oberhalb der Einmündung gelegenen Ederpegel Fritzlar nicht zufriedenstellend abbilden lässt. Zur Berücksichtigung der in diesem Fall relevanten Einzugsgebiete zwischen Pegelstandort und untersuchten Wasserkraftanlagen war eine Kombination verschiedener Pegeldauerlinien erforderlich. Somit ergibt sich zusammenfassend die in Tab. 3.3 dargestellte Verteilung der verschiedenen Datenquellen zur Abbildung der Abflussverhältnisse an den 621 hessischen Wasserkraftanlagen. Alle verwendeten hydrologischen Eingangsdaten, generierten Jahresdauerlinien sowie weitergehende Detailinformationen sind im Planungswerkzeug „WKA-Aspekte“ hinterlegt sowie noch einmal als separater Datensatz dokumentiert.

Tab. 3.3: Datenquellen zur Ermittlung des Wasserdargebotes an den WKA-Standorten

Abbildung des Wasserdargebotes über	WKA-Standorte	
	Anzahl	Prozent
Landespegel	275	44%
Bundespegel	34	5%
Verbandspegel	24	4%
Hilfspegel (Umrechnung der Abflussdauerlinientypen I und II)	278	45%
Hilfspegel ("individuelle" Vorgabe der Jahresdauerlinie)	10	2%
Summe	621	100%

3.2.3 Ergänzung weiterer Informationen

Wie in Kap. 3.2.1 angedeutet, wurden neben der Ergänzung und Plausibilisierung der technischen Daten und der Zuordnung der hydrologischen Kenngrößen im Rahmen der Projektbearbeitung zusätzliche Informationen zu den WKA-Standorten erhoben. Dazu zählen neben der punktuellen Aktualisierung wasserrechtlicher Informationen, die Änderung der Bezeichnung diverser Wasserkraftanlagen und das Hinzufügen aktueller Fotos sowie die Ermittlung der Längen von Ausleitungsstrecken und Betriebsgräben.

Da die Eingabe der Längen von Unter- und Obergräben in der DB Wanderhindernisse kein „Pflichtfeld“ darstellt, wurden entsprechende Informationen bei der Ersterfassung nur sehr heterogen dokumentiert. Zudem enthält die DB Wanderhindernisse kein Datenfeld für die Längen der Ausleitungsstrecken, so dass diese bei der Kartierung grundsätzlich nicht erfasst wurden. Beide Kenngrößen sind jedoch für die Planung von gewässerökologischen Verbesserungsmaßnahmen von besonderer Bedeutung, zumal in Hessen etwa 90% der Anlagen als Ausleitungskraftwerke zu klassifizieren sind. Aus diesem Grund wurden sowohl die Ausleitungsstrecken als auch die Ober- und Untergräben auf Basis von Luftbildern und Topographischen Karten digitalisiert und die jeweiligen Längen grob ermittelt. Da die Verläufe der Betriebsgräben bei den Kleinanlagen aus den genannten Kartenwerken nicht immer hervorgehen, sind die entsprechenden Längenangaben im Einzelfall mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Dennoch lassen sich aus den ermittelten Werten Aussagen zur generellen Längenverteilung der Ausleitungsstrecken und Betriebsgräben an den hessischen Wasserkraftanlagen ableiten (vgl. Kap. 4.1.3).

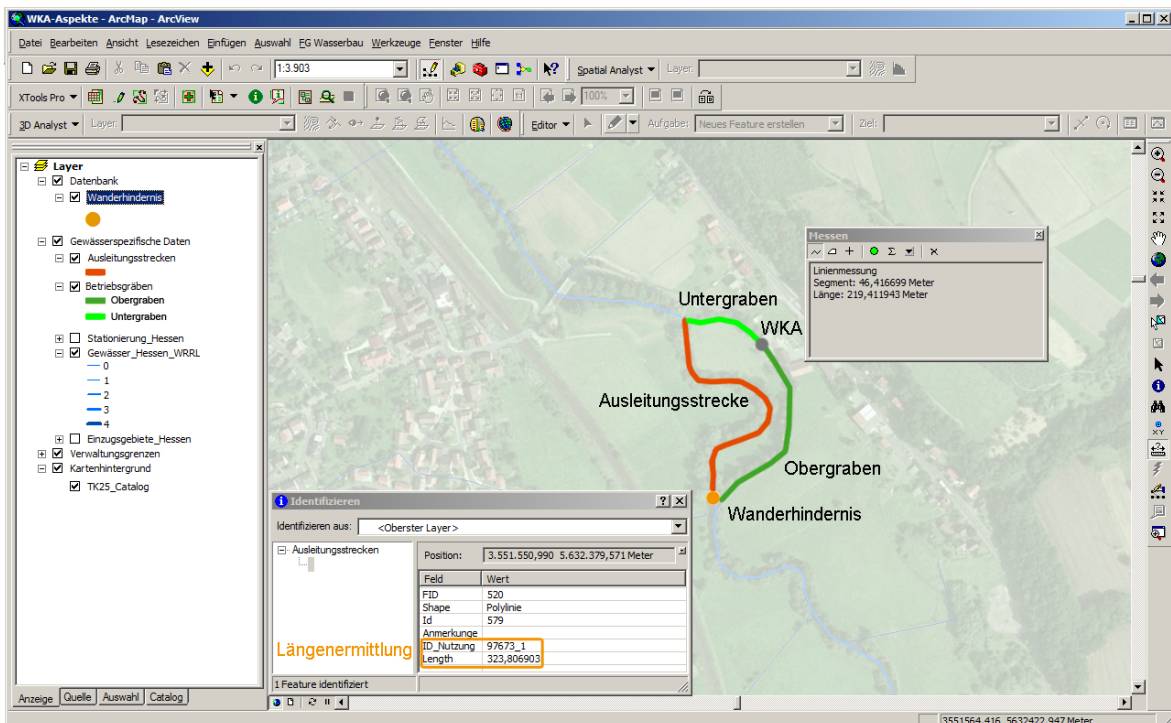


Abb. 3.8: Ermittlung der Längen von Ausleitungsstrecken und Betriebsgräben durch GIS-basierte Digitalisierungen und Abfragen

3.3 Energetische Berechnungen

Zur Abschätzung der ökonomischen Auswirkungen, die mit den in Kapitel 4.2 diskutierten Restwasserszenarien einhergehen, sind energetische Berechnungen zum jeweiligen Leistungsvermögen der hessischen Wasserkraftanlagen erforderlich. Zudem bilden diese Leistungsplanberechnungen auch die Grundlage für die wirtschaftliche Bewertung von gewässerökologischen und technischen Verbesserungsmaßnahmen im Einzelfall.

Die Ermittlung der elektrischen Leistung basiert dabei auf folgendem Zusammenhang:

$$P(t) = \rho \cdot g \cdot (Q(t) - Q_{RW}(t)) \cdot (h_f(t) - h_v) \cdot \eta_T(t) \cdot \eta_A$$

Aufbauend darauf ergibt sich das Jahresarbeitsvermögen aus dem Integral der Leistung über den Zeitraum von einem Jahr:

$$E_A = \int P(t) \cdot \Delta t$$

mit:

P	elektrische Leistung [kW]
E _A	Jahresarbeitsvermögen [kWh]
ρ	Dichte des Wassers [kg/m ³] = 1.000 kg/m ³
g	Erdbeschleunigung [m/s ²] = 9,81 m/s ²
Q	Durchfluss [m ³ /s]
Q _{RW}	Restwasserabgabe [m ³ /s]
h _f	Fallhöhe [m]
h _v	hydraulische Verluste [m]
η _T	Wirkungsgrad der Turbine [-]
η _A	Wirkungsgrad der Anlage / sonst. Verluste (Generator, Getriebe, etc.) [-]

Die Dichte des Wassers ρ und die Erdbeschleunigung g sind dabei von der Betriebssituation unabhängige und konstante Größen. Im Planungswerkzeug „WKA-Aspekte“, mit dem

die jeweiligen Szenarienrechnungen durchgeführt wurden, wird der jahreszeitlich schwankende Abfluss Q als Funktion des - gegebenenfalls um die Restwasserabgabe Q_{RW} - verminderten Wasserdarabotes und der sich daraus ergebenden Turbinenbeaufschlagung ausgedrückt. Die Fallhöhe h_f kann wahlweise als Funktion aus Abfluss und Wasserstand oder als konstante Größe berücksichtigt werden. Abzüglich der als konstanten Wert anzugebenden hydraulischen Verluste h_v , die beispielsweise von der Anströmung und/oder dem Rechen abhängig sind, resultiert die jeweilige Netto-Fallhöhe. Der Turbinenwirkungsgrad η_T ist abhängig vom installierten Maschinentyp und deren Beaufschlagung. Zur Berücksichtigung dieser wichtigen Randbedingung wurden typische Verläufe des Turbinenwirkungsgrades der Fachliteratur ([22]) entnommen und den Berechnungen zu Grunde gelegt. Darüber hinaus wird ein Wirkungsgrad für die restliche Anlage η_A definiert, durch den die Verluste durch Getriebe, Generator, etc. in Ansatz gebracht werden können. Wird die so ermittelte und nach Unterschreitungshäufigkeit geordnete Leistung P an einem Wasserkraftanlagenstandort über die zugehörige Unterschreitungszeit integriert, ergibt sich das Jahresarbeitsvermögen E_A .

Bei den Leistungsplanberechnungen für die 621 hessischen Wasserkraftanlagen resultieren gewisse Unschärfen aus nicht vorliegenden Detailinformationen zu den eingesetzten Turbinen und deren Steuerung, den Fallhöhen-Abfluss-Beziehungen sowie den sonstigen anzusetzenden Verlustbeiwerten. Da bei der großen Anlagenanzahl aufgrund des damit verbundenen Aufwandes nicht jeder WKA-Standort einer detaillierten Einzelfallbetrachtung unterzogen werden kann, waren für die Szenarienrechnungen weitere Annahmen zu treffen. Es sind dies im Wesentlichen:

- Wenn der Typ einer Turbine nicht dokumentiert ist, wurde vereinfachend der Wirkungsgradverlauf einer Kaplan turbine angenommen. Ist die Ausbauwassermenge einer Turbine nicht gegeben, wurde der Ausbaudurchfluss der Wasserkraftanlage herangezogen.⁴
- Die installierten Turbinen werden ab einer Beaufschlagung von $Q_i/Q_{Ausbau} = 1\%$ berücksichtigt. Eine ggf. erst ab einer größeren Beaufschlagung (z. B. $Q_i/Q_{Ausbau} = 20\%$) erfolgende Inbetriebnahme der Turbine wird nicht in Ansatz gebracht.
- Sind zwei oder mehrere Turbinen installiert, wird zunächst die erste Turbine bis zum Ausbaudurchfluss, anschließend der zweite Maschinensatz bis zum maximalen Durchfluss, usw. beaufschlagt. Eine ggf. optimierte Turbinensteuerung (joint control) wird nicht berücksichtigt.
- Es wurde keine Fallhöhen-Abfluss-Beziehung berücksichtigt, sondern die Ausbaufallhöhe als konstant angenommen; hydraulische Verluste wurden nicht angesetzt.
- Der sonstige Anlagenwirkungsgrad (ohne Turbinenwirkungsgrad) wurde in den Modellrechnungen mit 0,8 angenommen.

⁴ Sind bei einer Wasserkraftanlage mehrere Turbinen installiert und der Ausbaudurchfluss einzelner Turbinen nicht bekannt, wurde die Differenz zwischen dem Ausbaudurchfluss der Gesamtanlage und den der bekannten Turbinen angesetzt.

Diese Annahmen verdeutlichen, dass im Rahmen der Untersuchungen keine Kalibrierungen der Modellrechnungen durchgeführt wurden und die ermittelten Ergebnisse folglich für einzelne WKA-Standorte durchaus gewisse Unsicherheiten aufweisen. Es wird daher empfohlen, im Kontext von detaillierten Einzelfallbetrachtungen und Analysen eine nachgeschaltete Kalibrierung vorzunehmen.

In Bezug auf die Untersuchung verschiedener Restwasserszenarien und die Potenzialanalyse kann die gewählte Vorgehensweise, die die modellhaften Berechnungen für alle hessischen Wasserkraftstandorte erst möglich macht, jedoch als hinreichend genau angesehen werden. So sind die summarischen Gesamtaussagen bezogen auf alle Wasserkraftanlagen möglich, da sich positive und negative Abweichungen ausgleichen. Diese Einschätzung wird durch den Vergleich der Ergebnisse aus den Leistungsplanberechnungen für den Ist-Zustand mit den Angaben in den Energieberichten des Landes Hessen, den veröffentlichten EEG-Einspeisedaten sowie den in der DB Wanderhindernisse dokumentierten und im Rahmen des Projektes unabhängig von den energetischen Berechnungen ergänzten Werten zum Jahresarbeitsvermögen gestützt (vgl. Kap. 4.1.2). In diesem Kontext sei zudem darauf hingewiesen, dass auch die Erzeugungsdaten der einzelnen Anlagen gewissen Schwankungen unterliegen, die neben dem variierenden jährlichen Wasserdargebot auch auf betriebsbedingte Einflüsse, wie z. B. Stillstandszeiten der Turbinen, etc., zurückzuführen sind. Zur weitergehenden Absicherung der Berechnungsergebnisse wurden darüber hinaus eine Reihe von Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um die mit einzelnen Annahmen verbundenen Unsicherheiten besser abschätzen zu können.

Die beschriebene Berechnungsmethodik und Abschätzung nicht bekannter Parameter ermöglicht zudem die wirtschaftliche Bewertung von Verbesserungsmaßnahmen auf Basis einer Differenzenbildung zwischen dem jeweiligen Ist-Zustand und den Szenarien (vgl. Kap. 5). So kann durch die relativen Aussagen zwischen dem Jahresarbeitsvermögen im Ist-Zustand E_{A_Ist} und bei Berücksichtigung der jeweiligen Restwasserabgaben $E_{A_Szenario}$ davon ausgegangen werden, dass die prognostizierten Ertragsänderungen auch unter Berücksichtigung ggf. vorhandener absoluter Unsicherheiten in einer realistischen Größenordnung abgebildet werden.

Durch die nachfolgenden Grafiken soll das methodische Vorgehen für die durchgeführten Szenarienrechnungen an den 621 hessischen Wasserkraftanlagen noch einmal beispielhaft veranschaulicht werden. So ist in Abb. 3.9 neben dem sich aus der umgerechneten Jahresdauerlinie ergebenden Wasserdargebot der für den Ist-Zustand resultierende Turbinendurchfluss dargestellt. Zudem wird der Ausbaugrad der Wasserkraftanlage - der in diesem Beispiel bei etwa 270 Tagen liegt - verdeutlicht, wodurch bei Ausleitungskraftwerken bereits erste Hinweise auf die Bedeutung einer Restwasserabgabe bzw. im Umkehrschluss deren Einfluss auf die Stromerzeugung gegeben werden. Darüber hinaus kann ein mögliches Ausbaupotenzial durch Erhöhung der Ausbauwassermenge eines Anlagenstandortes identifiziert werden (vgl. Kap. 4.2.2).

Aus diesen Eingangsgrößen ergibt sich durch die oben erläuterten physikalischen Zusammenhänge die in Abb. 3.10 abgebildete Leistungsdauerlinie sowie durch die Integration über die Zeit die jeweils korrespondierende Jahresarbeit. Die einzelnen Berechnungsparameter Fallhöhe, Durchfluss, Wirkungsgrad, Leistung und Arbeit sind für jeden Zeitschritt in der tabellarischen Darstellung des Leistungsplans aufgeführt (vgl. Tab. 3.4).

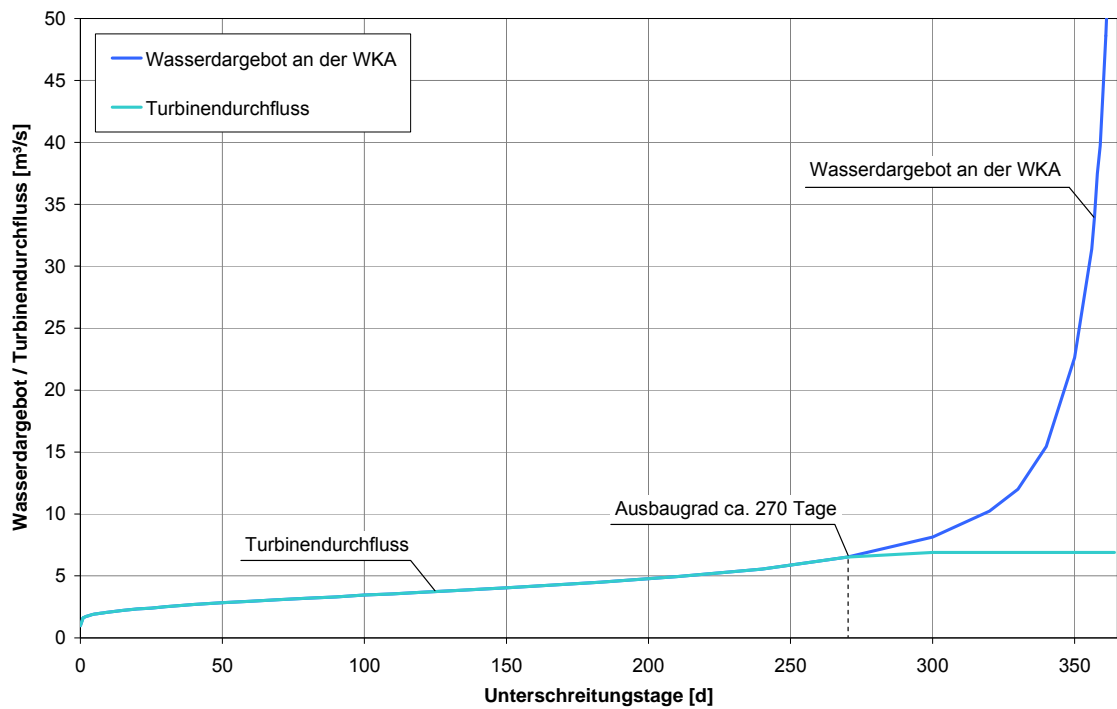


Abb. 3.9: Wasserdargebot und Turbinendurchfluss für eine beispielhaft ausgewählte Wasserkraftanlage

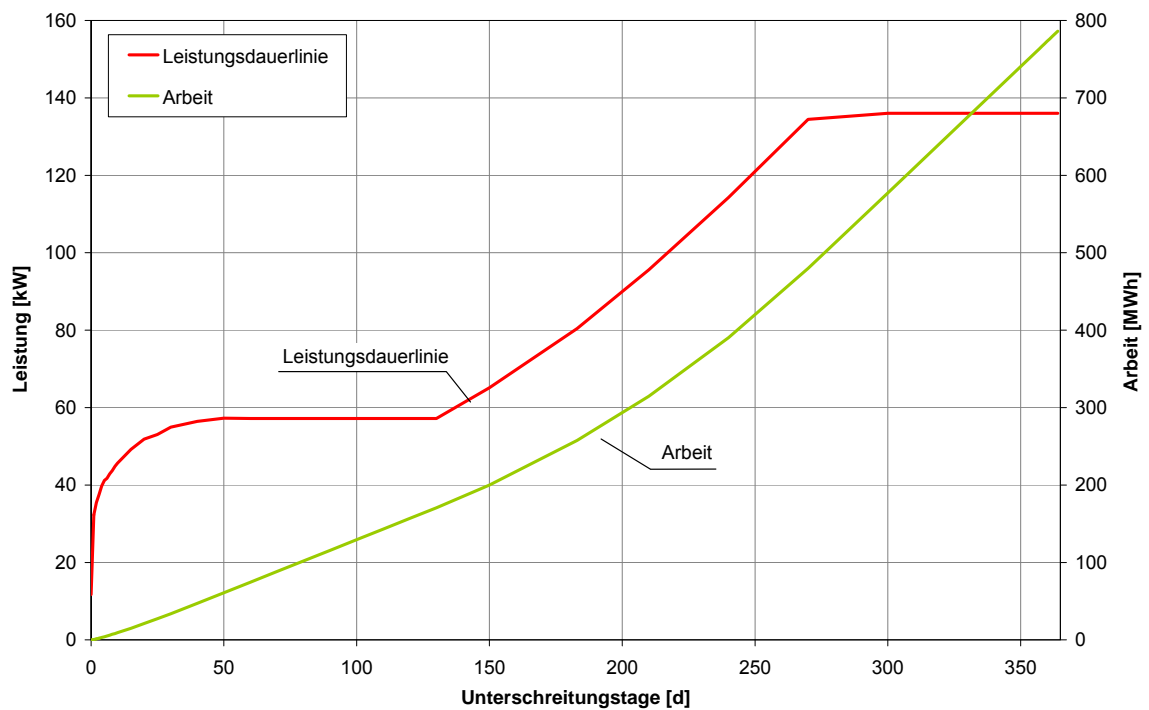


Abb. 3.10: Berechnete Leistungsdauerlinie und Jahresarbeit für eine beispielhaft ausgewählte Wasserkraftanlage

Tab. 3.4: Beispielhafter Auszug aus der tabellarischen Darstellung des Leistungsplans⁵

U Tage	Dauer	h _r (brutto)	h _v (Verlust)	h (netto)	Q gesamt	Q RW	Q WKA	Q T1	Q T2	Q-T GES	Q/Qa T1	Q/Qa T2	ETA T1	ETA T2	P T1	P T2	P GES	E T1	E T2	E GES	E SUMME
[-]	[d]	[m]	[m]	[m]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kW]	[kW]	[kW]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[MWh]
0	0	3,3	0,1	3,2	0,984	0	0,984	0,984	0	0,984	0,339	0	0,474	0	11,715	0	11,715	0	0	0	0
1	1	3,3	0,1	3,2	1,613	0	1,613	1,613	0	1,613	0,556	0	0,797	0	32,294	0	32,294	528,114	0	528,114	0,53
2	1	3,3	0,1	3,2	1,722	0	1,722	1,722	0	1,722	0,594	0	0,821	0	35,476	0	35,476	813,236	0	813,236	1,34
3	1	3,3	0,1	3,2	1,79	0	1,79	1,79	0	1,79	0,617	0	0,836	0	37,597	0	37,597	876,872	0	876,872	2,22
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
364	1	3,3	0,1	3,2	78,896	0	78,896	2,9	4	6,9	1	1	0,785	0,785	57,171	78,857	136,028	1372,11	1892,56	3264,67	784,76

Auf dieser Basis können durch Variation der einzelnen Eingangsparameter nun beliebige Szenarienrechnungen durchgeführt werden. So wirkt sich z. B. eine angesetzte Restwasserabgabe wie in Abb. 3.11 verdeutlicht auf das zur energetischen Nutzung verfügbare Wasserdargebot und die Leistung eines Anlagenstandortes aus. Zudem wird die Zeitspanne deutlich, in der eine Konkurrenzsituation zwischen Mindestwasserabgabe und Stromgewinnung besteht; so führt das Gewässer bei diesem Beispiel durchschnittlich nur etwa 2 Monate des Jahres mehr Wasser als von dem Kraftwerk genutzt werden kann.

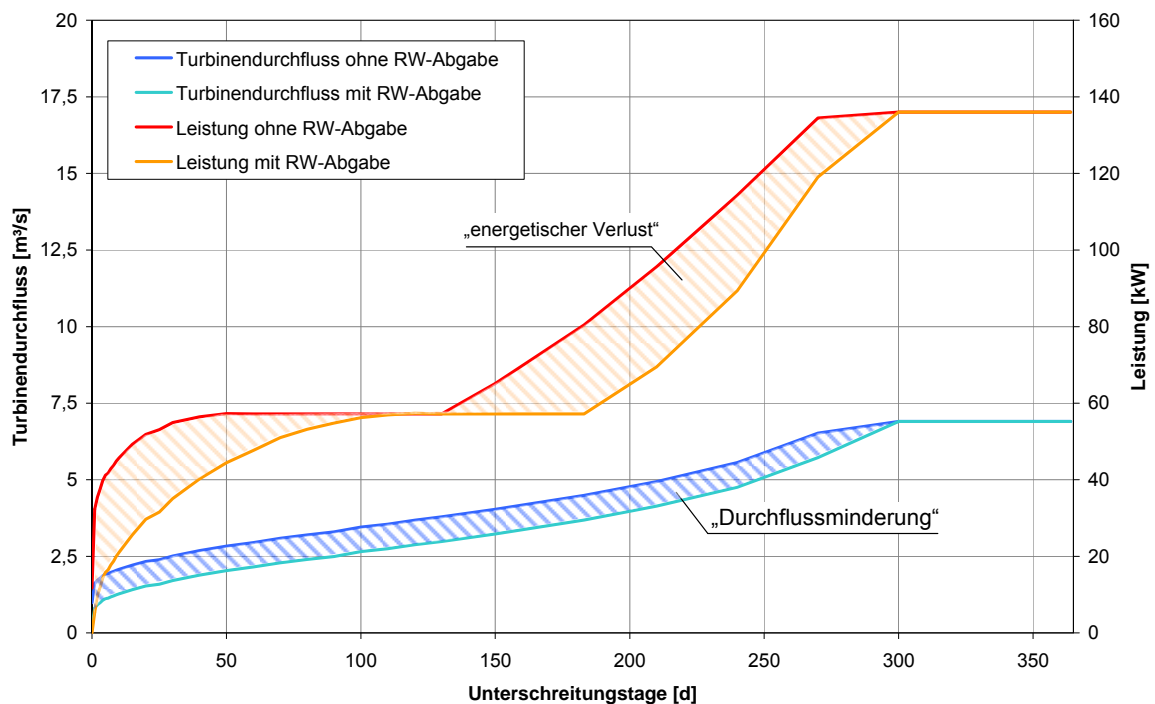


Abb. 3.11: Auswirkung einer Restwasserabgabe auf den Turbinendurchfluss und die Leistung einer beispielhaft ausgewählten Wasserkraftanlage

⁵ Die detaillierte Erläuterung der einzelnen Spalten ist dem Handbuch zum Planungswerkzeug zu entnehmen.

4 KENNZAHLEN ZUR WASSERKRAFTNUTZUNG IN HESSEN

4.1 Ist-Zustand

4.1.1 Anzahl und räumliche Verteilung

Gemäß der in Kap. 3 beschriebenen Auswertungen werden in Hessen derzeit 621 Laufwasserkraftwerke betrieben, die sich wie in Abb. 4.1 dargestellt auf die Zuständigkeitsbereiche der bei den Regierungspräsidien angesiedelten Oberen Wasserbehörden verteilen. Demnach befinden sich 345 WKA-Standorte, dies entspricht einem Anteil von 55 %, im Bereich des RP Kassel bzw. seiner Außenstelle, dem früheren RPU Bad Hersfeld. Auf das RP Gießen entfallen mit 172 Standorten 28 % der hessischen WKA. Dem RP Darmstadt mit den drei RPU'n Darmstadt, Frankfurt und Wiesbaden sind 104 Wasserkraftwerke (17 %) zuzuordnen. Dieses deutliche Nord-Süd-Gefälle, das auch durch die Abb. 3.2 dokumentiert wird, ist insbesondere auf die jeweiligen topographischen Randbedingungen und das damit verbundene Wasserkraftpotenzial zurückzuführen. So ist die größte Dichte an WKA-Standorten in den nord-, mittel- und osthessischen Mittelgebirgsregionen des Rothaargebirges, des Knüll, des Vogelsberges und der Rhön zu verzeichnen. In Südhessen befindet sich lediglich im Bereich des Odenwaldes eine vergleichbare Dichte.

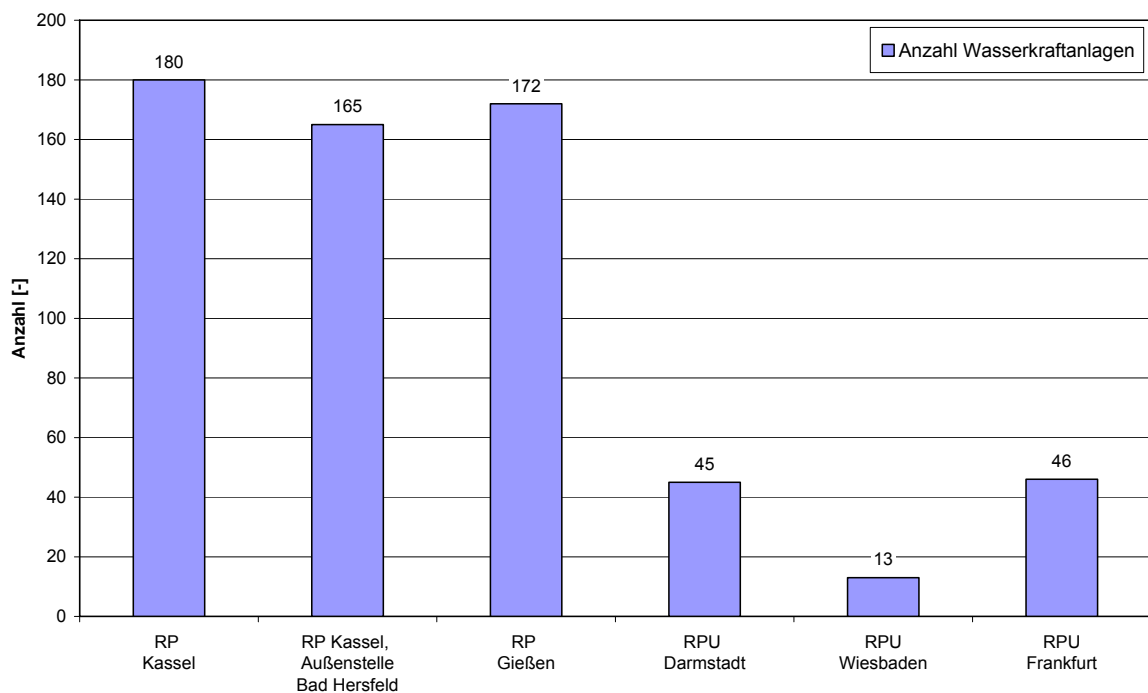


Abb. 4.1: Verteilung der WKA auf die Zuständigkeitsbereiche der Regierungspräsidien

Bezogen auf die Flussgebietseinheiten (FGE) sind 367 der hessischen WKA-Standorte der FGE Weser zuzuordnen. Im hessischen Einzugsgebiet des Rheins befinden sich 254 Wasserkraftanlagen. Weitergehende Auswertungen zur Anzahl und Verteilung können dem Planungswerkzeug „WKA-Aspekte“ entnommen werden, das entsprechende Auswerterroutinen bereit stellt. Beispielhaft sei an dieser Stelle auf den Längsschnitt der Fulda verwiesen (Abb. 4.2), dem die Verteilung der dort betriebenen 29 WKA-Standorte und die jeweilige Einzugsgebietsgröße entnommen werden kann.

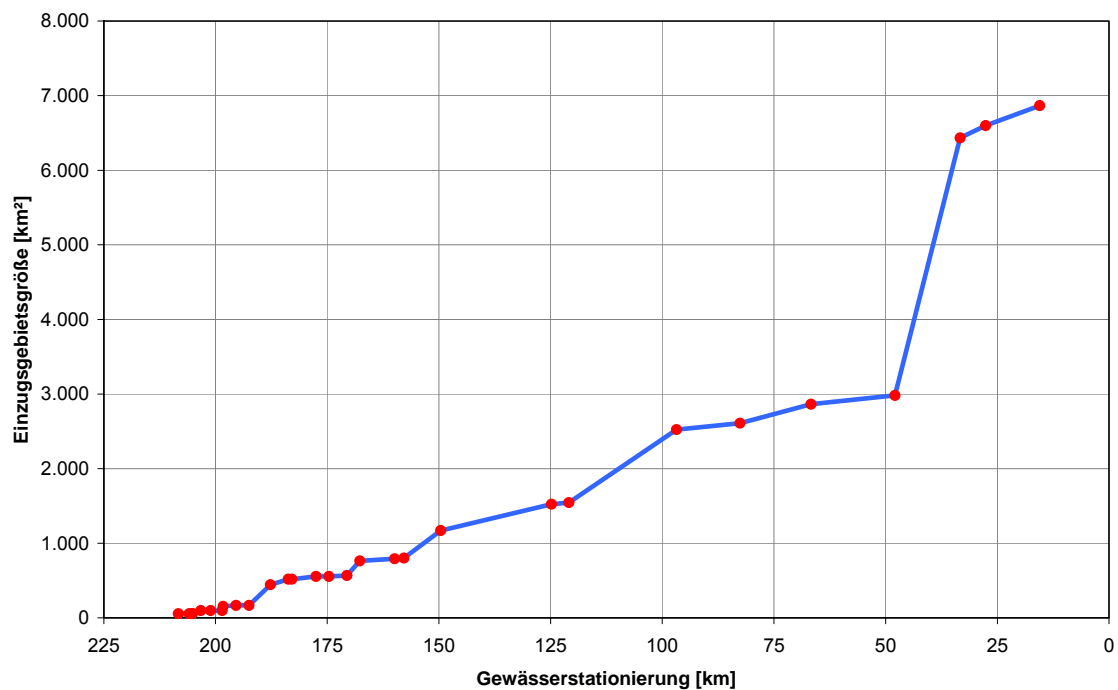


Abb. 4.2: Verteilung der WKA-Standorte und deren Einzugsgebietsgröße an der Fulda

Die dokumentierten Wasserkraftanlagen geben eine realistische Richtgröße, nicht jedoch die absolute Anlagenanzahl wieder. So wurden zum einen „nur“ die WRRL-Gewässer mit einem Einzugsgebiet größer 10 km² berücksichtigt. Auch wenn das WKA-Potenzial an den Nebengewässern mit einem Einzugsgebiet kleiner diesem Schwellenwert aufgrund des geringen Wasserdargebotes als sehr gering einzustufen ist, kann davon ausgegangen werden, dass an diesen Bächen - insbesondere an alten Mühlen - noch einige Kleinstanlagen existieren. Zudem unterliegt die Gesamtanzahl der WKA-Standorte entwicklungsbedingten Schwankungen. So werden insbesondere Kleinststandorte, die unter den aktuellen ökonomischen Randbedingungen nicht mehr wirtschaftlich betrieben werden können, aufgegeben und stillgelegt. Andererseits lassen sich an lukrativeren Standorten jedoch auch Reaktivierungen bis hin zu Neubauvorhaben dokumentieren. Dazu zählen beispielsweise das am Main gelegene und während der Projektlaufzeit in Betrieb genommene Wasserkraftwerk Kostheim oder auch zwei Reaktivierungen an der Oberen Lahn.

4.1.2 Leistung und Jahresarbeitsvermögen

Die gemeinsame Ausbauleistung der 621 hessischen Wasserkraftanlagen beträgt etwa 92 MW. Eine Kategorisierung der WKA-Standorte in unterschiedliche Leistungsklassen zeigt auf, dass die ganz überwiegende Anzahl der hessischen Anlagen der Klein- bzw. Kleinstwasserkraftnutzung zuzuordnen ist. Gemäß Tab. 4.1 verfügen 545 der 621 Wasserkraftanlagen - dies entspricht einem Anteil von 88 % - über eine installierte Leistung von weniger als 100 kW. Demgegenüber haben lediglich 12 Standorte bzw. etwa 1,9 % der Anlagen eine Ausbauleistung größer 1 MW. Die durchschnittlich je Wasserkraftanlage installierte Leistung beträgt in Hessen rund 150 kW (arithmetischer Mittelwert), der aufgrund der schiefen Häufigkeitsverteilung aussagekräftigere Medianwert dokumentiert, dass der „typische“ hessische WKA-Standort eine Ausbauleistung von nur 13 kW besitzt. Folglich entfallen bezogen auf die in Hessen installierte Leistung etwa 70 % auf die 12 Kraftwerke größer 1 MW, während 88 % der hessischen Wasserkraftanlagen ein Leistungsanteil von knapp 11 % zukommt.

Tab. 4.1: Anzahl, Ausbauleistung und Jahresarbeitsvermögen der hessischen WKA-Standorte bezogen auf unterschiedliche Leistungsklassen (Stand: Juli 2011)

Leistungsklasse [kW]	WKA-Standorte		Ausbauleistung		mittleres Jahresarbeitsvermögen	
	Anzahl [-]	Anteil [%]	Summe [MW]	Anteil [%]	Summe [GWh/a]	Anteil [%]
P < 10	239	38,5	1,4	1,5	7,5	1,8
10 ≤ P < 20	156	25,1	2,2	2,4	12,5	2,9
20 ≤ P < 50	112	18,0	3,4	3,7	18,3	4,3
50 ≤ P < 100	38	6,1	2,7	3,0	13,7	3,2
100 ≤ P < 500	54	8,7	12,3	13,4	63,2	14,9
500 ≤ P < 1.000	10	1,6	6,3	6,9	27,5	6,5
P ≥ 1.000	12	1,9	63,2	69,1	282,0	66,4
Summe	621	100,0	91,5	100,0	424,7	100,0

Als Ergebnis der o. g. Leistungsplanberechnungen kann das Jahresarbeitsvermögen der hessischen Anlagen mit rund 425 GWh/a angegeben werden. Damit liegt der Anteil der Wasserkraft - ohne Berücksichtigung der Erzeugung in Pumpspeicherkraftwerken - an der gesamten Bruttostromerzeugung in Hessen bei rund 1 % bis 2 %.⁶ Entsprechend wird der Stromerzeugung aus Wasserkraft in Hessen im Energiebericht 2008 der Hessischen Landesregierung eine nachgeordnete Bedeutung zugewiesen (vgl. [29]).

⁶ Gemäß den Angaben im Energiebericht Hessen 2008 variierte die Bruttostromerzeugung in dem Zeitraum von 1995 bis 2006 zwischen 24.750 GWh im Jahr 1995 und 33.300 GWh im Jahr 2004. Der Mittelwert für diese 12 Jahre liegt bei 28.800 GWh/a.

Ähnlich wie bei der Verteilung der installierten Leistung verhält es sich beim Jahresarbeitsvermögen, so dass sich die hessische Wasserkraft insgesamt in drei Gruppen unterscheiden lässt (vgl. Tab. 4.1):

- Die 12 WKA größer 1 MW bzw. 2 % Prozent der hessischen Wasserkraftanlagen erzeugen 2/3 des hessischen Wasserkraftstromes.
- Auf die 64 kleinen, aber leistungsfähigen WKA-Standorte mit einer Ausbauleistung von 100 kW bis 1 MW, dies entspricht immerhin etwa 10 % der hessischen Anlagen, entfällt ein Anteil am Jahresarbeitsvermögen aus Wasserkraft in Hessen von gut 20 %.
- Die restlichen 545 Klein- und Kleinststandorte (88 %) erzeugen etwa 12 % des Stroms aus Wasserkraft in Hessen.

Zur Veranschaulichung dieser Situation ist in Abb. 4.3 noch einmal die Verteilung des Jahresarbeitsvermögens bezogen auf die unterschiedlichen Leistungsklassen grafisch dargestellt.

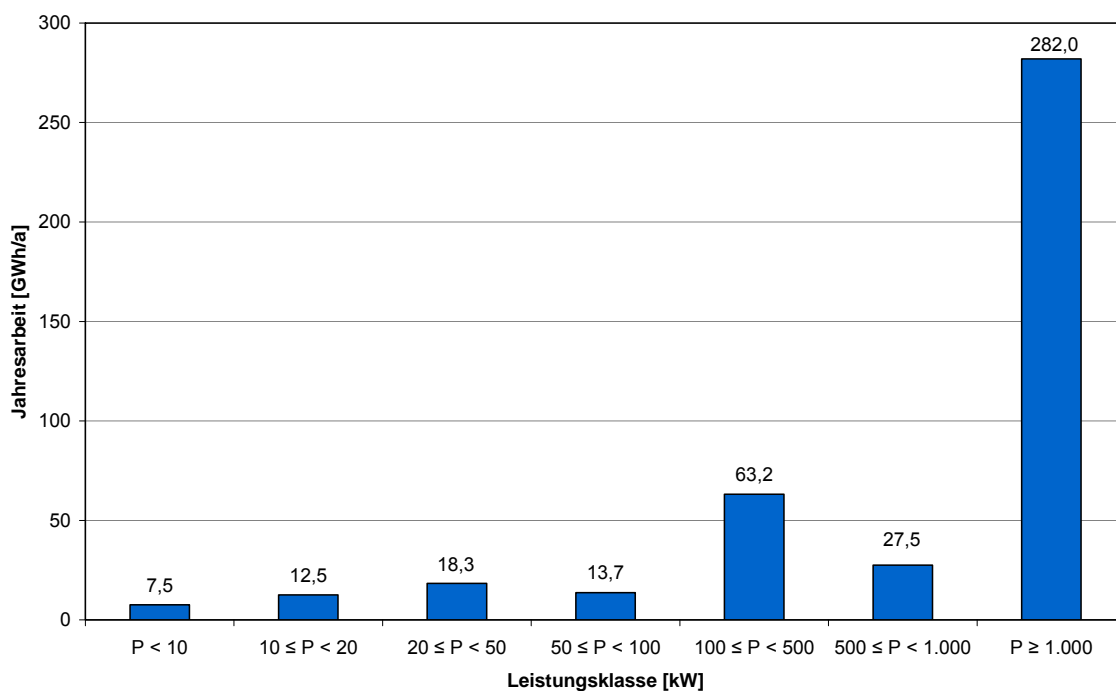


Abb. 4.3: Verteilung des Jahresarbeitsvermögens der hessischen WKA-Standorte bezogen auf unterschiedliche Leistungsklassen (Stand: Juli 2011)

Aufgrund ihrer besonderen energetischen Bedeutung sind in Tab. 4.2 für die 12 hessischen Wasserkraftanlagen größer 1 MW installierter Leistung die berechneten Ergebnisse den zugänglichen Informationen zum Jahresarbeitsvermögen gegenübergestellt. Dabei enthält die Spalte „Jahresarbeit Berechnung“ die summarischen Ergebnisse der Leistungsplanberechnung gemäß dem in Kap. 3.3 erläuterten Vorgehen und ohne Kalibrierung. In der Spalte „Jahresarbeit Referenz“ ist das Jahresarbeitsvermögen gemäß der Zusammenstellung der deutschen Wasserkraftanlagen größer 1 MW (vgl. [23]) als Referenzgröße aufgeführt.⁷ Ein standortbezogener Vergleich dieser beiden Angaben zeigt auf, dass die Ergebnisse der überschlägigen Berechnungen im Einzelfall, z. B. durch nicht berücksichtigte Fallhöhen-Abflussbeziehungen, von der Referenzgröße abweichen. Insgesamt liegen die Berechnungsergebnisse jedoch auch ohne eine detaillierte Kalibrierung in einer realistischen Größenordnung, so dass die Unterschiede zwischen dem neu berechneten und in den genannten Datenquellen dokumentierten Jahresarbeitsvermögen in der Summe nur 1 % betragen.

Tab. 4.2: Vergleich zwischen berechnetem Jahresarbeitsvermögen und Referenzgrößen für die Wasserkraftanlagen in Hessen mit einer Ausbauleistung ≥ 1 MW

	Ausbau- leistung [kW]	Jahresarbeit Berechnung ¹⁾ [GWh/a]	Jahresarbeit Referenz ²⁾ [GWh/a]
summarische Kennwerte der 12 WKA ≥ 1 MW Ausbauleistung	63.200	282,0	279,0

¹⁾ aus Leistungsplanberechnung (ohne Kalibrierung)

²⁾ gemäß Heimerl und Giesecke (2004), für die WKA Kostheim Newsletter des Betreibers

Die Einschätzung, die energetische Situation plausibel abzubilden, wird auch durch den Vergleich mit den in den beiden aktuellsten Energieberichten der Hessischen Landesregierung (vgl. [29] und [36]) veröffentlichten Erzeugungszahlen gestützt. Demnach unterlag die jährliche Stromerzeugung aus Wasserkraft in dem Zeitraum von 1996 und 2007 den in Abb. 4.4 dargestellten Schwankungen zwischen 265 GWh/a und 480 GWh/a. Diese Unterschiede in der jährlichen Stromerzeugung werden aufgrund ihres großen Anteils ganz maßgeblich von den Anlagen größer 1 MW beeinflusst. Somit unterliegen die jährlich zu erwartenden Schwankungen, die z. B. auf die natürliche Variation des Wasserdargebotes oder auch auf besondere Betriebssituationen wie Revisionen, Baumaßnahmen, etc. zurückzuführen sind, größeren Differenzen als die Berechnungsergebnisse für die Wasser-

⁷ Die WKA Kostheim wurde erst im Oktober 2009 in Betrieb genommen und ist folglich in [23] noch nicht erfasst. Daher wurde für diese Anlage als Referenzgröße das in einem Newsletter des Betreibers genannte Jahresarbeitsvermögen herangezogen.

kraftanlagen größer 1 MW unter Berücksichtigung verschiedener Parameterkombinationen bzw. Kalibrierungsansätze.⁸

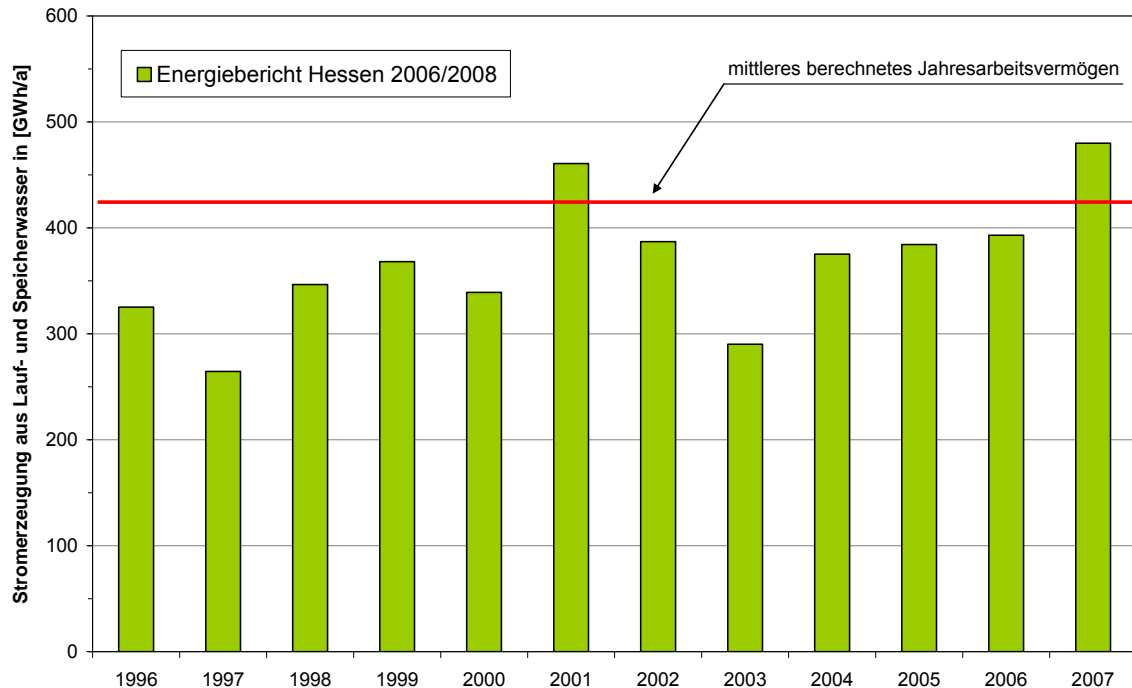


Abb. 4.4: Die Stromerzeugung aus Lauf- und Speicherwasserkraftwerken in Hessen zwischen 1996 und 2007 (ohne Pumpspeicherkraftwerke) nach [29] und [36]

Sowohl die für jeden WKA-Standort erstellten Leistungspläne als auch gewässerbezogene bzw. hessenweite Zusammenstellungen sind wiederum dem Planungswerkzeug „WKA-Aspekte“ zu entnehmen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die technischen Daten und energetischen Berechnungen im Einzelfall aufgrund ggf. fehlender Informationen Unsicherheiten aufweisen können und zu verifizieren sind. Die entsprechenden Auswertungen geben z. B. Hinweise zur energetischen Nutzung und dem Ausbaugrad einzelner Gewässerabschnitte wie die in Abb. 4.5 dokumentierte Verteilung der Ausbauleistung der Wasserkraftanlagen an der hessischen Lahn verdeutlicht.

⁸ Diese Interpretation gilt auch unter der Berücksichtigung, dass die WKA Kostheim erst im Jahr 2009 in Betrieb genommen wurde und folglich das damit verbundene zusätzliche Jahresarbeitsvermögen in den Zahlen der Energieberichte noch nicht enthalten ist.

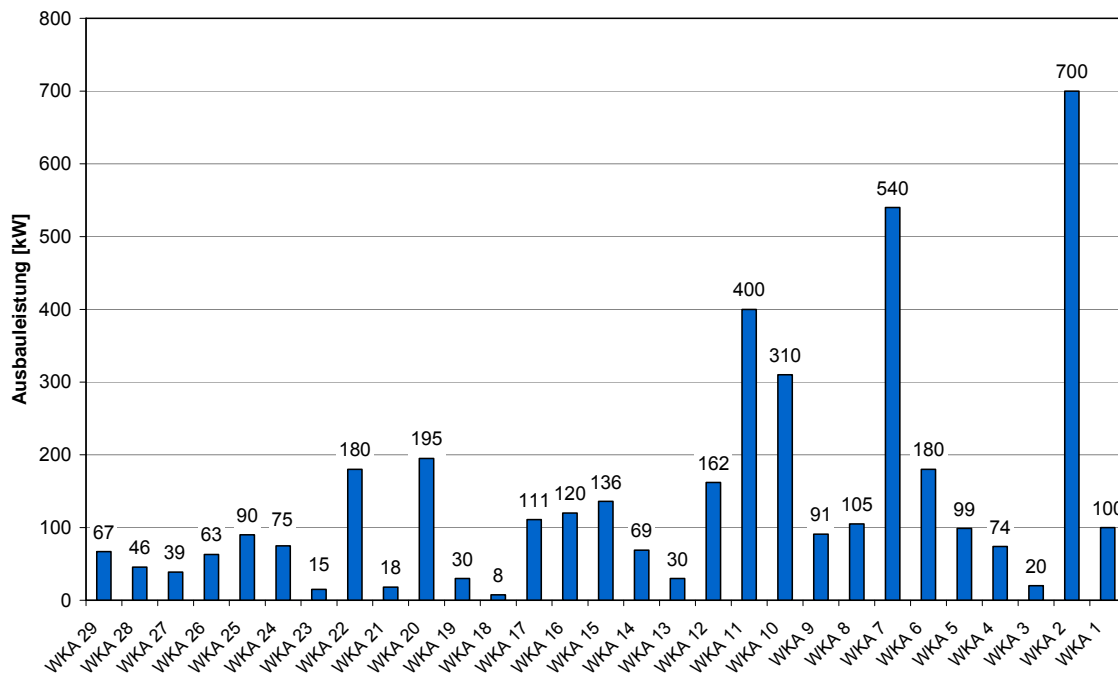


Abb. 4.5: Zusammenstellung der installierten Leistung an den Wasserkraftanlagen der hessischen Lahn

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der in Hessen pro Jahr aus Wasserkraft gewonnene Strom von etwa 425 GWh jährlichen Einnahmen in Höhe von etwa 30 Mio. € entspricht und damit den hessischen WKA-Standorten durchaus eine gewisse wirtschaftliche Bedeutung beizumessen ist. Zudem würde die erzeugte Energie ausreichen, in etwa den jährlichen Strombedarf von 105.000 Haushalten zu decken.⁹ Geht man weiter davon aus, dass bei der Erzeugung von 1 kWh Strom in Deutschland durchschnittlich 0,57 kg CO₂ entstehen (vgl. [48]), so werden durch die hessischen Wasserkraftanlagen jährlich ca. 240.000 t CO₂-Emissionen vermieden.

4.1.3 Auf- und Abwärtspassierbarkeit

Die im Folgenden dokumentierten Bewertungen zur Auf- und Abwärtspassierbarkeit an den hessischen WKA-Standorten basieren auf einer Auswertung der entsprechenden Einträge in der DB Wanderhindernisse (vgl. [31]). Diese wurden im Zuge der Datenergänzung und -plausibilisierung nur in wenigen Ausnahmefällen angepasst bzw. aktualisiert. Folglich gibt die in Tab. 4.3 zusammengestellte Einschätzung zur Durchgängigkeit der

⁹ Dem Vergleich liegen Zahlen zum durchschnittlichen Jahresstromverbrauch von 4.050 kWh pro Jahr und 3-Personen-Haushalt in Deutschland zugrunde (vgl. [17]).

Wasserkraftanlagen weitgehend die Situation während der Wanderhinderniserfassung vom Herbst 2006 bis Anfang 2008 und die individuelle Bewertung der jeweiligen Kartierer wieder. Für die Auswertungen wurden sowohl die Gesamtbewertung für die einzelnen Anlagenkomplexe als auch die Gesamteinschätzung in Bezug auf die Fisch- und Benthofauna herangezogen.¹⁰ Die Definition der einzelnen Bewertungsstufen „passierbar“, „bedingt passierbar“, „weitgehend unpassierbar“ und „unpassierbar“ ist der DB Wanderhindernisse zu entnehmen.

Die Ergebnisse zeigen auf, dass bezogen auf die Aufwärtspassierbarkeit etwa 84 % der hessischen WKA-Standorte als nicht passierbar bzw. weitgehend unpassierbar und nur ca. 14 % der Anlagen zumindest bedingt passierbar oder passierbar eingestuft wurden (vgl. Tab. 4.3). Ähnlich stellt sich die Situation bei der Beurteilung der Abwärtspassierbarkeit dar. So wurden in Bezug auf den Abstieg hessenweit 184 Anlagenstandorte als weitgehend unpassierbar und 212 weitere Wasserkraftwerke als unpassierbar kategorisiert. Dies entspricht zusammen einem Anteil von rund 64 % der Gesamtanlagen, für die somit ein entsprechender Handlungsbedarf zur Verbesserung der Abwärtspassierbarkeit besteht. Sowohl bei der Bewertung der aufwärtsgerichteten als auch der abwärtsgerichteten Durchgängigkeit lassen sich zwischen den beiden Flussgebietseinheiten Rhein und Weser keine wesentlichen Unterschiede erkennen.

Tab. 4.3: Bewertung der Passierbarkeit an den WKA-Standorten (nach [31])

Parameter		Hessen		FGE Rhein		FGE Weser	
		Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent
Aufwärts - Passierbarkeit	passierbar	43	7%	17	7%	26	7%
	bedingt passierbar	46	7%	20	8%	26	7%
	weitgehend unpassierbar	67	11%	31	12%	36	10%
	unpassierbar	454	73%	181	71%	273	74%
	ohne Bewertung	11	2%	5	2%	6	2%
	Summe	621		254		367	
Abwärts - Passierbarkeit	passierbar	68	11%	35	14%	33	9%
	bedingt passierbar	146	24%	58	23%	88	24%
	weitgehend unpassierbar	184	30%	73	29%	111	30%
	unpassierbar	212	34%	83	33%	129	35%
	ohne Bewertung	11	2%	5	2%	6	2%
	Summe	621		254		367	

¹⁰ Gemäß Kartieranleitung wurde bei Ausleitungskraftwerken die Durchgängigkeit an Wehr und Krafthaus separat bewertet. Zudem erfolgte die Bewertung getrennt für schwimmstarke und -schwache Fische sowie die Benthosorganismen. Aus diesen Einzelbewertungen wurden gemäß den Kartiervorschriften eine Gesamtbewertung für die Auf- und Abwärtspassierbarkeit abgeleitet.

Insgesamt verdeutlichen diese Bewertungsergebnisse, dass insbesondere die zahlreichen kleinen WKA-Standorte viele Gewässerabschnitte strukturell beeinträchtigen. Andererseits befinden sich gerade die wenigen leistungsfähigen Wasserkraftanlagen häufig an „gewässerökologischen Schlüsselpositionen“ in den Unterläufen der Gewässer.

Neben dieser direkten Bewertung der Durchgängigkeit liefern auch die in der DB Wanderhindernisse dokumentierten Informationen zu den Rechenanlagen wichtige Hinweise zum gewässerökologischen Zustand der hessischen Wasserkraftanlagen bzw. zur Situation des Fischschutzes. So wurden - wie Tab. 4.4 zu entnehmen ist - im Rahmen der Wanderhinderniserfassung für etwa 75 % der WKA-Standorte die lichten Stababstände der Rechen erfasst. Bei der Interpretation dieser Einträge ist zu berücksichtigen, ob in der jeweiligen Anlage ein bzw. mehrere Turbinensätze installiert sind oder ein Wasserrad betrieben wird, denn aus betriebsbedingten Gründen kann davon ausgegangen werden, dass den Wasserrädern entweder keine oder nur sehr grobe Rechen vorgeschaltet sind. Entsprechend liegen für etwas mehr als die Hälfte der WKA mit Wasserrad keine Angaben zur lichten Rechenweite vor und die für diesen Antriebstyp vorhandenen Einträge dokumentieren ganz überwiegend Stababstände größer 20 mm.

Tab. 4.4: In der DB Wanderhindernisse dokumentierte Rechenanlagen (vgl. [31])

lichte Stababstände der Rechen	Rechen		WKA mit Wasserrad		WKA mit Turbine(n)	
	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent
keine Angabe	156	25%	75	58%	81	16%
<= 15 mm	111	18%	1	1%	110	22%
16 mm - 20 mm	223	36%	5	4%	218	44%
21 mm - 40 mm	83	13%	11	9%	72	15%
41 mm - 60 mm	14	2%	8	6%	6	1%
61 mm - 100 mm	28	5%	24	19%	4	1%
> 100 mm	6	1%	5	4%	1	0,2%
Summe	621		129		492	

Anders stellt sich die Datensituation an den WKA-Standorten, an denen Turbinen installiert sind, dar. Hier wurden für etwas mehr als 80 % der entsprechenden Anlagen die lichten Rechenweiten erfasst. Demnach verfügen mindestens 110 Wasserkraftanlagen mit Turbinen über Stababstände kleiner gleich 15 mm und erfüllen damit die Forderungen des § 10 der Hessischen Fischereiordnung (HFO) vom 17.12.2008 (vgl. [33]).¹¹ Hierbei handelt es sich vornehmlich um Anlagen mit kleinen Maschinensätzen und geringen Ausbau-

¹¹ Gemäß dieser Schutzbestimmungen ist an Triebwerken sicherzustellen, dass die lichte Stabweite der Rechen höchstens 15 mm beträgt, soweit nicht gleichwertige Verfahren verwendet werden, die das Eindringen von Fischen verhindern, für die schadlohe Abwanderungsmöglichkeit für sämtliche Fischarten sorgen und dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen.

wassermengen. Für 218 Wasserkraftanlagen sind lichte Stabweiten zwischen 16 mm und 20 mm und bei 83 Standorten Abstände größer 20 mm dokumentiert.

Über die o. g. Auswertung zu den Rechenanlagen hinaus wurde als Grundlage für eine differenzierte Betrachtung des Fischschutzes und -abstiegs an den Wasserradstandorten aus den einzelnen Daten der Bautyp des jeweiligen Wasserrades abgefragt. Demnach sind an 47 WKA-Standorten mittel- bzw. unterschlächtige Wasserräder installiert und werden 59 oberflächliche Wasserräder betrieben. Zu 23 Anlagen liegen keine Informationen vor.

Auch in Bezug auf die Bewertung der Passierbarkeit sei an dieser Stelle auf die Auswertefunktionen des Planungswerkzeuges „WKA-Aspekte“ verwiesen, die die konzeptionelle bzw. strategische Planung und Priorisierung von gewässerökologischen Verbesserungsmaßnahmen bei Bedarf unterstützen können. So veranschaulicht z. B. die Darstellung des Gewässerlängsschnittes in Kombination mit der Einzugsgebietsgröße und der Bewertung der Passierbarkeit die Länge vernetzter bzw. voneinander getrennter Gewässerstrecken und Teileinzugsgebiete. Beispielhaft ist in Abb. 4.6 die Bewertung der Aufwärtspassierbarkeit an der Fulda dargestellt. Zusammen mit den weiteren zu den WKA aufbereiteten Informationen kann der jeweilige Aufwand zur Verbesserung der gewässerökologischen Situation abgeschätzt und anschaulich dem damit verbundenen „Gewinn“ an vernetzter Gewässerstrecke gegenübergestellt werden.

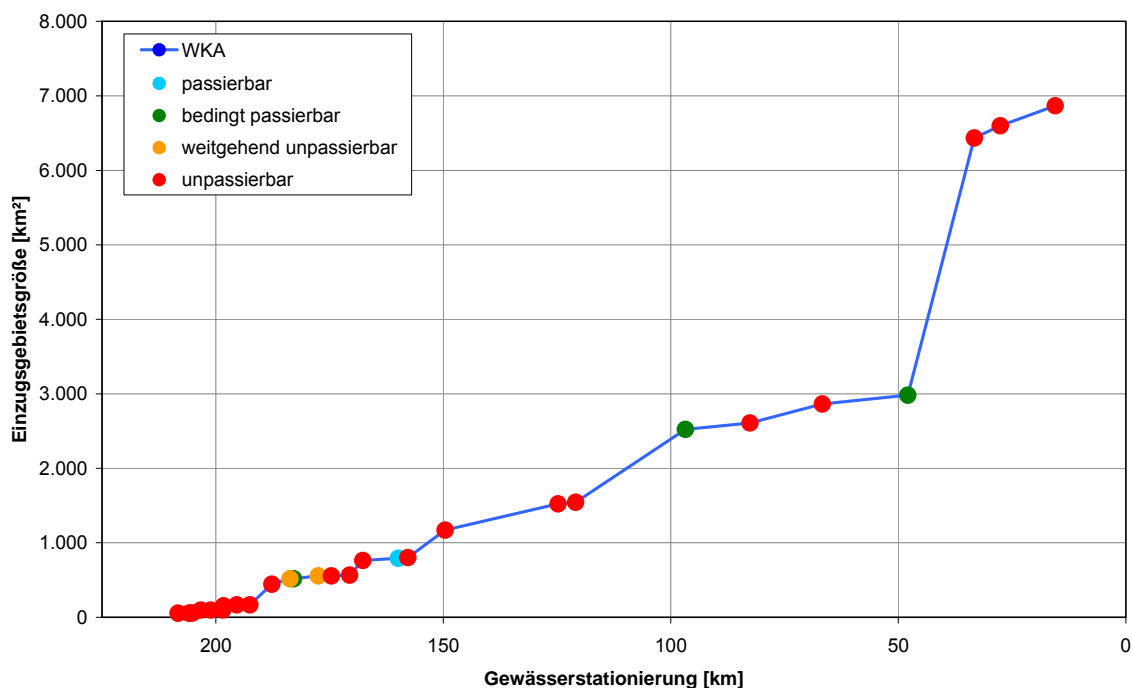


Abb. 4.6: Bewertung der Aufwärtspassierbarkeit für die WKA-Standorte der Fulda ([31])

4.1.4 Ausleitungsstrecken und Betriebsgräben

Wie bereits mehrfach angedeutet und aus Tab. 4.5 zu ersehen, sind 555 der 621 hessischen WKA-Standorte als Ausleitungskraftwerke zu charakterisieren. Dies entspricht einem Anteil von knapp 90 %. Dagegen werden lediglich gut 10 % der Anlagen als Flusskraftwerke betrieben. Dieses Verhältnis ist auf die historische Entwicklung der Wasserkraftnutzung in den hessischen Mittelgebirgsregionen und den damit verbundenen zahlreichen (ehemaligen) Mühlen- und Sägewerkstandorten mit z. T. geringen und stark schwankenden Abflussverhältnissen zurückzuführen. Zudem gibt es aufgrund der hydrographischen Verhältnisse in Hessen nur relativ kurze Gewässerabschnitte, die sich aufgrund eines ausreichenden Wasserdargebotes und der Gefälleverhältnisse für die Errichtung von Flusskraftwerken zur Stromerzeugung eignen.

Tab. 4.5: Anzahl der Ausleitungs- und Flusskraftwerke in Hessen (Stand: Juli 2011)

Parameter	Hessen		FGE Rhein		FGE Weser	
	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent
Ausleitungskraftwerke	555	89%	218	86%	337	92%
Flusskraftwerke	66	11%	36	14%	30	8%
Summe	621	100%	254	100%	367	100%

Aufgrund dieser Verteilung und einer Gesamtlänge von etwa 380 km kommt den hydro-morphologischen Eigenschaften der Ausleitungsstrecken sowie den im Mutterbett zu belassenden Mindestabflüssen aus gewässerökologischer Sicht eine besondere Relevanz zu. Allgemeine bzw. hessenweite Aussagen zur gegenwärtigen Restwasserabgabe lassen sich aktuell jedoch aus den in der DB Wanderhindernisse erfassten Daten kaum ableiten. So sind nur für 103 Wasserkraftanlagen bzw. knapp 19 % der Ausleitungskraftwerke rechtlich festgesetzte Restwassermengen dokumentiert. Ob und in welcher Größenordnung an den anderen Anlagen Mindestwasserabgaben erfolgen, kann nicht beurteilt werden.¹² Aufgrund dem in Kapitel 4.1.5 dargelegten hohen Anteil an „alten Wasserrechten“ und der erst seit 2002 verbindlich eingeführten Ausführungsvorschriften zur Festsetzung der Mindestwassermenge in Fließgewässern bei der Entnahme und Wiedereinleitung von Wasser (vgl. [34]) kann jedoch davon ausgegangen werden, dass nur für einen relativ geringen Anteil der hessischen Ausleitungskraftwerke Restwasserabgaben definiert wurden, die auf einem einheitlichen Verfahren basieren. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass bereits auch in den Jahren vor Inkrafttreten der genannten Regelung für diverse Anlagenstandorte Mindestwassermengen festgelegt wurden.

¹² In diesem Zusammenhang ist in den Fällen ohne festgesetzte Mindestwassermenge für die Beaufschlagung des Mutterbettes auch die Ausbauwassermenge der Wasserkraftanlagen von besonderer Bedeutung. Daher sei an dieser Stelle erwähnt, dass gerade viele kleine Anlagen sehr gering ausgebaut sind. Andererseits ist an den Mittelgebirgsbächen gerade in den Sommermonaten auch mit längeren Niedrigwasserperioden zu rechnen.

Die in Abb. 4.7 dargestellte und gemäß der in Kap. 3.2.3 erläuterten Vorgehensweise ermittelte Längenverteilung der Ausleitungsstrecken verdeutlicht, dass etwa 85 % der entsprechenden Gewässerabschnitte länger als 200 m sind. Etwas mehr als 100 Ausleitungskraftwerke verfügen sogar über Restwasserstrecken von einem Kilometer und mehr.

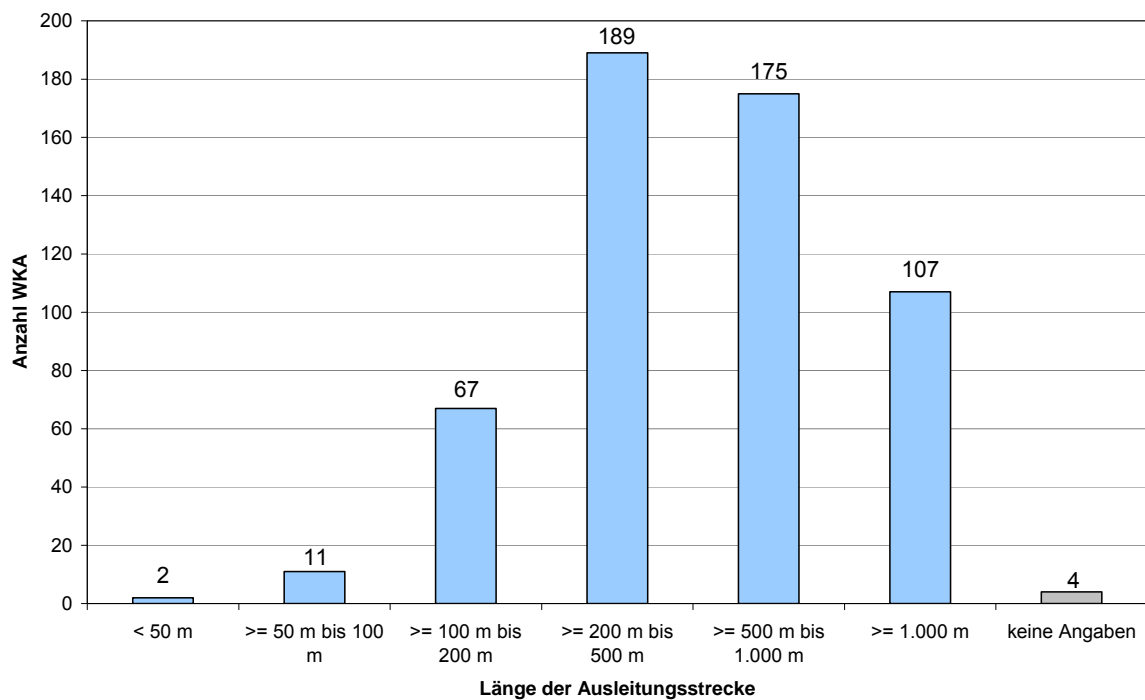


Abb. 4.7: Die Längen der Ausleitungsstrecken an den hessischen WKA-Standorten

In Bezug auf die Verbesserung der Aufwärtspassierbarkeit über den potentiellen Wanderkorridor „Ausleitungsstrecke“ hat neben einer Reihe von Parametern - beispielhaft genannt seien Restwassermenge, Ausbaudurchfluss, Durchgängigkeit und großräumige Auffindbarkeit - u. a. auch die Länge der Betriebsuntergräben Einfluss auf die Funktionalität dieser Variante. So sind verschiedene Verfahren, um das Einwandern von aufstiegswilligen Fischen in die Untergräben und damit eine Sackgassenwirkung zu unterbinden, zumindest in Deutschland noch in der Entwicklungs- und Testphase (vgl. [18]). Folglich kann sich für die großräumige Auffindbarkeit der Wanderoute „Ausleitungsstrecke“ ein kurzer Untergraben als Vorteil erweisen, da dieser ggf. als Sackgasse „erkannt“ und so die erfolgreiche Suche nach einer alternativen Aufwanderungsmöglichkeit (z. B. der Restwasserstrecke) ermöglicht.¹³ Die entsprechende Längenverteilung der Unterwassergräben an den hessischen Ausleitungskraftwerken ist in Tab. 4.6 dargestellt.

¹³ Diese Fragestellung kann hier nur angerissen, nicht jedoch beantwortet werden. Dazu ist entsprechende fischereibiologische Expertise - ggf. ergänzt durch zusätzliche Untersuchungen - hinzuzuziehen.

Tab. 4.6: Die Längenverteilung der Unterwassergräben an den Ausleitungskraftwerken

Länge des Unterwassergrabens	Anzahl der Ausleitungskraftwerke
< 50 m	97
>= 50 m bis 100 m	151
>= 100 m bis 200 m	133
>= 200 m bis 500 m	94
>= 500 m bis 1.000 m	30
>= 1.000 m	17
keine Angaben	33

4.1.5 Wasserrechtliche Informationen

Erfahrungen aus der praktischen Umsetzung zeigen, dass bei der Konzeption von gewässerökologischen Verbesserungsmaßnahmen die jeweilige wasserrechtliche Situation eine weitere wichtige Randbedingung darstellt. Auch wenn zu ca. 70 WKA-Standorten in der DB Wanderhindernisse keine entsprechenden Daten hinterlegt sind, zeigt eine Auswertung der vorhandenen Informationen auf, dass mindestens 508 der 621 hessischen Wasserkraftanlagen über sogenannte „alte Wasserrechte“ verfügen. Dies entspricht folglich einem Anteil von wenigstens 82 %. Bei einigen Anlagen wurden diese Rechte im Zuge von Modernisierungs- oder Ausbaumaßnahmen durch weitergehende Bewilligungen oder Erlaubnisse ergänzt. Wie Tab. 4.7 zu entnehmen ist, werden gemäß der vorliegenden Informationen nur etwa 7 % der hessischen Anlagen ausschließlich auf der Basis von wasserrechtlichen Bewilligungen oder Erlaubnissen betrieben.

Tab. 4.7: In der DB Wanderhindernisse dokumentierte Wasserrechte (vgl. [31])

Art des Wasserrechtes			WKA	
altes Recht	Bewilligung	Erlaubnis	Anzahl	Prozent (gerundet)
keine Angabe			69	11%
		X	22	3,5%
	X		22	3,5%
X			476	77%
X		X	20	3%
X	X		12	2%
Summe			621	100%

4.2 Szenarienrechnungen

4.2.1 Restwasserszenarien

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden mit Hilfe des Planungswerkzeuges „WKA-Aspekte“ die Auswirkungen der folgenden drei RW-Szenarien auf die Stromerzeugung aus Wasserkraft in Hessen ermittelt:

- Szenario 1: 1/3 MNQ
- Szenario 2: 1/2 MNQ
- Szenario 3: keine Restwasserabgabe

Die Basis bildeten dabei die in Kap. 3.3 beschriebenen Leistungsplanberechnungen für jeden hessischen WKA-Standort. Ziel war es, durch die drei Szenarien eine erste Orientierungshilfe für die jeweiligen Einzelanlagen zu ermitteln und durch die Gesamtergebnisse die Spannbreite, in der sich die möglichen energetischen Auswirkungen von Restwasserabgaben auf das Jahresarbeitsvermögen der hessischen Wasserkraft bewegen, aufzuzeigen.

Dazu wurden bei den RW-Szenarien 1 und 2 die o. g. Mindestwasserabflüsse für alle hessischen Wasserkraftanlagen ermittelt und unabhängig von ggf. vorhandenen RW-Abgaben angesetzt. Eine Differenzierung zwischen Ausleitungs- und Flusskraftwerken erfolgte dabei nicht, so dass auch für die Flusskraftwerke die mit den genannten Wasserabgaben verbundenen Erzeugungsverluste berechnet wurden. Die summarischen Berechnungsergebnisse verstehen sich somit als Extremwerte, da an den Flusskraftwerken keine RW-Abgaben erfolgen und die zur Verbesserung der Passierbarkeit benötigten Abflüsse kleiner den angesetzten RW-Szenarien sein dürften. So wird bei entsprechenden Anlagen als Richtgröße z. B. häufig ein Abfluss von 4 % als Ausbauwassermenge (Stichwort: konkurrierende Strömung) angesetzt (vgl. [41] und [18]). Auch berücksichtigen die Szenarien an den Ausleitungskraftwerken keine - ggf. im Einzelfall erforderlichen - zusätzlichen „Wasserabgaben“ zur Beaufschlagung der Fischauf- und -abstiegsanlagen.

Die resultierenden Ergebnisse verdeutlichen, dass in Abhängigkeit von Ausbaugrad und technischer Ausstattung die mit den angesetzten Restwasserabgaben einhergehenden Verluste an den einzelnen Wasserkraftanlagen sehr stark variieren. So können die energetischen Einbußen, z. B. beim Szenario 1, bei einzelnen Anlagen bereits bis zu 30 % betragen. Das Leistungsvermögen der Wasserkraftanlagen in Hessen reduziert sich gemäß der in Tab. 4.8 dargestellten summarischen Ergebnisse beim RW-Szenario 1 um 34 GWh/a und beim RW-Szenario 2 um 54 GWh/a. Dies entspricht einem Verlust zwischen 8 % und 13 % des mittleren Jahresarbeitsvermögens. Hieraus folgt, dass die Abgabe gewässerökologisch begründeter Mindestwassermengen bzw. die Einhaltung dieser naturschutzfachlichen Anforderungen an die Ausleitungsstrecken den Verlust einer regenerativen Energieversorgung von etwa 8.500 bzw. 13.500 Haushalten (3 Personen) zur Folge hätte. Diesem Verlust an umweltschonendem Strom sind jedoch die ökologischen Beeinträchtigungen der Ausleitungsstrecken gegenüberzustellen, welche durch ausreichende Mindestwasserdotierungen gemindert oder behoben werden könnten.

Tab. 4.8: Auswirkungen der potentiellen RW-Abgaben auf das mittlere Jahresarbeitsvermögen der hessischen Wasserkraftanlagen (Stand: Juli 2011)

Leistungsbereich	berechnetes Jahresarbeitsvermögen in [GWh/a]			
	Istzustand ¹⁾	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3 ²⁾
$P \geq 100 \text{ kW}$	373	342	325	375
$50 \text{ kW} \leq P < 100 \text{ kW}$	14	13	12	14
$P < 50 \text{ kW}$	38	36	34	39
Summe:	425	391	371	428
Veränderung gegenüber Istzustand:	-	-8%	-13%	0,7%

¹⁾ unter Berücksichtigung der in der DB Wanderhindernisse dokumentierten Restwasserabgaben

²⁾ ohne Berücksichtigung der in der DB Wanderhindernisse dokumentierten Restwasserabgaben

Beim Szenario 3 wurde bei allen Anlagen, unabhängig davon, ob im Ist-Zustand für einzelne WKA-Standorte eine RW-Abgabe dokumentiert ist, keine Mindestwassermenge angesetzt. Dieses Szenario versteht sich somit als Extremwertbetrachtung zur Veranschaulichung des an den vorhandenen Anlagen energetischen Potenzials ohne Berücksichtigung gewässerökologischer Anforderungen (und ohne Berücksichtigung zusätzlicher denkbarer Ausbaumaßnahmen, vgl. dazu Kap. 4.2.2). Die geringfügige Erhöhung des Jahresarbeitsvermögens bei diesem Szenario um 3 GWh/a bzw. knapp 1 % zeigt auf, dass wie bereits in Kap. 4.1.4 erwähnt, nur für sehr wenige Wasserkraftanlagen Mindestwassermengen dokumentiert sind und bei den Berechnungen für den Ist-Zustand berücksichtigt werden konnten.

Auf eine weitergehende Beschreibung der energetischen Folgewirkungen wird an dieser Stelle verzichtet und auf das Planungswerkzeug „WKA-Aspekte“ bzw. den Datensatz der hessischen Wasserkraftanlagen verwiesen, dem die detaillierten Berechnungsergebnisse für jeden einzelnen WKA-Standort entnommen werden können. Darüber hinaus ermöglicht das Planungswerkzeug den Anwendern sowohl die Berechnung beliebig vieler hessenweiter oder gewässerbezogener Szenarien als auch detaillierte Einzelfallbetrachtungen für jeden Standort. Zu diesem Zweck wurde u. a. auch die hessische Regelung zur Festsetzung der Mindestwassermenge (vgl. [34]) in das Planungswerkzeug implementiert. Dazu werden die im jeweiligen Datensatz vorhandenen und für die Restwasserermittlung benötigten Kennwerte vom Programm abgefragt und automatisiert in die entsprechenden Formblätter der Ausführungsvorschriften eingefügt. Nach Ermittlung der Mindestwassermenge können diese ausgedruckt werden.

4.2.2 Abschätzung des Wasserkraftpotenzials

Das technische Wasserkraftpotenzial in Hessen setzt sich aus dem derzeit genutzten Potenzial und dem darüber hinaus vorhandenen Ausbaupotenzial zusammen. Während das genutzte Leistungs- und Arbeitsvermögen durch die in Kap. 4.1.2 vorgestellten Berechnungsergebnisse gegeben ist, galt es durch zusätzliche Auswertungen der Datensätze zu den 621 hessischen WKA-Standorten und der DB Wanderhindernisse das technische Ausbaupotenzial zu ermitteln. Dazu wurde das zusätzliche technische Leistungs- und Arbeitsvermögen zunächst getrennt für die folgenden drei „Kategorien“ berechnet:

- (1) Reaktivierung bzw. Neubau an nicht genutzten Wehranlagen
- (2) Erhöhung der Ausbauwassermenge bei bestehenden Anlagenstandorten
- (3) Modernisierung der vorhandenen Wasserkraftanlagen

Als Grundlage für die richtige Interpretation der erzielten Ergebnisse wird in diesem Kapitel zunächst der Begriff des technischen Potenzials definiert, so wie er für vorliegende Untersuchung herangezogen wurde. Anschließend wird die konkrete und im Rahmen der projektbegleitenden Arbeitsgruppentreffen abgestimmte Vorgehensweise zur Ermittlung des Wasserkraftpotenzials für die drei o. g. Kategorien erläutert, bevor darauf aufbauend die entsprechenden Resultate angegeben werden.

Begriffsdefinition

Das theoretisch nutzbare Wasserkraftpotenzial wird entweder als Flächen- oder Linienpotenzial ausgedrückt. So beschreibt das häufig verwendete Linienpotenzial die potenzielle Energie eines Gewässerabschnittes, die aus den mittleren Abflüssen und des innerhalb der betrachteten Strecke gesamten auftretenden Höhenunterschiedes berechnet wird. Der Begriff des technisch nutzbaren Potenzials wird verwendet, wenn darüber hinaus technische Einschränkungen und ökologische Anforderungen berücksichtigt werden. Beim wirtschaftlich nutzbaren Potenzial werden zusätzlich ökonomische Aspekte, wie z. B. die Rentabilität, in Ansatz gebracht. Ausführliche Definitionen dieser verschiedenen Potenzialbegriffe können u. a. [5] und [22] entnommen werden.

Bei der durchgeführten Abschätzung des Wasserkraftpotenzials in Hessen handelt es sich um eine standortbezogene Untersuchung, die methodenbedingt vom theoretisch nutzbaren Potenzial abzugrenzen ist. Eingang fanden dabei neben technischen und ökonomischen Randbedingungen auch gewässerökologische Anforderungen. So beziehen sich die Analysen ausschließlich auf Ausbaumöglichkeiten an vorhandenen Querbauwerken und Wehren. Das prinzipiell denkbare Potenzial durch zusätzliche neue Stauanlagen wurde nicht bewertet. Ebenso wurden keine Stauerhöhungen angesetzt, so dass eine Verschlechterung der Strömungsverhältnisse in noch frei fließenden Gewässerabschnitten bzw. in den vorhandenen Stauräumen nicht zu erwarten ist. Zudem wurde bei der Potenzialermittlung die Abgabe von Mindestwasser in etwaige Ausleitungsstrecken bzw. zur Beaufschlagung der erforderlichen Fischauf- und -abstiegsanlagen berücksichtigt.

Vergleichbar zu anderen Studien [3] beziehen sich die durchgeführten Untersuchungen auf die Potenziale aus der Laufwasserkraftnutzung, ggf. vorhandene zusätzliche Potenziale durch Speicherung bleiben unberücksichtigt.

Vorgehen bei der Ermittlung des Potenzials durch Reaktivierung bzw. Neubau an nicht genutzten Wehranlagen

Zur Identifizierung des Potenzials durch Reaktivierung bzw. Neubau an nicht genutzten Wehranlagen wurden zunächst alle 19.279 in der DB Wanderhindernisse enthaltenen Datensätze unter Berücksichtigung folgender Bedingung abgefragt:

- Es erfolgt an dem jeweiligen Standort keine Wasserkraftnutzung und
- die Fallhöhe am Querbauwerk beträgt mindestens einen Meter und
- der Mittelwasserabfluss MQ am Wehr ist größer gleich 1 m³/s.

Für die auf diese Weise gefilterten Datensätze wurde die potenzielle Ausbauleistung P_{neu} über den folgenden Zusammenhang zwischen Ausbaudurchfluss Q_A und Fallhöhe h_f hochgerechnet:

$$P_{\text{neu}} = \rho \cdot g \cdot Q_A \cdot h_f \cdot \eta_{\text{Ges}}$$

mit:

$$\rho \quad \text{Dichte des Wassers [kg/m}^3\text{]} = 1.000 \text{ kg/m}^3$$

$$g \quad \text{Erdbeschleunigung [m/s}^2\text{]} = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Als Ausbaudurchfluss Q_A wurde der Mittelwasserabfluss am Wehr (MQ_{Wehr}) abzüglich eines prozentualen Abschlages für Umgehungsgewässer, Fischtreppe, Restwasserstrecke, etc. angesetzt. Die auf diese Weise abgeschätzten maximalen Durchflüsse der potenziellen Wasserkraftanlagen werden in Abhängigkeit von der örtlichen Situation zwischen 230 und 270 Tagen pro Jahr unterschritten. Der Ausbaugrad Q_A/MQ_{Wehr} variiert an den einzelnen Standorten zwischen 90 % und 98 % und liegt somit in einer realistischen Größenordnung. Als Ausbaufallhöhe h_f wurde die in der DB Wanderhindernisse dokumentierte Wasserspiegeldifferenz an der Stauanlage h_{Wehr} herangezogen. Der Gesamtwirkungsgrad der potentiellen Wasserkraftanlage wurde mit $\eta_{\text{Ges}} = 80 \%$ gewählt. Somit ergibt sich die mögliche Ausbauleistung P_{neu} aus:

$$P_{\text{neu}} = \rho \cdot g \cdot (MQ_{\text{Wehr}} - 1/3 MNQ_{\text{Wehr}}) \cdot h_{\text{Wehr}} \cdot 0,8$$

Anschließend erfolgte eine Unterscheidung der potenziellen WKA-Standorte auf Basis der Ausbauleistung P_{neu} in die folgenden drei Kategorien:

- $P_{\text{neu}} \geq 100 \text{ kW}$
- $50 \leq P_{\text{neu}} < 100 \text{ kW}$

c) $P_{\text{neu}} < 50 \text{ kW}$

Bei den anschließenden Arbeitsschritten und Berechnungen fanden nur noch Standorte mit einer potenziellen neuen Ausbauleistung von mindestens 50 kW Berücksichtigung. Dieses Grenzkriterium wurde eingeführt, da zum einen davon ausgegangen wird, dass sich der Neubau von Wasserkraftanlagen mit einer Ausbauleistung kleiner 50 kW unter den gegenwärtigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen nur in Ausnahmefällen betriebswirtschaftlich rentiert. Zum anderen ist diesen kleinen Standorten bezogen auf das Gesamtausbaupotenzial in Hessen nur ein sehr geringer Anteil zuzuschreiben.

Die aus dieser Kategorisierung resultierende Liste potentieller Wasserkraftstandorte wurde zur Verifizierung der getroffenen Annahmen sowie zur Berücksichtigung aktueller Rückbau- oder auch Ausbauplanungen und Nutzung des „Vor-Ort-Wissens“ mit den jeweils zuständigen Oberen Wasserbehörden abgestimmt. Als Ergebnis verbleiben in Hessen 31 potenzielle Wehrstandorte mit einem signifikanten Wasserkraftpotenzial durch Neubau bzw. Reaktivierung (vgl. Tab. 4.9). Die Prüfung im Sinne des § 35 Abs. 3 Wasserhaushaltsgesetz steht noch aus.

Tab. 4.9: Potenzielle Standorte mit einem signifikanten Wasserkraftpotenzial durch Neubau bzw. Reaktivierung (Stand: Juli 2011)

Nr.	Gewässer	Gewässerstation [km]	Nr.	Gewässer	Gewässerstation [km]	Nr.	Gewässer	Gewässerstation [km]
1	Dill	2,1	12	Lahn	65,9	23	Nidda	1,9
2	Dill	6,1	13	Lahn	73,7	24	Nidda	3,9
3	Eder	83,8	14	Lahn	86,6	25	Nidda	6,0
4	Eder	98,4	15	Lahn	98,3	26	Nidda	7,5
5	Eder	108,0	16	Lahn	120,0	27	Nidda	9,5
6	Fulda	7,6	17	Lahn		28	Nidda	12,2
7	Fulda	111,6	18	Lahn	122,2	29	Schwalm	14,2
8	Fulda	181,0	19	Lahn	145,3	30	Schwalm	26,1
9	Kinzig	2,6	20	Lahn	154,1	31	Schwalm	28,4
10	Kinzig	33,8	21	Lahn	158,8			
11	Kinzig	34,9	22	Main	63,8			

Weitergehende Detailuntersuchungen, wie z. B. zu den lokalen Fallhöhen-Abflussbeziehungen, waren nicht Gegenstand der durchgeführten Analyse und sind etwaigen konkreten Planungsvorhaben vorbehalten. Ebenso wurde nicht unterschieden, ob sich die selektierten Stauanlagen eher zur Errichtung eines Flusskraftwerkes oder zur Wiederinbetriebnahme eines Ausleitungskraftwerkes eignen. Um dennoch eine belastbare Spannbreite des mittleren potenziellen Jahresarbeitsvermögens für die 31 Standorte zu bestimmen, erfolgten unter Berücksichtigung der in Kap. 3.3 genannten Vorgehensweise Leistungsplanberechnungen mit und ohne Ansatz einer Restwasserabgabe von 1/3 MNQ.

Vorgehen bei der Ermittlung des Potenzials durch Erhöhung der Ausbauwassermenge bei bestehenden Anlagenstandorten

Zur Identifizierung des Potenzials durch die Erhöhung der Ausbauwassermenge bei bestehenden Anlagenstandorten wurde zunächst für die 621 hessischen Wasserkraftwerke die jeweilige Differenz ΔQ zwischen dem Mittelwasserabfluss MQ_{WKA} und der Ausbauwassermenge Q_{A_Ist} sowie einem Abschlag von $1/3 MNQ_{WKA}$ ermittelt:

$$\Delta Q = MQ_{WKA} - Q_{A_Ist} - 1/3 MNQ_{WKA}$$

Gemäß Kap. 4.1.4 sind etwa 90 % der Wasserkraftanlagen in Hessen als Ausleitungskraftwerke zu charakterisieren und gewässerökologisch begründete Mindestwasserabflüsse im Mutterbett angezeigt. Der Abschlag von $1/3 MNQ_{WKA}$ soll dieser Situation Rechnung tragen, damit der für die Potenzialermittlung angenommene Ausbaugrad diese gewässerökologische und damit auch wirtschaftliche Anforderung berücksichtigt und nicht unrealistisch hoch angesetzt wird.

Ergibt sich für die Differenzwassermenge ΔQ ein positives Ergebnis wurde die hieraus resultierende zusätzliche Ausbauleistung P_{Zu} wie folgt berechnet:

$$P_{Zu} = \rho \cdot g \cdot \Delta Q \cdot h_f \cdot \eta_{Ges}$$

Dabei wurde für h_f die Ausbaufallhöhe der bestehenden Wasserkraftanlagen übernommen. Anschließend fanden wiederum nur noch die Wasserkraftanlagen Berücksichtigung, bei denen die potenzielle zusätzliche Leistung P_{Zu} mindestens 50 kW beträgt. Die entsprechenden WKA-Standorte wurden mit den jeweils zuständigen Wasserbehörden abgestimmt. Als Ergebnis verbleiben in Hessen 58 Wasserkraftanlagen, die über ein signifikantes Wasserkraftpotenzial durch Erhöhung des Ausbaudurchflusses verfügen.

Zur Berechnung des damit verbundenen mittleren Jahresarbeitsvermögens erfolgten Leistungsplanberechnungen gemäß der in Kap. 3.3 erläuterten Vorgehensweise für den Ist-Zustand E_{Ist} und das Szenario „Erhöhung der Ausbauwassermenge“ $E_{„Ausbau“}$. Dazu wurde den Datensätzen der 58 berücksichtigten WKA-Standorte jeweils eine weitere Turbine mit der Differenzwassermenge ΔQ als maximalem Durchfluss zugefügt. Wiederum waren Detailuntersuchungen zu den jeweiligen Standorten nicht Gegenstand der durchgeführten Analyse und sind etwaigen konkreten Planungsvorhaben vorbehalten, so dass die berechneten Ergebnisse im Einzelfall mit Unsicherheiten behaftet sein können. Das zusätzliche Arbeitsvermögen E_{Zu} ergibt sich somit aus:

$$E_{Zu} = E_{„Ausbau“} - E_{Ist}$$

Die Darstellung der resultierenden Ergebnisse erfolgt gemäß Tab. 4.10 und Tab. 4.11 getrennt für die drei folgenden Kategorien, die auf der Ausbauleistung im Ist-Zustand P_{Ist} basieren:

- a) $P_{Ist} \geq 100 \text{ kW}$
- b) $50 \leq P_{Ist} < 100 \text{ kW}$
- c) $P_{Ist} < 50 \text{ kW}$

Vorgehen bei der Ermittlung des Potenzials durch Modernisierung der vorhandenen Wasserkraftanlagen

Neben den genannten Aspekten kann die Leistungsfähigkeit der vorhandenen Wasserkraftanlagen auch durch verschiedenste technische Modernisierungsmaßnahmen wie z. B. die Generalüberholung der Turbine, dem Austausch von Getriebe und Generator, der Erneuerung von Rechen und Rechenreiniger, etc. erhöht werden. Die damit verbundenen Ertragssteigerungen sind sehr stark von der individuellen Situation abhängig. Da eine differenzierte Einzelfallbetrachtung aufgrund des damit verbundenen planerischen Aufwandes nicht Gegenstand der durchgeführten Untersuchungen war, sind zur Ermittlung des Potenzials durch Modernisierung der vorhandenen WKA-Standorte die folgenden mittleren Steigerungsraten angesetzt worden:

- | | | |
|----|---|--------------------|
| a) | $P_{\text{Ist}} \geq 100 \text{ kW}$ | Steigerung um 5 % |
| b) | $50 \leq P_{\text{Ist}} < 100 \text{ kW}$ | Steigerung um 8 % |
| c) | $P_{\text{Ist}} < 50 \text{ kW}$ | Steigerung um 10 % |

Das resultierende Potenzial durch Modernisierung der hessischen Wasserkraftanlagen mit einer Ausbauleistung kleiner 50 kW liegt demnach bei etwa 700 kW. Selbst bei einer mittleren Steigung von 25 % würde sich für diese Anlagen ein zusätzliches Potenzial an Leistung von „nur“ 1,75 MW ergeben. Zudem kann davon ausgegangen werden, dass die technischen Modernisierungsmöglichkeiten an Kleinstandorten aufgrund der wirtschaftlichen Randbedingungen häufig nicht oder zumindest nicht vollständig durchgeführt werden. Folglich kommt diesem Steigerungsanteil hessenweit gesehen eine geringe energetische Bedeutung zu und wurde bei der Berechnung des Gesamtpotenzials nicht in Ansatz gebracht.

Ergebnisse

Die aus den zuvor erläuterten Arbeitsschritten resultierenden Ergebnisse zeigen auf, dass die insgesamt in Hessen installierte Leistung durch Neubau- bzw. Reaktivierungsmaßnahmen an vorhandenen, jedoch nicht genutzten Wehranlagen um 8 MW gesteigert werden kann. Durch die Erhöhung des Ausbaugrades können potenziell weitere 12 MW und durch die Verbesserung des Wirkungsgrades in Folge von Modernisierungsmaßnahmen noch einmal etwa 4 MW erschlossen werden. Somit beträgt das gesamte technische Ausbaupotenzial bezogen auf die installierte Leistung 24 MW. Wie in Tab. 4.10 aufgeführt, resultiert hieraus unter Berücksichtigung des bereits genutzten Potenzials ein technisches Gesamtpotenzial von ca. 116 MW installierter Leistung.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass insbesondere die Angabe des technischen Potenzials durch Erhöhung des Ausbaugrades allein durch die installierte Leistung wenig aussagekräftig ist und nicht direkt dem korrespondierenden Jahresarbeitsvermögen entspricht. So ergibt sich auf Basis der durchgeführten Leistungsplanberechnungen aus der durch die Erhöhung der Ausbauwassermenge zusätzlich installierten Leistung von 12 MW ein potenzielles mittleres Jahresarbeitsvermögen von etwa 37 GWh/a. Dies entspricht einer Auslastung von ca. 3.100 Volllaststunden pro Jahr. Zusammen mit dem mittleren potenziellen Jahresarbeitsvermögen aus Neubau bzw. Reaktivierung in Höhe von knapp

40 GWh/a sowie aus Modernisierungsmaßnahmen (20 GWh/a) summiert sich das ermittelte Ausbaupotenzial auf knapp 100 GWh/a (vgl. Tab. 4.11). Das mittlere Gesamtwasserkraftpotenzial in Hessen beträgt somit rund 520 GWh/a. Der derzeit nicht genutzte Anteil liegt bei knapp 20 %.

Tab. 4.10: Das Wasserkraftpotenzial in Hessen bezogen auf die installierte Leistung (Stand: Juli 2011)

Leistungsbereich Bestand	techn. Ausbaupotenzial Leistung in [MW] durch				genutztes Potenzial [MW]	Summe [MW]
	Neubau / Reaktivierung	Ausbau	Modernisierung	Summe		
$P \geq 100 \text{ kW}$	7	7	4	18	82	100
$50 \text{ kW} \leq P < 100 \text{ kW}$	1	2	0	3	3	6
$P < 50 \text{ kW}$	-	3	-	3	7	10
Summe:	8	12	4	24	92	116

Bei der Interpretation der in Tab. 4.11 dargestellten Berechnungsergebnisse ist zu berücksichtigen, dass bei der Ermittlung der Potenziale aus Neubau bzw. Reaktivierung und aus der Erhöhung des Ausbaudurchflusses eine Restwasserabgabe von 1/3 MNQ angesetzt wurde. Das für die 621 in Betrieb befindlichen WKA-Standorte errechnete Arbeitsvermögen für den Ist-Zustand, das als derzeit genutztes Potenzial angesehen wird, berücksichtigt dagegen „nur“ die zurzeit in der DB Wanderhindernisse dokumentierten Restwasserabgaben. Folglich ist das berechnete Gesamtpotenzial auch von der Umsetzung dieser gewässerökologischen Anforderungen abhängig und unterliegt entsprechenden Schwankungsbreiten.

Tab. 4.11: Das Wasserkraftpotenzial in Hessen bezogen auf das Jahresarbeitsvermögen (Stand: Juli 2011)

Leistungsbereich Bestand	techn. Ausbaupotenzial Jahresarbeit in [GWh/a] durch				genutztes Potenzial [GWh/a]	Gesamt- potenzial [GWh/a]
	Neubau / Reaktivierung	Ausbau	Modernisierung	Summe		
$P \geq 100 \text{ kW}$	36	20	19	75	373	448
$50 \text{ kW} \leq P < 100 \text{ kW}$	3	7	1	11	14	25
$P < 50 \text{ kW}$	-	10	-	10	38	48
Summe:	39	37	20	96	425	521

So beträgt das mittlere Jahresarbeitsvermögen der 621 in Betrieb befindlichen Wasserkraftanlagen bei einer Restwasserabgabe von 1/3 MNQ an allen WKA-Standorten etwa 390 GWh/a (vgl. Kap. 4.2.1, RW-Szenario 1). Das Gesamtpotenzial errechnet sich unter Berücksichtigung dieser Anforderungen und dem damit verbundenen Ausbaupotenzial von 100 GWh/a auf 490 GWh/a.

Demgegenüber steht das Potenzial ohne Ansatz einer Mindestwasserabgabe. Dieses steigt bezogen auf den Ausbau von 100 GWh/a auf rund 110 GWh/a an. Zusammen mit dem Jahresarbeitsvermögen der 621 hessischen Wasserkraftanlagen ohne Mindestwasserabgabe (vgl. Kap. 4.2.1, RW-Szenario 3), das mit ca. 430 GWh/a angegeben werden kann, resultiert ein Wasserkraftpotenzial in Hessen von 540 GWh/a.

Somit variiert das mittlere potenzielle Jahresarbeitsvermögen aus Wasserkraft in Hessen in Abhängigkeit von der Randbedingung „Restwasserabgabe 1/3 MNQ“ zwischen 490 und 540 GWh/a und dürfte damit innerhalb der natürlichen jährlichen Schwankungsbreiten liegen, die insbesondere auf das jährlich wechselnde Wasserdargebot zurückzuführen sind.

5 ANSÄTZE ZUR WIRTSCHAFTLICHEN ANALYSE DES EINZELFALLS

Die im Planungswerkzeug „WKA-Aspekte“ integrierten Ansätze zur wirtschaftlichen Analyse des Einzelfalls basieren ebenfalls auf den in Kap. 3.3 beschriebenen Leistungsplanberechnungen. Demnach können für jeden Anlagenstandort verschiedene technische und gewässerökologische Verbesserungsmaßnahmen definiert und deren Einfluss auf das energetische Leistungsvermögen berechnet werden. Darauf aufbauend können die zu erzielenden Einnahmen bilanziert und den zu erwartenden Investitions- und Unterhaltungskosten durch verschiedene finanzmathematische Methoden gegenübergestellt werden. Die einzelnen Arbeitsschritte und Analysen wurden im Projektverlauf an diversen Beispielanlagen verifiziert. Dazu zählen eine Kleinanlage mit einer Ausbauleistung kleiner 10 kW, mittelgroße WKA-Standorte mit einer Ausbauleistung zwischen 100 und 500 kW sowie große Wasserkraftanlagen mit einer installierten Leistung größer 1 MW.

Darüber hinaus wird auf vergleichbare Untersuchungen verwiesen (vgl. [45] und [40]), bei denen die verschiedenen Methoden auch erfolgreich angewendet wurden. In diesem Kapitel werden die berücksichtigten Berechnungsansätze zusammenfassend beschrieben. Die detaillierten Erläuterungen sind dem Handbuch zum Planungswerkzeug zu entnehmen.

5.1 Eingabe von Verbesserungsmaßnahmen

Für die Eingabe von Planungsvarianten zur Verbesserung der jeweiligen gewässerökologischen und/oder technischen Situation stehen im Planungswerkzeug folgende „Maßnahmentypen“ zur Verfügung, die Einfluss auf das Arbeitsvermögen haben und daher bei der Leistungsplanberechnung berücksichtigt werden:

- Wasserabgaben zur Dotation
 - der ggf. vorhandenen Ausleitungsstrecke
 - von Fischaufstiegsanlagen (inkl. Lockströmung)
 - von Einrichtungen zum Fischschutz und -abstieg
- Technische Optimierung durch Veränderung
 - des Anlagenwirkungsgrades η_A
 - der hydraulischen Verluste h_V
 - der Stauhöhe
 - des Maschinensatzes (z. B. durch Installation einer Restwasserturbine)

Auf dieser Basis können durch Variation der einzelnen Eingangsparameter beliebige Szenarienrechnungen durchgeführt werden. Dazu zählen landesweite bzw. überregionale Betrachtungen, wie z. B. die für das Land Hessen durchgeführten Berechnungen verschiedener Restwasserszenarien (vgl. Kap. 4.2.1), als auch die Analyse des Einflusses konkreter Planungsvarianten im Einzelfall. So wirken sich beispielsweise die in Abb. 5.1 dargestellten Maßnahmen zur Verbesserung der gewässerökologischen Situation auch auf das zur energetischen Nutzung verfügbare Wasserdargebot und das Leistungsvermögen des beispielhaft ausgewählten WKA-Standortes aus.

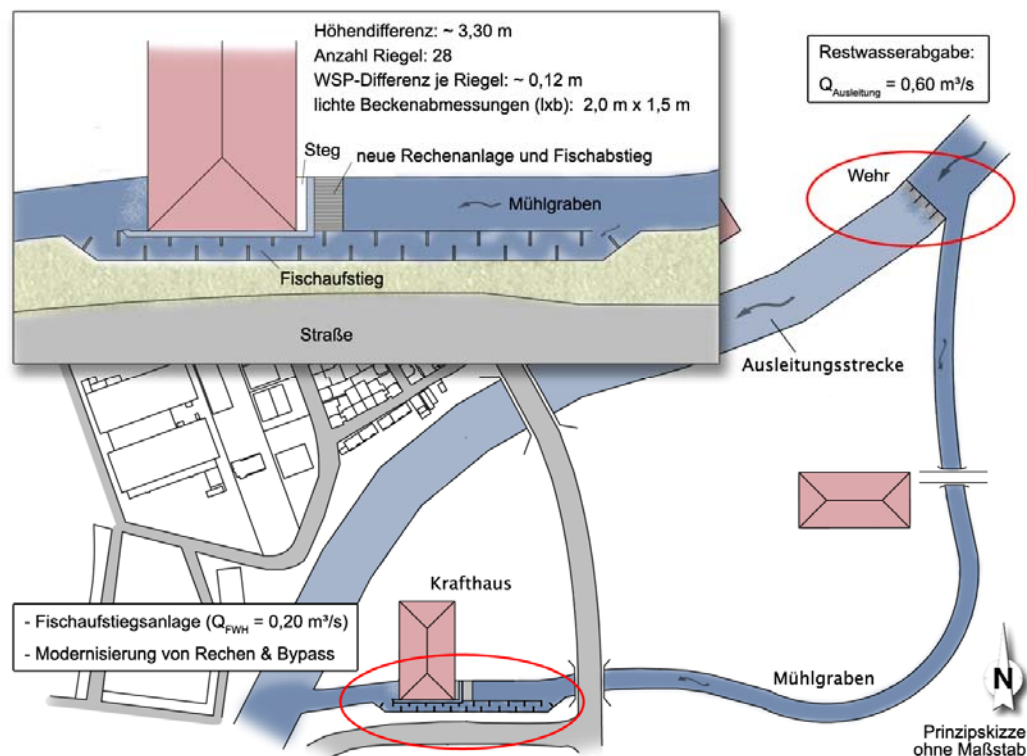


Abb. 5.1: Beispielhafte Verbesserungsmaßnahmen an einem WKA-Standort

Zur Berücksichtigung des jeweiligen finanziellen Aufwandes können sowohl die Investitionen als auch die variablen Kosten der jeweiligen Maßnahmen in Ansatz gebracht werden. Zusätzlich dazu sind die Abschreibungsdauer und der Realzinssatz anzugeben. Liegen keine Kostenschätzungen aus vorhandenen Planunterlagen vor, können grobe Richtpreise aus hinterlegten Kostentabellen entnommen werden, die der einschlägigen Fachliteratur, Richtpreisangeboten im Rahmen früherer Planungsvorhaben sowie dem Maßnahmenprogramm zur Umsetzung der WRRL (vgl. [28]) entstammen. Die jeweiligen Kostengrößen könnten getrennt für beliebig viele und vom Benutzer definierbare Leistungspositionen in Ansatz gebracht werden. Zudem stehen als Eingabehilfe für jeden Maßnahmen-typ die häufigsten Positionen als vordefinierte „Standardeinträge“ in einem Auswahl-feld zur Verfügung. Darin sind beispielsweise für die Eingabe von Fischaufstiegsanlagen folgenden Positionen enthalten:

- Flächenerwerb
- bauliche Investitionen zum Neubau einer Fischaufstiegsanlage
- bauliche Investitionen zur Optimierung einer bestehenden Fischaufstiegsanlage
- Ingenieurhonorar
- Unvorhergesehenes und sonstige Investitionen

5.2 Ermittlung der jährlichen Einnahmen

Die Berechnung der mittleren jährlichen Einnahmen basiert auf den Vergütungssätzen des EEG. Hier kann im Planungswerkzeug zwischen den Fassungen von 2000, 2004, 2009 und 2012 unterschieden werden¹⁴. Die Ermittlung des für einzelne Wasserkraftanlagen anzusetzenden mittleren Vergütungssatzes unter Berücksichtigung der in Tab. 5.1 dargestellten Leistungsklassen und Vergütungssätze erfolgt automatisiert. Alternativ kann zudem ein benutzerdefinierter Vergütungssatz angesetzt werden, da gerade bei kleinen Wasserkraftanlagen häufig eine Kombination aus Eigenverbrauch und Einspeisung mit entsprechender EEG-Vergütung vorliegt. Diese Einnahmesituation kann bei Bedarf durch die Angabe einer prozentualen Verteilung zwischen dem Eigenverbrauch und dem Anteil, der gemäß EEG vergütet wird, im Planungswerkzeug abgebildet werden.

Tab. 5.1: Vergütungssätze gemäß EEG (vgl. [11], [12] und [13])

Leistungsklasse	Einheit	EEG 2000	EEG 2004		EEG 2009	
			Neubau	Modernisierung	Neubau	Modernisierung
bis 0,5 MW	[Cent/kWh]	7,67	9,67		12,67	11,67
0,5 MW bis 2 MW		6,65	6,65		8,65	8,65
2 MW bis 5 MW		6,65	6,65		7,65	8,65

Durch die Gegenüberstellung der im Ist-Zustand und im jeweiligen Szenario zu erwartenden Erlöse ergibt sich die aus den angesetzten Planungsvarianten resultierende Einnahmeänderung. In Tab. 5.2 ist für einen beispielhaft ausgewählten WKA-Standort die entsprechende Ergebnisdarstellung aus dem Planungswerkzeug „WKA-Aspekte“ abgebildet.

¹⁴ Während der Projektlaufzeit wurde das EEG novelliert (EEG 2012). Die mit dieser Novellierung verbundenen Vergütungssätze sind ebenfalls im Planungswerkzeug implementiert, jedoch noch nicht in der Tab. 5.1 aufgeführt.

Tab. 5.2: Abschätzung der jährlichen Einnahmesituation (beispielhafter Auszug aus den Ergebnisausdrucken des Planungswerkzeuges „WKA-Aspekte“)

		Istzustand	Szenario Variante_01
Leistungsanteil bis einschließlich 500 kW	[%]	100,00	100,00
Vergütung nach EEG (Jahr)/manuell	[-]	2000	2009
Vergütungskategorie nach EEG	[-]	-	Modernisierung
Vergütung bis einschließlich 500 kW	[€/kWh]	0,0767	0,1167
jährliche Einnahmen	[€/a]	60.332	80.255
Einnahmenänderung	[€/a]	-	19.922

5.3 Betriebswirtschaftliche Analyse

In das Planungswerkzeug sind zur Bewertung der betriebswirtschaftlichen Auswirkungen der jeweils geplanten Verbesserungsmaßnahmen die zwei im Folgenden kurz erläuterten finanzmathematischen Ansätze integriert.

5.3.1 Annuitätenmethode

Die Annuitätenmethode ist eine dynamische Investitionsrechnung, bei der Ein- und Auszahlungsbarwerte in gleiche Jahresbeträge (Annuitäten) umgerechnet werden. Lohnend ist eine Investition dann, wenn für den jeweils gewählten kalkulatorischen Zinssatz ein durchschnittlicher jährlicher Überschuss entsteht. Folglich werden im Rahmen dieser „Relativbetrachtung“ die jährlich zu erwartenden Einnahmeänderungen den aus den Einzelmaßnahmen resultierenden jährlichen Fix- und Unterhaltungskosten gegenübergestellt. Während die Einnahmensituation aus oben dargelegten Arbeitsschritten bereits bekannt ist, werden die Investitionen I in eine Reihe gleich hoher Zahlungen A (Annuität), die über einen bestimmten Zeitraum anfallen, gemäß folgender Beziehung berechnet:

$$A = I \cdot \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1}$$

mit:

A Annuität [Euro/a]

I Investitionskosten [Euro]

- i kalkulatorischer Zinssatz [%]
n Zahl betrachteter Jahre [a]

Darauf aufbauend ergibt sich die jährliche Belastung A_{Ges} aus der Summe der berechneten jährlichen Fixkosten A_{Fix} (= Annuität A) und der anzusetzenden variablen Kosten A_{Var} (z. B. Aufwendungen für Betriebsmittel, Wartung, Instandhaltung, Reparaturen, Versicherungen, etc.):

$$A_{Ges} = A_{Fix} + A_{Var}$$

Zusammenfassend kann auf diese Weise - wie in Tab. 5.3 dargestellt - eine erste Größenordnung der zu erwartenden zusätzlichen jährlichen Erträge bzw. des zu erwartenden jährlichen Aufwandes ermittelt werden. Zudem sind der Einfluss von Ungenauigkeiten bei den Leistungsplanberechnungen und ggf. vorhandene absolute Fehler bei dieser Relativbetrachtung i. d. R. von geringerer Bedeutung als bei der Bilanzierung der Totalwerte.

Tab. 5.3: Abschätzung der betriebswirtschaftlichen Auswirkungen auf Basis der Annuitätenmethode (beispielhafter Auszug aus den Ergebnisausdrücken des Planungswerkzeuges „WKA-Aspekte“)

		Einnahmen [€/a]
Änderung der Einnahmen durch höhere Vergütung		27.508
Änderung der Einnahmen durch Produktionsänderung		-7.586
Summe der jährlichen Einnahmenänderung		19.922
	Investition* [€]	Kosten [€/a]
fixe Kosten aus Investitionen zur technischen Optimierung	0	0
fixe Kosten aus Investitionen zum Bau eines Fischaufstieges	185.000	14.845
fixe Kosten aus Investitionen zum Fischschutz/Fischabstieg	40.000	3.210
fixe Kosten aus Investitionen im Bereich Gewässermaßnahmen	0	0
Summe Investitionen/fixe Kosten	225.000	18.055
variable Kosten (Personalkosten)		2.000
variable Kosten (allg. Betriebskosten)		0
Summe variable Kosten		2.000
Summe der jährlichen Kosten		20.055
Änderung der Ertragssituation		-132

* Der jeweils angesetzte kalkulatorische Zinssatz und die Anzahl der betrachteten Jahre ist dem Punkt 5 "Verbesserungsmaßnahmen" zu entnehmen.

5.3.2 Kapitalwertmethode

Die Kapitalwertmethode ist ebenfalls ein finanzmathematisches Verfahren der Investitionsrechnung. So erhält man den Kapitalwert einer betrachteten Investition durch Auf- oder Abzinsung (Diskontierung) auf den Betrachtungs- oder Entscheidungszeitpunkt und anschließender Addition aller mit der Investition verbundenen Einnahmen und Ausgaben. Ist der Kapitalwert positiv, so ist die Investition, bezogen auf den angesetzten kalkulatorischen Zinssatz, betriebswirtschaftlich vorteilhaft zu charakterisieren.

Die entsprechende Umrechnung der jährlichen Einnahmenänderung w sowie der variablen Kosten w_k auf den „heutigen Zeitpunkt“ basiert auf folgenden Zusammenhängen:

$$X_w = w \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{(1+i)^n \cdot i} \quad \text{bzw.} \quad X_k = w_k \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{(1+i)^n \cdot i}$$

mit:

X_w	Barwert der jährlichen Einnahmeänderung [Euro]
X_k	Barwert der variablen Kosten [Euro]
w	jährliche Einnahmeänderung [Euro/a]
w_k	jährliche variable Kosten [Euro/a]
i	kalkulatorischer Zinssatz [%]
n	Zahl betrachteter Jahre [a]

Aus diesen Größen sowie unter Berücksichtigung der zum Betrachtungszeitpunkt zu tätigen Investition I ergibt sich gemäß Abb. 5.2 der Kapitalwert der Gesamtmaßnahme X_{Ges} :

$$X_{\text{Ges}} = X_w - (I + X_k)$$

Ein entsprechendes Berechnungsbeispiel ist der Tab. 5.4 zu entnehmen.

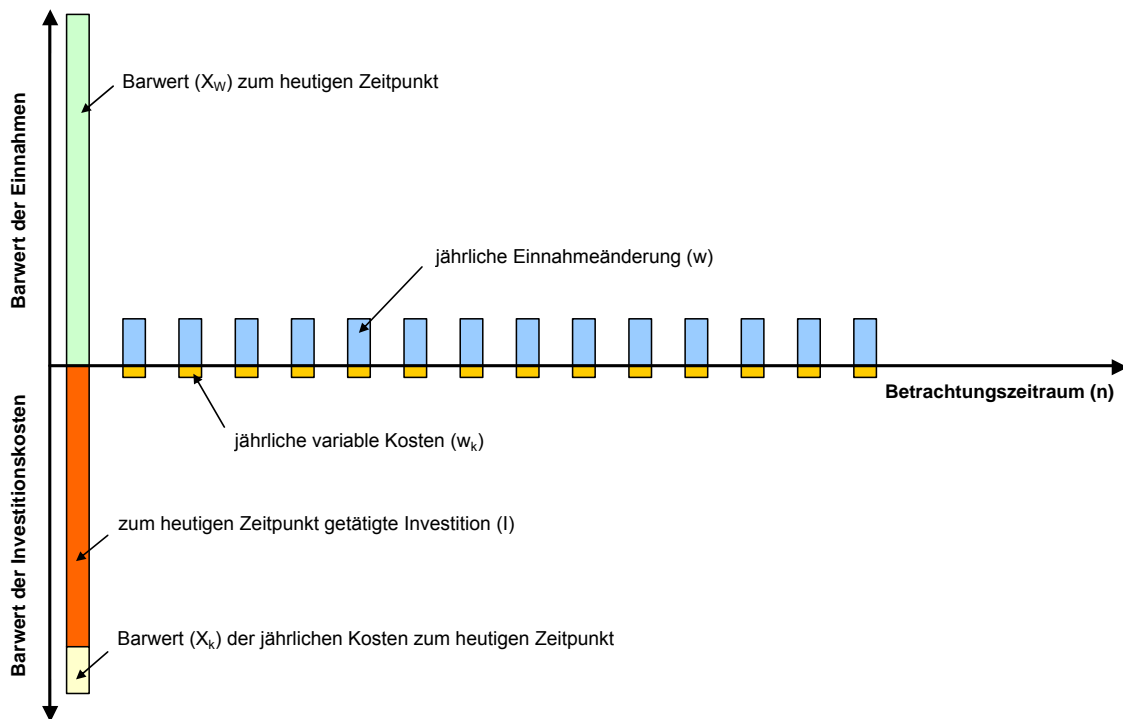


Abb. 5.2: Veranschaulichung der Kapitalwertberechnung durch Auf- und Abzinsung aller mit der Investition verbundenen Einnahmen und Ausgaben

Tab. 5.4: Abschätzung der betriebswirtschaftlichen Auswirkungen auf Basis der Kapitalwertmethode (beispielhafter Auszug aus den Ergebnisausdrücken des Planungswerkzeuges „WKA-Aspekte“)

Betrachtungszeitraum (n)	[a]	20,00	
Relativzinssatz bzw. kalkulatorischer Zinssatz (i)	[%]	5,00	
jährliche Einnahmenänderung (w)	[€/a]	19.922	
Barwert (Xw) aus der jährlichen Einnahmenänderung	[€]		248.277
Summe der Investitionen (I)	[€]		225.000
variable jährliche Kosten (wk)	[€/a]	2.000	
Barwert (Xk) der variablen jährlichen Kosten zum heutigen Zeitpunkt	[€]		24.924
Barwert X der Investitionskosten (I + Xk)	[€]		249.924
Kapitalwert	[€]		-1.648

Routine zur Ermittlung der Kostenverteilung

Auf Basis der berechneten Kapital- bzw. Barwerte können verschiedenste Überlegungen zur Finanzierung der jeweiligen gewässerökologischen Verbesserungsmaßnahmen durchgeführt werden. So könnte beispielsweise ein zu definierender Prozentsatz des Barwertes der Einnahmenänderung X_w als Anreiz herangezogen werden, gewässerökologische Verbesserungsmaßnahmen durchzuführen. Der verbleibende Anteil stünde zur Deckung des Barwertes der Kostenpositionen zur Verfügung. Bei diesem Beispiel ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich aus diesem Vorgehen durchaus auch Finanzierungslücken ergeben können, die durch anderweitige Mittel auszugleichen wären.

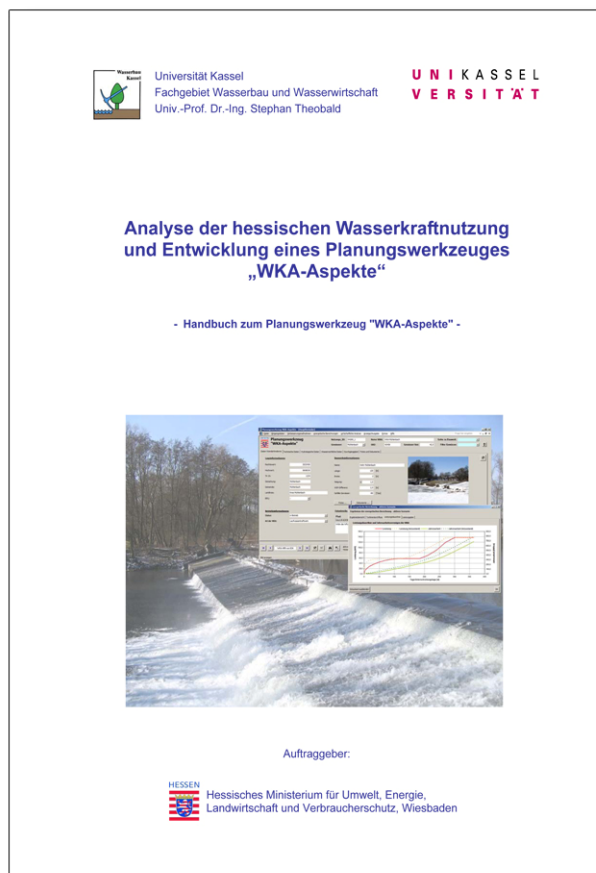
6 PLANUNGSWERKZEUG „WKA-ASPEKTE“

Zentraler Bestandteil des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens war neben der dargelegten Analyse zur Situation der Wasserkraftnutzung in Hessen die Entwicklung eines Planungswerkzeuges, das dem jeweiligen Nutzer die Durchführung der in den vorhergehenden Kapiteln erläuterten Arbeitsschritte ermöglicht und in der hessischen Wasserwirtschaftsverwaltung zum Einsatz kommen soll. Als wesentliche Funktionen dieses Werkzeuges können beispielhaft genannt werden:

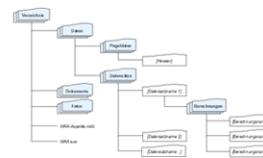
- Sammlung und Vorhaltung der Informationen zu den hessischen WKA-Standorten unter Berücksichtigung
 - einer zentralen Datenhaltung
 - eines möglichst schnellen und übersichtlichen Zugriffs auf die jeweiligen Detailinformationen
- Ermittlung von Kennzahlen zur Gesamtsituation bzw. beliebiger Gewässerabschnitte in Bezug auf
 - Anzahl, Leistung und Jahresarbeitsvermögen der jeweiligen Wasserkraftanlagen
 - die gewässerökologische Situation am Anlagenstandort (Auf- und Abwärtspassierbarkeit, Fischschutz, Restwasserabgabe, etc.) und den resultierenden „Handlungsbedarf“
 - die energetischen Auswirkungen verschiedenster Szenarienrechnungen (Restwasserabgaben, Wasserkraftpotenzial, etc.) auf Basis von Leistungsplanberechnungen
- Bereitstellung von Methoden zur wirtschaftlichen Detailanalyse im Einzelfall als Grundlage für
 - ein einheitliches Vorgehen bei der Konzeptionierung und Umsetzung von gewässerökologischen Verbesserungsmaßnahmen
 - Genehmigungsverfahren
 - Überlegungen zur Finanzierung von gewässerökologischen und/oder technischen Verbesserungsmaßnahmen

Somit hat das Planungswerkzeug sowohl engen Bezug zum Umsetzungsprozess der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) als auch zur Erneuerbare Energien-Richtlinie (vgl. [21]) und den jeweiligen gesetzlichen Regelungen nach WHG bzw. HWG (vgl. [50] bzw. [37]).

Die im entwickelten und der hessischen Wasserwirtschaftsverwaltung bereit gestellten Planungswerkzeug „WKA-Aspekte“ implementierten Berechnungsansätze und Funktionen sind gemäß Abb. 6.1 in einem ausführlichen Handbuch dokumentiert. Zudem wird auf [46] verwiesen. Aufgrund der genannten ausführlichen Dokumentationen und Datenlieferungen werden in diesem Kapitel lediglich die übergeordneten konzeptionellen Aspekte zusammenfassend erläutert.



➔ Datenstruktur



➔ theoretische Grundlagen

$$P = \rho \cdot g \cdot (h_{\text{Roh}} - h_{\text{Verluste}}) \cdot Q(t) \cdot \eta_T \cdot \eta_A$$

$$E_A = \int P(t) dt$$

$$A = \text{Zins} + \text{Tilgung} = 1 \cdot \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1}$$

➔ Programmfunktionen



➔ Tutorial (Benutzeroberfläche)



Abb. 6.1: Inhalte des Handbuches zum Planungswerkzeug „WKA-Aspekte“

Gemeinsam mit dem Planungswerkzeug wird ein Datensatz bereit gestellt, der die aktuellen Daten zu allen hessischen Wasserkraftanlagen enthält und die Durchführung der o. g. Arbeitsschritte und Analysen ohne weitere Vorarbeiten ermöglicht. Es wird darauf hingewiesen, dass die in Kap. 3.2 erläuterten Datenergänzungen und -verbesserungen auf eine hessenweite Analyse der Wasserkraftnutzung abzielen und für die Daten zu den Einzelanlagen keine Gewähr übernommen werden kann. Daher sind die zusammengestellten Daten und Berechnungsergebnisse bei der Verwendung für Einzelfalluntersuchungen und/oder gewässerbezogene Auswertungen zu plausibilisieren.

6.1 Ansatz und Konzept

Das entwickelte Planungswerkzeug versteht sich aus EDV-technischer Sicht als „Arbeits-handreicherung“, das auf die Datenbankanwendung MS Access zurückgreift. Der Einsatz dieser Arbeitshilfe erfordert somit keine besonderen Hard- bzw. Softwarevoraussetzungen und ist an Einzelarbeitsplätzen, die über eine MS Access-Version verfügen, möglich.

Datenmanagement

In Bezug auf das Datenmanagement wird zwischen den Daten der DB Wanderhindernisse und den Datensätzen des Planungswerkzeuges unterschieden.

Wie bereits aus den vorhergehenden Kapiteln ersichtlich, bilden die Daten der Wanderhinderniserfassung die inhaltliche Basis des Planungswerkzeuges. Diese wurden zu Projektbeginn durch einen einmaligen Export aus der seinerzeit aktuellen DB Wanderhindernisse zur Verfügung gestellt (vgl. Kap. 2.1). Diese einmalige Datenbereitstellung reicht aus, da die zu übernehmenden technischen Informationen der Wasserkraftanlagen keiner sehr großen Dynamik unterliegen. Die im Laufe der Projektbearbeitung ergänzten bzw. geänderten Datensätze werden durch einen ebenfalls einmaligen „Rücklauf“ in das aktuelle Gewässerstrukturgüteinformationssystem des Landes Hessen (GESIS 2), in das die DB Wanderhindernisse zwischenzeitlich integriert wurde, übernommen (vgl. Abb. 6.2). Im Rahmen der projektbegleitenden Arbeitsgruppentreffen wurde vereinbart, dass die damit verbundene Eingabe der Ergänzungen und Änderungen händisch durch die jeweils zuständigen und schreibberechtigten Oberen Wasserbehörden erfolgt. Als Grundlage dafür wurden sämtliche Änderungen tabellarisch dokumentiert.

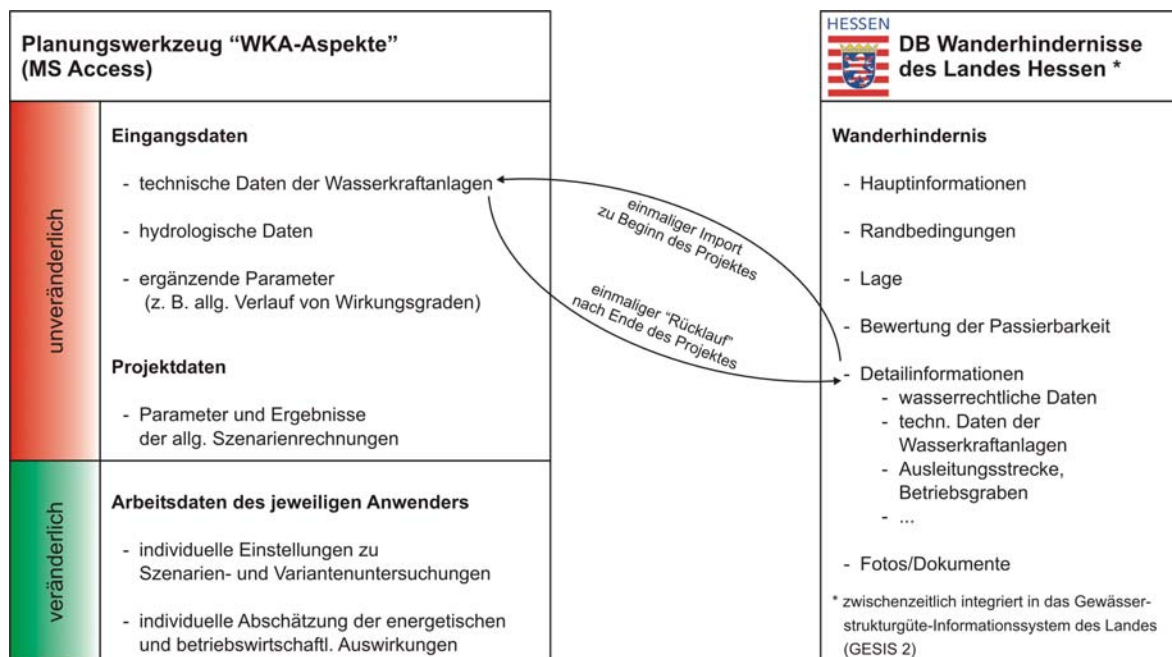


Abb. 6.2: Datentransfer zwischen dem Planungswerkzeug „WKA-Aspekte“ und der DB Wanderhindernisse

Demgegenüber beinhalten die Datensätze des Planungswerkzeuges neben den o. g. „Grunddaten“ zusätzliche Berechnungsparameter und -ergebnisse, die nicht in die DB Wanderhindernisse übernommen oder anderweitig zentral vorgehalten werden. Diese Konzeption ist sowohl aus EDV-technischen Gründen aufgrund des damit verbundenen programmier-technischen Aufwandes zur Anpassung der vorhandenen Anwendungen als auch aus inhaltlichen Erwägungen sinnvoll, da Anzahl und Art der Berechnungsvarianten variieren und lediglich temporären Charakter besitzen. Somit wird auf diese Weise gewährleistet, dass die Anwendung der Arbeitshilfe weder eine weitere zentrale Datenhaltung noch eine Erweiterung der Datenstruktur der DB Wanderhindernisse erfordert.

Aufgrund dieser Vorgehensweise wurde bei der Entwicklung des Planungswerkzeuges sichergestellt, dass die einmalig aus der DB Wanderhindernisse übernommenen und aktualisierten Datensätze nicht durch Ergänzungen, Veränderungen und Variantenuntersuchungen überschrieben werden können, sondern als „Urdatensatz“ vom jeweiligen Anwender jederzeit selbstständig wiederherzustellen sind.

Benutzeroberfläche und Rechenkern

Das Planungswerkzeug „WKA-Aspekte“ besteht aus einer „Benutzeroberfläche“ und dem „Rechenkern“. Während die Oberfläche zur Bedienung, Auswertung und Datenhaltung auf MS Access (Version 2003) basiert, wurde der Rechenkern, der sämtliche Lösungsalgorithmen enthält, mit Hilfe der Programmiersprache C/C++ als externer Programmbaustein entwickelt (vgl. Abb. 6.3). Die Access-Oberfläche selbst wurde dabei in ein Frontend- und Backend-Modul aufgeteilt. Das Frontend-Modul enthält alle Elemente des Planungswerkzeuges, die der Anwender direkt sieht. Also die komplette grafische Benutzeroberfläche bestehend aus Tabellen, Formularen, Eingabemasken, Menüstrukturen und Berichten inklusive der entsprechenden Funktionen, die auf Visual Basic for Applications (VBA) basieren. Das Backend-Modul umfasst dagegen sämtliche Datentabellen, auf die der Anwender mit Hilfe der Frontend-Version zugreifen kann. Der Vorteil dieser Aufteilung liegt darin, dass das Frontend-Modul bereits während der Entwicklungsphase leicht gegen eine neue Version ausgetauscht werden konnte, ohne dabei die Datensätze zu den WKA-Standorten sowie gespeicherte Berechnungsergebnisse zu gefährden. Darüber hinaus erleichtert dieser Aufbau zukünftige Programmupdates und/oder Weiterentwicklungen, da lediglich eine Datei ersetzt werden muss.

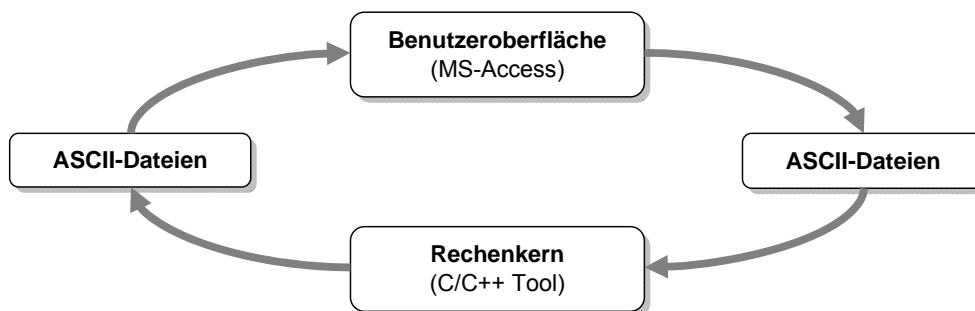


Abb. 6.3: Trennung zwischen Benutzeroberfläche und Rechenkern

Der Datenaustausch zwischen der Access-Oberfläche und dem Rechenkern sowie das Ausführen des externen Tools wurden mit Hilfe von VBA-Funktionen im Frontend-Modul realisiert. Durch dieses Konzept konnte eine Schnittstelle entwickelt werden, die den Export der Eingangsdaten aus dem Backend sowie den Import der Ergebnisdaten vom Rechenkern in die Benutzeroberfläche effektiv gewährleistet. Diese Struktur ermöglicht zudem eine einfache und leicht verständliche Datenhaltung auf Basis von ASCII-Dateien, einen schnellen Austausch von verschiedenen Datensätzen, eine übersichtliche Steuerung und Datenverwaltung sowie eine schnelle Berechnung über den externen Rechenkern.

Darüber hinaus war es Ziel, eine Benutzeroberfläche zu entwickeln, die dem Anwender durch bekannte Bedienelemente aus gängigen MS Office-Programmen (z. B. in Word und Excel die Befehle Öffnen, Speichern unter..., etc.) einen leichten Einstieg und durch einen möglichst selbsterklärenden Aufbau ein strukturiertes und intuitives Arbeiten ermöglicht (vgl. Abb. 6.4).

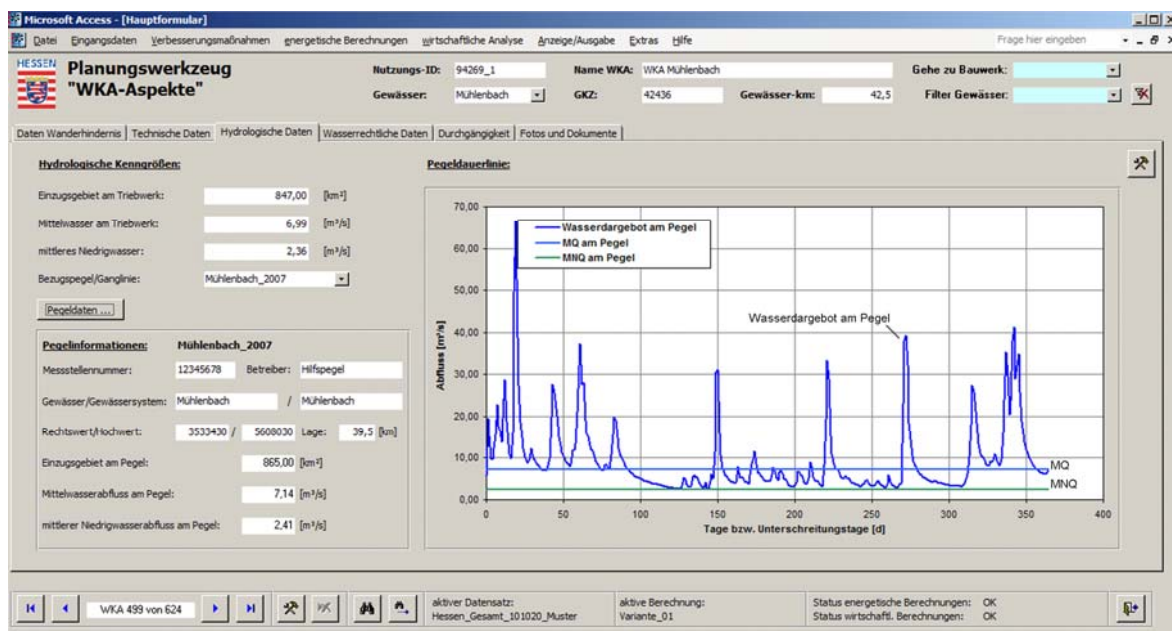


Abb. 6.4: Screenshot der Benutzeroberfläche des Planungswerkzeuges „WKA-Aspekte“

6.2 Implementierung in die hessische Wasserwirtschaftsverwaltung

Die Entwicklung des Planungswerkzeuges wurde von der hessischen Wasserwirtschaftsverwaltung intensiv begleitet. In diesem Kontext waren insbesondere die zwei in Tab. 6.1 dokumentierten Testeinweisungen sowie die jeweils mit der aktuellen Version des Planungswerkzeuges im Anschluss durchgeführten Testphasen von besonderer Bedeutung. Auf diese Weise wurde die Programmentwicklung durch das Testen der einzelnen Funktionen und durch die Rückmeldungen und Anregungen aus der praktischen Anwendung bei den RP'n unterstützt. Der intensive Austausch mit den jeweiligen Vertretern der Oberen Wasserbehörden lieferte zudem wertvolle Hinweise und Erkenntnisse, so dass auftretende Laufzeit- und Programmierungsfehler parallel zur Programmentwicklung korrigiert und weitergehende Verbesserungen eingearbeitet werden konnten.

Zudem wurde insbesondere durch die zweite Testphase sichergestellt, dass das Planungswerkzeug auch auf den unterschiedlichen PC-Systemen der Oberen Wasserbehörden eingesetzt werden kann. So fanden bei den einzelnen RP'n im Herbst 2010 aufgrund behördeninterner Software-Umstellungen beispielsweise verschiedene Betriebssysteme (Windows XP, Windows 7) und MS Office-Versionen (Access 2003, Access 2007) Anwendung. Durch entsprechende Aktualisierungen konnte das Tool jedoch bei jedem RP erfolgreich installiert und angewendet werden. Weitere Hinweise zu den benötigten Systemvoraussetzungen finden sich im Handbuch zum Planungswerkzeug.

Tab. 6.1: Zusammenstellung der durchgeführten Testphasen

Testphasen	Inhalte	Termin / Zeitfenster	Ort	Anzahl		
				Teilnehmer	Fehler	Hinweise
1. Testphase	1. Testeinweisung: - Allgemeine Erläuterungen zur Anwendung des Planungswerkzeuges - Testlauf an ausgewählten Beispieldaten - Übergabe des 1. Prototypen	16.11.2009	EDV-Raum RP Kassel	5	1	8
	anschließende 1. Testphase: - Erkennung von Fehlern durch die beispielhafte Anwendung bei den RP'n - Nennung von Verbesserungs- und Ergänzungsvorschlägen	16.11.2009 - 15.01.2010	-	7	12	8
2. Testphase	2. Testeinweisung: - Vorstellung der wesentlichen Neuerungen gegenüber dem 1. Prototypen - beispielhafte Anwendung der neuen Version	21.04.2010	EDV-Raum RP Kassel	5	11	28
	anschließende 2. Testphase: - Prüfung sämtlicher Funktionen des 2. Prototypen auf der Basis von 9 Testfällen	26.08.2010 - 22.09.2010	-	7	34	26

Diese einzelnen Testläufe erfolgten an Beispieldatensätzen, die von den jeweiligen Vertretern der RP'n ausgewählt wurden (vgl. Tab. 6.2), um jedem Teilnehmer die Anwendung an den ihm bekannten Wasserkraftanlagen zu ermöglichen. Aufgrund dieser frühzeitigen Einbindung der hessischen Wasserwirtschaftsverwaltung in den Entwicklungsprozess wird davon ausgegangen, dass die Akzeptanz für die zukünftige praktische Anwendung gewährleistet ist.

Tab. 6.2: Anzahl und Verteilung der im Rahmen der Testphasen berücksichtigten Beispieldatensätze

RP / RPU	Anzahl WKA Standorte
RP Kassel	7
RP Gießen	28
RPU Darmstadt	19
RPU Wiesbaden	6
RPU Frankfurt	7
Summe	67

7 ZUSAMMENFASSUNG

Wesentliche Ergebnisse des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens können wie folgt zusammengefasst werden:

- Durch die umfangreichen händischen Datenergänzungen und -plausibilisierungen wurden zu 186 Wasserkraftanlagen über 1.800 Datenbankeinträge aktualisiert. Hieraus resultiert sowohl eine quantitative Verbesserung der Datengrundlagen als auch eine wesentliche Qualitätssteigerung. Darüber hinaus wurde die Datenbasis durch zusätzliche Ergänzungs- und Plausibilisierungsroutinen weiter verdichtet, so dass die Situation der hessischen Wasserkraftnutzung belastbar abgebildet wird.
- In Hessen werden derzeit 621 Wasserkraftanlagen betrieben. Die installierte Gesamtleistung beträgt ca. 92 MW, der Median liegt bei 13 kW. Das mittlere Jahresarbeitsvermögen kann mit 425 GWh/a angegeben werden. Davon erzeugen die 12 Wasserkraftanlagen größer 1 MW etwa 2/3 der elektrischen Energie, während die 545 Klein- und Kleinststandorte unter 100 kW installierte Leistung einen Beitrag von 12 % leisten.
- In Bezug auf die Aufwärtspassierbarkeit werden gem. DB Wanderhindernisse etwa 84 % der hessischen WKA-Standorte als nicht passierbar bzw. weitgehend unpassierbar eingestuft. Ähnlich stellt sich die Situation bei der Beurteilung der Abwärtspassierbarkeit dar, für die an 64 % der Anlagen ein Handlungsbedarf besteht. Unabhängig davon sind 90 % der hessischen Wasserkraftanlagen als Ausleitungskraftwerke zu charakterisieren.
- Zur Berechnung der energetischen Auswirkungen verschiedener Mindestwasserabgaben auf die hessische Wasserkraftnutzung wurden drei RW-Szenarien näher untersucht, die die Bandbreite möglicher Verluste abbilden sollen. Demnach variieren die mit den angesetzten Restwasserabgaben einhergehenden Verluste an den einzelnen Wasserkraftanlagen in Abhängigkeit von Ausbaugrad und technischer Ausstattung sehr stark. Das Leistungsvermögen der Wasserkraftanlagen reduziert sich je nach RW-Szenario insgesamt um 34 bis 54 GWh/a. Dies entspricht einem Verlust zwischen 8 % und 13 % des mittleren Jahresarbeitsvermögens.
- Das technische Ausbaupotenzial beträgt unter Berücksichtigung wesentlicher gewässerökologischer Anforderungen etwa 100 GWh/a. Das mittlere technische Gesamtpotenzial aus Wasserkraft in Hessen liegt zwischen 490 und 540 GWh/a. Der derzeit nicht genutzte Anteil liegt bei ca. 20 %.
- Zentraler Bestandteil des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens war die Entwicklung des Planungswerkzeuges „WKA-Aspekte“, das dem jeweiligen Nutzer bei den RP'n die Daten zu den hessischen Wasserkraftanlagen bereitstellt sowie die Durchführung übergeordneter Szenarienrechnungen und die energetisch-wirtschaftliche Analyse des Einzelfalls ermöglicht.
- Verschiedene Ansätze zur betriebswirtschaftlichen Bewertung von gewässerökologischen Verbesserungsmaßnahmen im Einzelfall konnten in das Planungswerkzeug implementiert werden.

Zusammenfassend bieten die durchgeführten Untersuchungen somit die Chance, sowohl naturschutzfachliche als auch wirtschaftliche Interessen zu vereinbaren, da sie neben den Belangen wanderungswilliger aquatischer Lebewesen den wirtschaftlichen Ansprüchen der Wasserkraftnutzung auch ressourcenökonomischen Aspekten des Landes Rechnung tragen. Zudem fördert die systematische und nachvollziehbare Vorgehensweise den konstruktiven Dialog zwischen Wasserwirtschaftsverwaltung, Wasserkraftbetreibern und Vertretern des Naturschutzes. Mit Hilfe des entwickelten Planungswerkzeuges „WKA-Aspekte“ kann durch die Wasserwirtschaftsverwaltung zudem die konsensuale Lösung von aufgetretenen oder absehbaren Nutzungskonflikten zwischen den ökologischen, wasserwirtschaftlichen und nutzungsbezogenen Anforderungen an die Fließgewässer und die Konzeption möglicher „Win-Win-Situationen“ unterstützt werden.

Kassel, August 2011



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald

8 VERWENDETE LITERATUR UND UNTERLAGEN

- [1] Anderer, P., Dumont, U., 2010: Potentialermittlung für den Ausbau der Wasserkraftnutzung in Deutschland als Grundlage für die Entwicklung einer geeigneten Ausbaustrategie, Studie im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- [2] Anderer, P., Dumont, U., 2010: Potentialermittlung für den Ausbau der Wasserkraftnutzung in Deutschland - Kurzfassung, Studie im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- [3] Anderer, P., Dumont, U., Heimerl, St., Ruprecht, A. und U. Wolf-Schumann, 2010: Das Wasserkraftpotenzial in Deutschland. In Wasserwirtschaft 09/2010 S. 12-16.
- [4] Anderer, P., Dumont, U., Linnenweber C. und B. Schneider, 2009: Das Wasserkraftpotenzial in Rheinland-Pfalz. In Wasserwirtschaft 2009, Nr. 4, S. 223-227.
- [5] Anderer, P., Dumont, U., Stark, B. und U. Wolf-Schumann, 2010: Vom Linienpotenzial zum technischen Wasserkraftpotenzial – Methode. In Wasserwirtschaft 09/2010 S. 17-22.
- [6] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V. (AGEB), 2009: Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2008, Berlin.
- [7] Bauer, N., Ruprecht, A. und St. Heimerl, 2010: Ermittlung des Wasserkraftpotenzials an Wasserkraftanlagenstandorten mit einer Leistung über 1 MW in Deutschland. In Wasserwirtschaft 09/2010 S. 23-27.
- [8] Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, 1999: Restwasserleitfaden – Arbeitsanleitung zur Abschätzung von Mindestabflüssen in wasserkraftbedingten Ausleitungsstrecken. München.
- [9] Bega Wasserkraftanlagen GmbH, 1996: Turas Wasserräder, Broschüre, Bochum.
- [10] Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), 2010: Strategiepapier „Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft“, Bestandsaufnahme und Handlungsempfehlungen, beschlossen auf der 139. LAWA-VV am 25./26. März 2010 in Dresden.
- [11] Bundesgesetzblatt Teil I Nr. 13, 2000: Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien vom 29. März 2000. Bonn.
- [12] Bundesgesetzblatt Teil I Nr. 40, 2004: Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich vom 21. Juli 2004. Bonn.
- [13] Bundesgesetzblatt Teil Nr. 49, 2009: Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich und zur Änderung damit zusammenhängender Vorschriften vom 25. Oktober 2008, Bonn.

- [14] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2005: Leitfaden für die Vergütung von Strom aus Wasserkraft nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz für die Neuerrichtung und Modernisierung von Wasserkraftanlagen, Berlin.
- [15] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2009: Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2008, Berlin.
- [16] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2005: Die Wasserrahmenrichtlinie - Ergebnisse der Bestandsaufnahme 2004 in Deutschland, Berlin.
- [17] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW), 2010: BDEW-Presseinformation vom 25.02.2010: Haushaltsgröße beeinflusst Strombedarf, Berlin.
- [18] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), 2010: Entwurf des Merkblattes DWA-M 509, Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung, Hennef.
- [19] DVWK, 1996: Fischaufstiegsanlagen – Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle. DVWK Merkblatt 232. Kommissionsvertrieb, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.
- [20] Europäische Union, 2000: Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (WRRL), Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften vom 22.12.2000, L 327/1.
- [21] Europäische Union, 2008: Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG, Amtsblatt der Europäischen Union vom 5.6.2009, L 140/16.
- [22] Giesecke, J. und E. Mosonyi, 2009: Wasserkraftanlagen – Planung, Bau und Betrieb. 5. Auflage. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg und New York.
- [23] Heimerl, S. und J. Giesecke, 2004: Wasserkraftanteil an der elektrischen Stromerzeugung in Deutschland 2003. In Wasserwirtschaft 106/2004 S. 28-40.
- [24] Heimerl, S., 2005: Wasserkraft in Deutschland – wie geht es weiter?, Beitrag zur 2. Konferenz der Elektrizitätswirtschaft „Regenerative Energien – Mut zum Wandel“ des VDEW, 6./7. April 2005, Stuttgart.
- [25] Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG), 2010: Gewässerkundlicher Jahresbericht 2009, Hydrologie in Hessen - Heft 5, Wiesbaden.
- [26] Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten (HMUEB), 1994: Kleinwasserkraft in Hessen im Umfeld von Ökologie und Energie sowie Mindestabfluss in Ausleitungsstrecken, Untersuchungsphase I, Band 1 und 2, Wiesbaden.

- [27] Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUEL), 2009: Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie in Hessen, Bewirtschaftungsplan Hessen 2009-2015, 1. Auflage 2009, Wiesbaden.
- [28] Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUEL), 2009: Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie in Hessen, Maßnahmenprogramm 2009-2015, 1. Auflage 2009, Wiesbaden.
- [29] Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUEL), 2009: Energiebericht 2008 der Hessischen Landesregierung, Aktivitäten der Landesregierung und Energiestatistischer Teil, Wiesbaden.
- [30] Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (HMULV), 2007: Klimaschutzkonzept Hessen 2012, Wiesbaden.
- [31] Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (HMULV), 2008: Datenbank Wanderhindernisse.
- [32] Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (HMULV), 2008: Wirtschaftliche Analyse der Wassernutzung in Hessen 2001 / 2004, Wiesbaden.
- [33] Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (HMULV), 2008: Verordnung über die gute fachliche Praxis in der Fischerei und den Schutz der Fische (Hessische Fischereiverordnung - HFO) vom 17. Dezember 2008, Wiesbaden.
- [34] Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten (HMULF), 2002: Regelung zur Festsetzung der Mindestwassermenge in Fließgewässern bei der Entnahme und Wiedereinleitung von Wasser, Ausführungsvorschriften, Wiesbaden.
- [35] Hessisches Ministerium für Wirtschaft und Technik (HMWT), 1988: Wasserkraft-Reaktivierungsstudien als Einzelbände für die Landkreise Werra-Meißner-Kreis, Landkreis Hersfeld-Rotenburg, Main-Kinzig-Kreis, Rheingau-Taunus-, Main-Taunus- und Hochtaunuskreis, Schwalm-Eder-Kreis, Wetteraukreis, Landkreis Waldeck-Frankenberg, Wiesbaden.
- [36] Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung (HMWVL), 2007: Energiebericht 2006 der Hessischen Landesregierung, Aktivitäten der Landesregierung und Energiestatistischer Teil, Wiesbaden.
- [37] Hessisches Wassergesetz (HWG), 2010: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts in Hessen in der Fassung der Bekanntmachung vom 6. Mai 2005 (GVBl. I 2005, 305, zuletzt geändert durch Gesetz vom 4. März 2010 (GVBl. I, S. 85).
- [38] Kilian, T., 1998: Abflusscharakteristika und potentiell natürliche Grundrißformen von Fließgewässern in den verschiedenen Regionen Hessens, Dissertationschrift am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Darmstadt, Heft 100, Darmstadt.

- [39] Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), 2001: Empfehlungen zur Ermittlung von Mindestabflüssen in Ausleitungsstrecken von Wasserkraftanlagen und zur Festsetzung im wasserrechtlichen Vollzug, Kulturbuch-Verlag, Berlin.
- [40] Lang, T. und F. Roland, 2005: Wasserkraftnutzung, Restwasser und Durchgängigkeit an Vils und Rott in Niederbayern. Auswirkungen der Umsetzung der EU-WRRL und des aktuellen EEG auf Wasserkraftanlagen. Tagungsbeitrag zum Achten Internationalen Anwenderforum Kleinwasserkraftwerke. Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e. V. (OTTI), Regensburg.
- [41] Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW (MUNLV), 2005: Handbuch Querbauwerke, Düsseldorf.
- [42] Regierungspräsidium Kassel, 2007: Ableitung von Prioritäten bei Maßnahmen zur Verbesserung der aquatischen Durchgängigkeit in Gewässersystemen des Koordinierungsraumes Fulda/Diemel, Abschlussbericht eines Pilotprojektes zur Umsetzung der WRRL in Hessen, Kassel.
- [43] RITZ-ATRO Pumpwerksbau GmbH, 2001: Wasserkraftschnecken - Die neue Art der Energiegewinnung, Broschüre, Nürnberg.
- [44] Roland, F. und B. Wagner, 2007: Die Berücksichtigung von Wasserkraftanlagen und sonstigen Wanderhindernissen bei der Erstellung von Maßnahmenprogrammen gemäß EU-WRRL in Hessen. Tagungsbeitrag zum 9. JuWi-Treffen 2007. Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, Universität Kassel.
- [45] Roland, F. und T. Lang, 2006: Mögliche Auswirkungen der Verbesserung der biologischen Durchgängigkeit auf die Wasserkraftnutzung an Vils und Rott. Tagungsbeitrag zum Nürnberger Wasserwirtschaftstag 2006. DWA Landesverband Bayern, München.
- [46] Roland, F., 2011: Leistungsplanbasierte Variantenanalyse zur Wasserkraftnutzung - ein Expertensystem für Optimierungsansätze an Anlagenstandorten, Arbeitstitel der im Jahr 2011 geplanten Dissertationsschrift, FG Wasserbau und Wasserwirtschaft, Universität Kassel, Kassel.
- [47] Umweltbundesamt (UBA), 1998: Umweltverträglichkeit kleiner Wasserkraftwerke - Zielkonflikte zwischen Klima- und Gewässerschutz, UBA-Texte 13/98, Berlin.
- [48] Umweltbundesamt (UBA), 2001: Wasserkraftanlagen als erneuerbare Energiequelle - rechtliche und ökologische Aspekte -, UBA-Texte 01/01, Berlin.
- [49] Universität Kassel, Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Theobald, 2009: Unterlagen zur Vorlesung Wasserkraftanlagen, unveröffentlicht.
- [50] Wasserhaushaltsgesetz (WHG), 2009: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts in der Fassung der Bekanntmachung vom 22. Dezember 2008 (BGBl. I, S. 2986, zuletzt geändert durch Gesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I, S. 2585).