



© Christa Eder - Fotolia.com

2.13 Bildung, Nutzung und Bewirtschaftung des Wasserdargebotes in Deutschland

KLAUS D. AURADA

Formation, utilization and management of water resources in Germany: The article deals with aspects of large-scale water balance, including both prerequisite base data and anthropogenic modifications of the land surface, including volumes and areas of dams in Germany. Based on these, various approaches to the characterization of the water budget are presented. The conditions controlling water resources in Germany are presented with respect to their formation, utilization and, in particular, to storage capacity changes. The latter are characterized by an increase in the supply potential (available water resources) from 100.0% (1850) to 104.6% (2000), and a decrease of the hazard potential (reducible water resources) from 99.8% (1850) to 95.3% (2000). Considering the possible changed climatic variability, it is necessary to raise the flexibility of these cooperative systems in catchment areas and supply districts in Germany.

Es wird von dem Grundgedanken ausgegangen, dass technische Infrastruktursysteme nicht als räumlich neutral angesehen werden können, sondern sowohl eine natur- als auch sozialräumliche Dimension aufweisen; die Funktionsfähigkeit des technischen Systems ist damit von der Verfügbarkeit des natürlichen Systems abhängig (HUGHES 1989, JOERGES 1992).

Das soziotechnische System bildet somit den Rahmen eines Geosystems, als es konstitutionell (raumordnend) und funktionell (prozessbewirtschaftend) dieses System durch technische Sach- und Handlungssysteme (ROPHL 1999) gestaltet, nutzt und verändert (EIDEN 2006); historisch durch eine konvergent-, später divergent-naturraumnutzende Kolonisierung bzw. naturraumverändernde Implementierung (AURADA 2003).

Die Bildung des klimatisch gesteuerten Wasserdargebotes erfolgt in naturräumlich strukturierten, durch Wasserscheiden begrenzten Gewässereinzugsgebieten, die Nutzung des Wasserdargebotes in diesen Gebieten

zugeordneten, technisch strukturierten (organisierten) Versorgungsgebieten und die Bewirtschaftung (Regulation) des Wasserdargebotes in einem beide Teilsysteme umfassenden, gemeinsam sich entwickelnden und gemeinsam reagierenden kooperativen Gesamtsystem (AURADA 2008).

Diese wasserwirtschaftlichen Systeme umfassen neben dem Gewässernetz auch das Einzugsgebiet, dessen naturgeschichtlich entstandene Naturraumstruktur durch eine historisch entwickelte Flächennutzungsstruktur verändert worden ist. Diese schließt die ebenfalls historisch entstandenen gewässernetz- und leitungsnetzorientierten wasserwirtschaftlichen Anlagen zur Nutzung und Bewirtschaftung der verfügbaren Wasserressourcen ein.

Die Transformation der flächenhaft variierenden Systemeingangsgröße Niederschlag N in die Systemausgangsgröße Abfluss A des Abflussbildungssystems

wird durch quantitative und qualitative Eigenschaften der geologischen Stockwerkstruktur der Einzugsgebietsfläche (zweidimensional) bzw. des Einzugsgebietskörpers (dreidimensional) gesteuert (DYCK 1983). Man unterscheidet:

-	(a, u)	-	(d, x)	Flächennutzungsstockwerke (Talsperrenspeicherraum),
N	(b, v)	→ A	(e, y)	Naturraum-Stockwerk (Bodenwasserumsatzraum)
	(c, w)		(f, z)	Untergrund-Stockwerke (Grundwasserumsatzraum)

Daraus lässt sich ableiten, dass die

- Transformation der Eingangsgröße Niederschlag in die Ausgangsgröße Abfluss (Dargebot) in einem aus Flächennutzungsstruktur, naturräumlichen Hauptstockwerk und Untergrundstockwerk bestehenden natürlichen System der Einzugsgebiete erfolgt (Bildungsbedingungen des Wasserdargebots),
- Nutzung des verfügbaren Wasserdargebots mithilfe eines aus Entnahme-, Aufbereitungs-, Fortleitungs-, Speicherungs-, Gebrauchs-, Ableitungs-, Reinigungs- und Einleitungseinrichtungen bestehenden Systems der Versorgungsgebiete erfolgt (Nutzungsbedingungen des Wasserdargebots),
- Gewährleistung der Funktions- und Leistungsfähigkeit sowohl der natürlichen Systeme der Flusseinzugsgebiete als auch der technischen Systeme der Versorgungsgebiete erst im Verbund eines natural-technischen Systems ermöglicht wird (Bewirtschaftungsbedingungen des Wasserdargebots).

Bildungsbedingungen des Wasserdargebots

Die Abflussbildungsfläche Deutschlands beträgt $353,3 \times 10^3 \text{ km}^2$, wobei die Watt- und Ästuargebiete NW-Deutschlands mit $2.707,2 \text{ km}^2$ Wasserfläche und $7.941 \times 10^6 \text{ m}^3$ Wasservolumen bei MThw (Mittleres Tidenhochwasser; nach FERK 1995 und SPIEGEL 1997) sowie die Bodden- und Haffgebiete NE-Deutschlands mit $1.584,2 \text{ km}^2$ Wasserfläche und $6.034,4 \times 10^6 \text{ m}^3$ Wasservolumen (nach CORRENS 1976, 461) nicht berücksichtigt werden, weil sie zur Abflussbildung nicht beitragen.

Wesentlich für die Charakterisierung der Wasserdargebotsverhältnisse ist die Berücksichtigung durchflusswirksamer oder speichernutzbarer Poren- bzw. Kluftvolumina des Untergrundstockwerkes. Sie widerspiegeln sich – verallgemeinert – in der Gliederung in einen Locker- (51,1% der Abflussbildungsfläche mit Porengrundwasserleitern) und einen Festgesteinsbereich (48,9 % mit Kluftgrundwasserleitern), die in den allgemeinen geologischen und tektonischen Bau integriert sind; daneben treten noch gesteinsabhängige Karstgrundwasserleiter auf. In Deutschland werden 980 Grundwasserkörper unterschieden, die zwischen

120 und 1.250 km^2 groß sind und im Mittel ca. 400 km^2 erreichen (BMU 2008, 49/ 50). Neben regional bedingten unterschiedlichen Niederschlags- und Verdunstungsanteilen widerspiegelt die Abflussdifferenzierung in oberirdische und unterirdische Abflussanteile zeitlich variierende Speichereigenschaften der beteiligten Wasserumsatzräume der Bodenzone und der Grundwasserzone.

Ergebnis der skizzierten Bildungsbedingungen des Wasserdargebots ist ein klimatisch gesteuertes, zeitlich und räumlich variierendes Wasserdargebot, dessen Variabilität sowohl ein historisch veränderbares Versorgungspotenzial bzw. -risiko als auch Gefährdungspotenzial bzw. -risiko einschließt. Im Rahmen des hydrographisch gegliederten Flächennutzungsstockwerks können Speichereigenschaften nur durch in einer historischen Abfolge (GARBRECHT 1987) strukturverändernder (Organisation) und gegenwärtig bewirtschaftbarer bzw. prozessbeeinflussender (Regulation) Speicherräume aktiviert werden.

Sowohl die Verminderung des HW-Gefährdungsalts als auch die Erhöhung des NW-Versorgungspotenzials können als Wahrscheinlichkeit definiert werden, mit der eine bestimmte nutzungsabhängige Wassermenge und -beschaffenheit an Durchfluss- bzw. Entnahmeprofilen bereitgestellt bzw. mit welcher Sicherheit der Widerspruch zwischen räumlich und zeitlich variierendem Wasserbedarf und Wasserdargebot gelöst werden kann. In Anlehnung an DYCK (1988) werden folgende Definitionen gewählt, um sowohl das Wasserdargebot als auch den Einfluss des Speicherraumbaus charakterisieren zu können.

Das potenzielle Dargebot ($D_{\text{pot.}}$) entspricht als Ergebnis des Effektivniederschlags der Summe des unter- und oberirdischen Abflusses und wird letztlich durch den Gesamtabfluss der Oberflächengewässer repräsentiert; es kann sowohl für das Einzugsgebiet als auch für administrative Einheiten (Ein- oder Ausschluss des Fremdzufflusses) angegeben werden.

Das variable Dargebot ($D_{\text{var.}}$) ist identisch mit dem relativ stark variierenden oberirdischen und kurzfristig erfolgenden Abfluss, der als Hochwasserabfluss (Direktabfluss nach DIN 4049) ohne Nutzungsmöglichkeit zum Abfluss gelangt.

Das stabile Dargebot ($D_{\text{stab.}}$) kann mit dem relativ wenig schwankenden und langfristig erfolgenden Grundwasserzuffluss zu den Oberflächengewässern (Basisabfluss nach DIN 4049) identifiziert werden und wird rechnerisch durch Abzug des als Hochwasser ungenutzt abfließenden Direktabflussanteils vom potenziellen Dargebot gebildet.

Das regulierte Dargebot ($D_{\text{reg.}}$) umfasst die auf der Differenz zwischen Zufluss und Abgabe beruhende

Möglichkeit einer geregelten Abgabe aus Speicherräumen ($D_{reg, 100}$), wobei zunächst das vollständige Speicherräumvolumen (100%) berücksichtigt wird.

Der zum Ausgleich zwischen räumlich und zeitlich variierenden Nutzungs- und Dargebotsbedingungen erforderliche Speichereffekt durch Speicherräume schließt mit einem

- Aufhöhungseffekt nicht nur eine Verminderung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Niedrigwasserereignissen, sondern auch eine Erhöhung des Versorgungspotenzials,
- Dämpfungseffekt nicht nur eine Verminderung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Hochwasserereignissen, sondern auch eine Verringerung des Gefährdungspotenzials ein.

Beide Effekte nehmen flussabwärts in Abhängigkeit von der nicht bewirtschaftbaren Einzugsgebietsfläche relativ schnell ab.

Eine diese Differenzierung weiterführende Kennzeichnung ermöglicht es,

- das verfügbare Dargebot ($D_{verf.}$) als Summe aus dem stabilen Dargebot, zuzüglich des regulierten Wasserdargebots ($D_{reg, 80} = 80\%$ des Speichervolumens als durchschnittlichem Nutzinhalt), als im Mittel wirtschaftlich nutzbares Dargebot zu charakterisieren,
- das reduzierbare Dargebot ($D_{red.}$) als Differenz aus dem variablen Dargebot, abzüglich des regulierten Wasserdargebots ($D_{reg, 20} = 20\%$ des Speichervolumens als durchschnittlichem Hochwasserschutzraum), als im Mittel wirtschaftlich nicht nutzbares Dargebot zu berücksichtigen.

Die sich historisch entwickelnden bzw. verändernden Speicherräumauswirkungen können vor diesem Hintergrund durch die Regulierungsfaktoren RV (Versorgungspotenzial) und RG (Gefährdungspotenzial) abgeschätzt werden:

- Erhöhung des Versorgungspotenzials:
 $RV (D_{stab.} + D_{reg, 80} / D_{stab.} [\%])$,
- Verminderung des Gefährdungspotenzials:
 $RG (D_{var.} - D_{reg, 20} / D_{var.} [\%])$.

Tab. 2.13-1: Kooperatives System der Nutzung des Wasserdargebots in Deutschland (in Anlehnung an die Funktionsklassen der Sachsysteme nach ROPOHL 1999, 125).

WASSERVERSORGUNG HOCHWASSERSCHUTZ ENERGIEVERSORGUNG

WANDLUNG

<p>Rohwasser ► Trinkwasser</p> <p>6 959 Versorg.-unternehmen 18 796 Schutzgebiete (GW und OW) mit 38 100 km² Fläche = 10,8 % Flächenanteil</p>	<p>HW ► schadloser Abfluss (NW ► schadloser Abfluss)</p> <p>291 Talsperren (≥ 0,3x10⁶ m³) 149 HR-Becken (≥ 0,3x10⁹ m³)</p>	<p>Wasser ► Wasserkraft</p> <p>660 Versorg.-unternehmen 434 Wasserkraftwerke, davon: 354 Lauf-: 3 063,6 MW 49 Speicher-: 362,9 MW 31 Pumpsp.-: 6 682,6 MW</p>
--	---	--

TRANSPORT

<p>Trinkwasserversorgung: 385 000 km TW-Rohrleitungen</p> <p>Abwasserentsorgung: 399 200 km AW-Kanalisation</p> <p>Fernwasservers.-anteil: 26 %</p>	<p>33 000 km nat. Gewässernetz 9 945 km künstl. Deichlänge</p> <p>Gefährdete Flächen [10³ km²]: Fl.-verlust: ~11,2-12,6 (4%) HW- HQ₁₀ ~14,5 (4%) Geb.: HQ₁₀₀ ~17,0 (5%)</p>	<p>Freileitungen und Kabel (Dt.) > 110 kV: 116 000 km Länge (ohne DB: 19 000 km 15 kV) Leistungsvmögen (Dt.): 382 GW = 1 437 TWh a⁻¹ UCPTE-Verbundsystem mit 2,286x10⁹ km² Fläche</p>
---	---	---

SPEICHERUNG

<p>OW: 85 Talsperren (und 980 GW-Körper) > 1 366,8x10⁹ m³ Volumen</p> <p>Erhöhung des Versorgungspotenzials: 71,9+4,3 = 76,20x10⁹ m³ = 5%</p>	<p>440 Speicherräume (Talsperren und HR) 987,1x10⁹ m³ Volumen</p> <p>Verringerung des Gefährdungspotenzials: 21,3-1,0 = 20,3x10⁹ m³ = -5%</p>	<p>403 Talsperren 31 Oberbecken 2 018,6x10⁹ m³ Volumen</p> <p>Versorgungssicherheit des Stromversorgungssystems: 492,7x10⁹ kWh = 99,9 %</p>
---	--	---

Abkürzungen: GW Grundwasser HW Hochwasser KW Kraftwerk
 OW Oberflächengewässer HR Hochwasserrückhaltebecken UCPTE Union Koordinierung
 TW Trinkwasser HQ₁₀ 10jg. Eintrittswahrscheinlichkeit Erzeug. u. Transport
 AW Abwasser HQ₁₀₀ 100jg. Eintrittswahrscheinlichkeit elektrischer Energie

Nutzungsbedingungen des Wasserdargebots

Als »zielbewusste Ordnung aller menschlichen Einwirkungen auf das ober- und unterirdische Wasser« (DIN 4049) umfasst die Bewirtschaftung des Wasserdargebots ein die Natur und Gesellschaft integrierendes soziotechnisches bzw. sozioökologisches/ -ökonomisches System.

Die Formierung von wirtschafts- und sozialräumlichen Ballungsgebieten führte in Deutschland seit etwa 1850–1900 zu einer zunehmenden Organisation lokaler technischer Systeme, die die Dimension regionaler Verbundsysteme erreichten (RADKAU 1993, WENGENROTH 1993, VOIGT 1997). Die Nutzung des Wasserdargebots wird intensiviert und führt, nach früheren, insbesondere bergmännischen Wasserkraftspeichern zu Anlagen einer sowohl gefahrbegrenzenden als auch versorgungsorientierten Speicherwirtschaft; die »Industriegeschichte des Wassers« (FÖHL & HAMM 1985) hat begonnen.

Die Gewährleistung von Versorgungs- und Schutzfunktionen durch Regulation dieser vernetzten Systeme einer leitungs- (Wasserver- und -entsorgung) bzw. gewässernetzgebundenen Infrastruktur (Hoch- und Niedrigwasserregulierung) führte zur Herausbildung von kooperativen Systemen (AURADA 2008) (vgl. *Tab. 2.13-1*).

Die Nutzung des verfügbaren Wasserdargebots erfolgt mithilfe eines aus Entnahme-, Aufbereitungs-, Fortleitungs-, Speicherungs-, Gebrauchs-, Ableitungs-, Reinigungs- und Einleitungseinrichtungen bestehenden technischen Systems in räumlich-organisierten, technisch-strukturierten Versorgungsgebieten (z.B. Industrie, Kommunen, Landwirtschaft, Bergbau).

Die Entwicklung der Wasserversorgungssysteme repräsentiert einerseits eindrucksvoll die Wechselwirkung bergmännischer Wasserwirtschaft und urbaner Versorgungssysteme. Andererseits erforderten Industrialisierung und Urbanisierung den Ausbau einer hygienisch zuverlässigen technischen Infrastruktur der (Fern-) Wasserversorgung und Abwasserentsorgung (SCHNAPAUFF 1977).

Im Gegensatz zu den Haushaltsgrößen des Wasserdargebots, die auf einen möglichst langen bzw. charakteristischen Zeitraum (Normalperiode) bezogen werden, werden die Zahlen des Wasserbedarfs an Zeithorizonten (Einzeljahre) orientiert, da sie sich tendenziell ändern und Durchschnittswerte ein unreales Bild ergäben. Dabei sind sowohl der derzeitige kommunale, industrielle und landwirtschaftliche Wasserbedarf als auch seine historische Entwicklung, selbst der jüngsten Vergangenheit, schwierig zu rekonstruieren; die entsprechenden Zahlenwerte tragen Schätzcharakter. Der

Nutzungsgrad des Wasserdargebotes als Verhältnis von genutztem zu potenziellem Dargebot hat von ca. 23% (1937) auf gegenwärtig etwa 57% zugenommen. Wird der Nutzungsgrad auf das verfügbare Dargebot bezogen, ergeben sich 28% (1937) und 71%, bei Bezug auf das stabile Dargebot 30% (1937) und 74%.

Im Rahmen der Industrialisierung und Urbanisierung kommt es zu einer Wechselwirkung von Wasser- (SCHNAPAUFF 1977, FÖHL 1993) und Energieversorgungs- (HERZIG 1993) sowie Speichersystemen (AURADA 2003). In den großen Erzbergbaurevieren Mittel- und Nordeuropas entstanden technische Lösungen sowohl zur Wasserlösung der Grubengebäude durch Stollen als auch der Wasserhaltung durch Pumpeneinrichtungen (Heizenkünste) und ihres energetischen Antriebs durch Wasserräder (z.T. Kehräder) und der Weiterleitung der Drehbewegungen der Wasserräder durch Kunst- bzw. Feldgestänge. Sie führten mit dem Bau von Kunstteichen zur Gewährleistung von Aufschlagwasser für die Wasserkünste bereits im 14./ 15. Jh. zu Verbundsystemen; durch diese mittelalterliche »Schlüsseltechnologie« der Wasserkraftgewinnung (HOLLÄNDER 2000) entstehen »große technische Systeme« (HUGHES 1989, 51). Zur Überbrückung sommerlicher Trocken- und winterlicher Frostperioden wurden im Oberharz und im Freiberger Revier 14 bis 16 Wochen als ausreichend erachtet (KNISSEL & FLEISCH 2004, 30 und 66).

Die bergbaulichen Speicheranlagen zur Energiegewinnung mit Hilfe von Aufschlagwasser mit nur teilweise integriertem HW-Schutz werden – dem Rahmen der Industrialisierung (seit ca. 1850) und Urbanisierung (seit ca. 1885), der zentralen Wasser- (seit 1871) und Stromversorgung (seit 1891) geschuldet – durch die Mehrzweckanlagen des Talsperrenbaus abgelöst, die die Voraussetzungen für gewässernetzorientierte Steuerungssysteme bilden.

Mit insgesamt etwa 440 (davon 306 ICOLD-klassifizierten) Speicherräumen in Deutschland hat das Speichervolumen seit 1850 (0,022 km³) bis 2000 eine Größenordnung von 4,336 km³ erreicht (ICOLD 2001; FRANKE 2001; WOLFF 2006) (vgl. *Abb. 2.13-1*).

Bewirtschaftungsbedingungen des Wasserdargebotes

Die Bewirtschaftung des Wasserdargebots erfolgt im Rahmen der hydrographischen Struktur der Gewässereinzugsgebiete mit einer Abflussbildungsfläche von ca. 353.300 km² und des ca. 33.000 km² umfassenden Gewässernetzes, davon 7.700 km² schiffbar). Von den 12,9% bebauten Siedlungs- und Verkehrsflächen werden ca. 50% (somit etwa 22.800 km²) als versiegelt eingestuft (SIEKER 2004, 182); als hochwassergefähr-

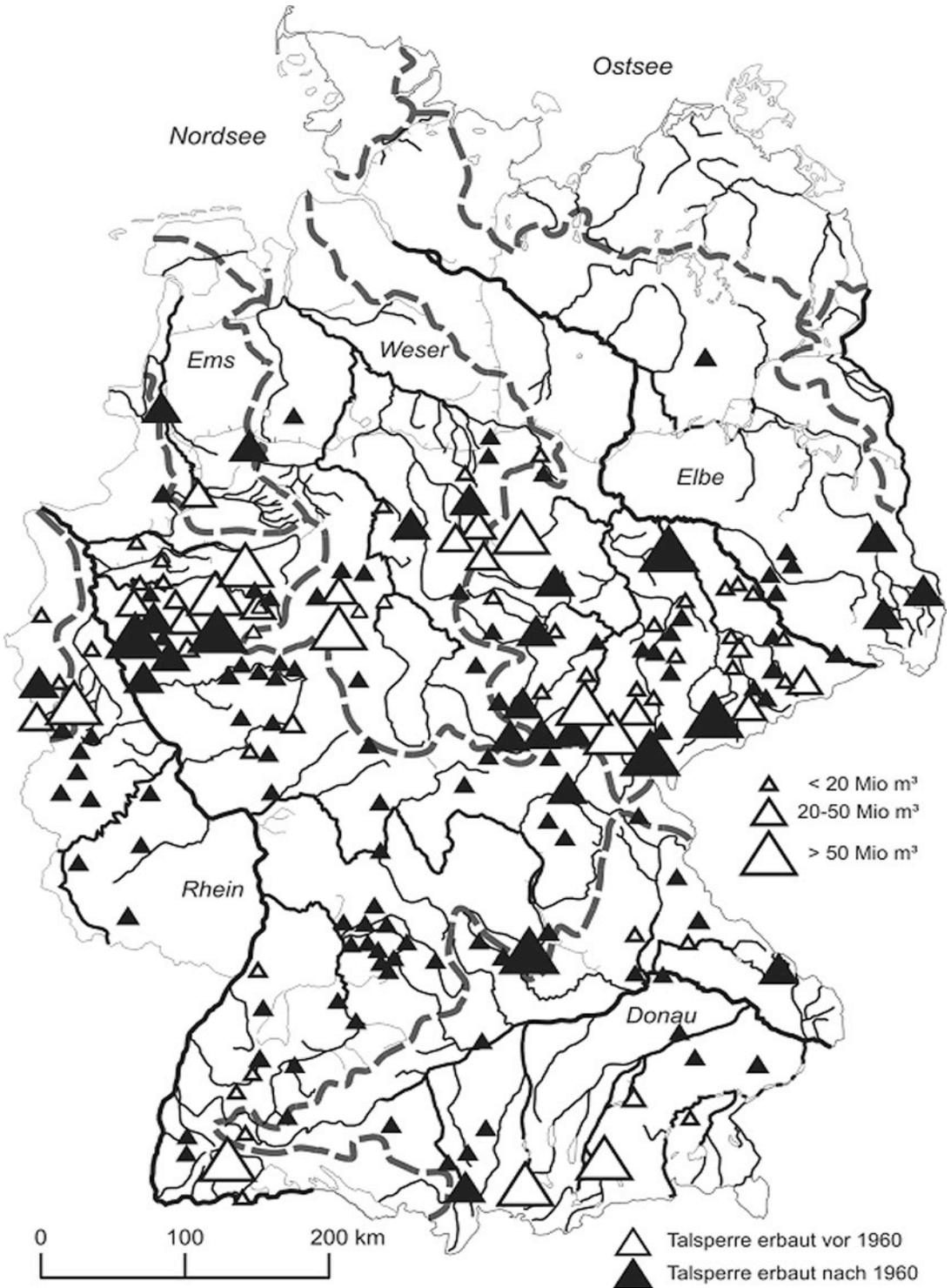


Abb. 2.13-1: Übersicht über die Stromgebiete Deutschlands und über die wichtigsten Speicherräume (vgl. hierzu auch REICHE & BUSSKAMP 2010, 174 und HÄNSGEN et al. 2010, 178).

Tab. 2.13-2: Niederschlagsverhältnisse in Deutschland (Dezennien des Zeitraumes 1851–2000 [mm]) (berechnet nach BAUR 1962 und 1970 sowie MÜLLER-WESTERMEIER 2006).

Jahrzehnt	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Jahr	Δ
1851–60	42,7	37,1	37,7	48,6	69,7	74,6	78,1	78,6	53,5	50,5	46,5	43,5	660,6	- 34,6
1861–70	48,5	40,6	48,4	39,4	50,8	77,0	70,3	72,5	52,3	51,7	59,3	59,5	669,7	- 25,5
1871–80	42,5	44,3	47,5	45,3	54,0	81,5	78,1	67,2	54,4	57,8	58,9	54,2	684,8	- 10,4
1881–90	36,8	30,5	48,9	34,4	57,2	70,4	86,6	74,6	54,4	68,3	57,1	52,4	670,6	- 24,6
1891–00	48,5	41,0	46,1	44,0	57,7	69,4	83,1	63,7	62,1	61,1	37,6	52,2	666,9	- 28,3
1901–10	45,5	43,0	44,8	47,3	56,7	65,3	81,0	78,3	59,4	46,7	53,0	49,7	670,8	- 24,4
1911–20	55,3	34,5	50,9	44,6	48,4	63,7	76,2	72,5	54,0	49,9	47,3	70,9	668,0	- 27,2
1921–30	50,3	37,7	32,8	57,6	61,3	68,5	73,8	81,4	60,4	71,2	60,3	54,0	712,2	+ 17,0
1931–40	59,2	45,6	40,8	54,3	60,6	68,6	81,6	73,5	69,1	66,9	52,7	43,3	715,8	+ 20,6
1941–50	51,2	55,7	37,5	45,4	63,9	71,8	80,3	78,6	50,6	46,2	65,0	54,3	700,6	+ 5,4
1951–60	56,8	44,1	41,3	42,2	57,6	77,8	91,7	86,5	61,5	58,3	50,2	59,7	727,2	+ 32,0
1961–70	50,7	46,5	49,0	61,9	70,0	78,0	72,9	80,3	55,3	50,0	62,1	62,1	738,8	+ 43,6
1971–80	46,0	37,2	44,0	45,2	58,7	77,7	72,2	85,7	53,8	47,3	64,6	59,8	673,0	- 22,2
1981–90	65,3	43,9	59,8	49,7	67,4	79,5	67,2	64,7	55,7	60,4	58,9	68,8	746,3	+ 51,1
1991–00	51,1	43,1	54,4	44,9	59,9	71,3	82,7	65,8	63,8	62,9	57,7	65,1	722,1	+ 26,9
<hr/>														
1851–00	43,8	38,7	45,7	42,3	57,9	74,6	79,2	71,3	55,3	57,9	51,9	52,4	670,5	- 24,7
1901–50	52,3	43,3	41,4	49,8	58,2	67,6	78,6	76,9	58,7	56,2	55,7	54,4	693,5	- 1,7
1951–00	54,0	43,0	49,7	48,8	62,7	76,9	77,3	72,6	58,0	55,8	58,7	63,1	721,5	+ 26,3
<hr/>														
1851–25	46,3	38,6	45,5	44,1	56,7	71,0	77,8	73,4	56,5	55,8	51,1	54,9	671,8	- 23,4
1926–00	53,8	44,7	45,7	49,8	62,5	75,1	79,0	73,8	58,2	57,4	59,8	58,3	718,5	+ 23,3
<hr/>														
1851–00	50,0	41,7	45,6	47,0	60,0	73,0	78,4	73,6	57,4	56,6	55,4	56,6	695,2	0,0

(Deutschlandreihe des Deutschen Wetterdienstes [DWD] mit den Stationen Bayreuth, Berlin-Dahlem, Dresden, Emden, Erfurt, Frankfurt/ M., Gütersloh, Hannover (seit 1856), Karlsruhe, Kassel (seit 1889), Kiel, Kleve, München-Nymphenburg und Trier)

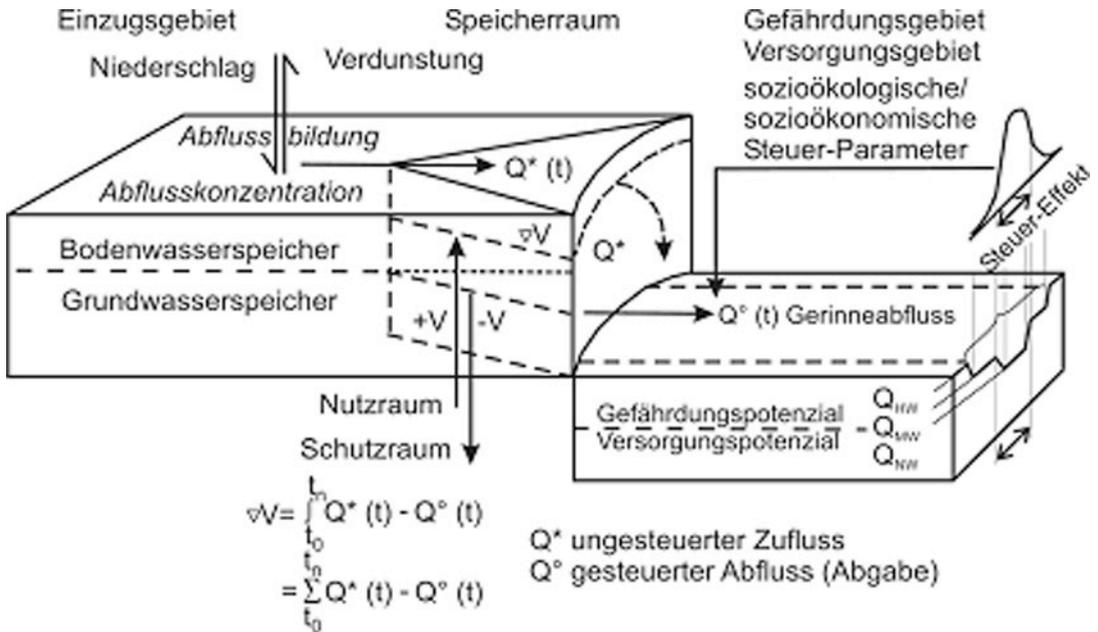


Abb. 2.13-2: Veranschaulichung der TS-Speicherwirkung im Rahmen eines kooperativen Systems.

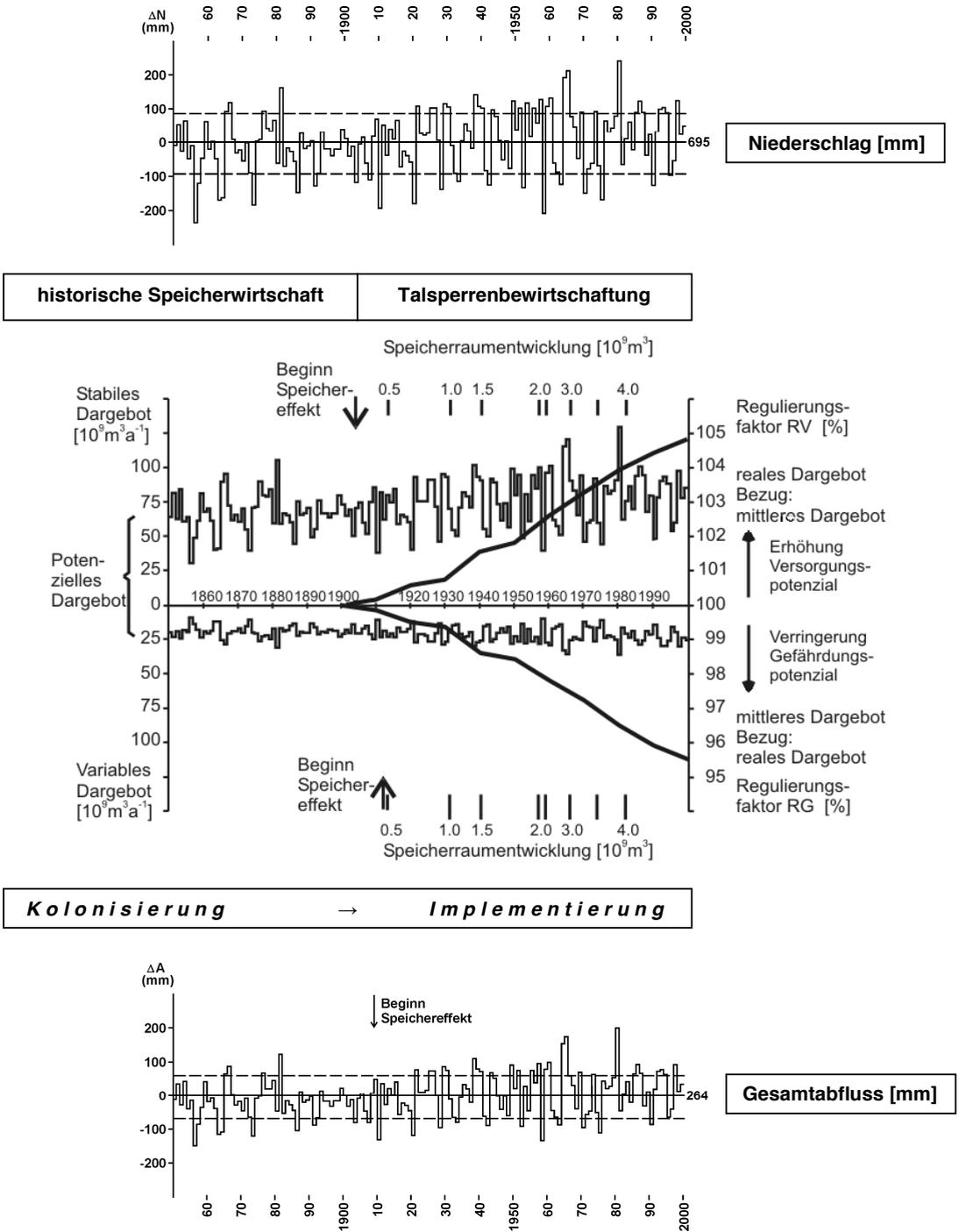


Abb. 2.13-3: Erhöhung des Versorgungs- und Verringerung des Gefährdungspotenzials (1851–2000).

Tab. 2.13-3: Bewirtschaftungsbedingungen des Wasserdargebots in Deutschland.

Zeitreihe	Wasserhaushaltsgrößen [mm]			Wasserdargebotsgrößen [km³ a⁻¹]		
	1931–1960 a	1961–1990 b	1851–2000 c	Versorgungs- Potenzial	1851–2000 c	Gefährdungs- Potenzial
Niederschlag	768	790	695			
Verdunstung	501	492	431			
Gesamtabfluss	264	299	264	93,2	D _{pot.}	93,2
Abfluss (oberirdisch)	65	122	60		D _{var.}	21,3
Abfluss (unterirdisch)	199	181	204	71,9	D _{stab.}	
				+ 4,3	D _{reg.}	- 1,0
				76,2	D _{verf.}	20,3
					D _{red.}	

Entwicklung des Speicherräumausbaus in Deutschland (1500–2000) d		RV	D _{reg. 00}	D _{reg.}	D _{reg. 20}	RG
(kumulative Entwicklung)		[%]	[km³]	[km³]	[km³]	[%]
„Historischer“ Speicherbau:	etwa 1500	100,00	0,001	0,001	0,000	100,00
	etwa 1600	100,01	0,004	0,005	0,001	100,00
	etwa 1700	100,01	0,010	0,013	0,003	99,85
	etwa 1800	100,02	0,015	0,019	0,004	99,82
	etwa 1850	100,02	0,018	0,022	0,004	99,82
Beginn Zeitreihe 1851–2000:	1851–1860	100,02	0,018	0,022	0,004	99,82
	1861–1870	100,02	0,018	0,022	0,004	99,82
	1871–1880	100,02	0,018	0,022	0,004	99,82
	1881–1890	100,02	0,018	0,022	0,004	99,82
	1891–1900	100,03	0,023	0,029	0,006	99,70
„Moderner“ Talsperrenbau:	1901–1910	100,12	0,094	0,118	0,024	99,88
	1911–1920	100,54	0,408	0,510	0,102	99,50
	1921–1930	100,67	0,513	0,641	0,128	99,37
	1931–1940	101,49	1,136	1,420	0,284	98,60
	1941–1950	101,72	1,310	1,637	0,327	98,39
	1951–1960	102,47	1,879	2,349	0,470	97,69
	1961–1970	103,06	2,334	2,917	0,583	97,13
	e 1971–1980	103,72	2,835	3,544	0,743	96,34
	e 1981–1990	104,22	3,219	4,024	0,874	95,70
	f Ende Zeitreihe 1851–2000:	e 1991–2000	104,55	3,469	4,336	0,956
	f 2001–2010	104,60	3,504	4,380	0,972	95,21

RV [%]	Faktor Regulierung Versorgungspotenzial ($RV = D_{stab.} + D_{reg. 00} / D_{pot.}$)
RG [%]	Faktor Regulierung Gefährdungspotenzial ($RG = D_{var.} - D_{reg. 20} / D_{var.}$)

D _{pot.}	potenzielles Wasserdargebot (Gesamtabfluss ohne Fremdzufuss)
D _{var.}	variables Wasserdargebot (oberirdischer Abfluss)
D _{stab.}	stabiles Wasserdargebot (unterirdischer Abfluss)
D _{reg.}	reguliertes Wasserdargebot (Speichervolumen [100 %], zeitgebunden)
D _{verf.}	verfügbares Wasserdargebot (stab. + regul. Darg. [80 %], zeitgebunden)
D _{red.}	reduzierbares Wasserdargebot (var. – regul. Darg. [20 %], zeitgebunden)

a verändert nach LIEBSCHER u. EYRICH (1995, 15)

b nach KRAHE u. GLUGLA (1996, 3)

c berechnet auf der Grundlage der BAUR'schen Reihe bzw. DWD-Reihe (1850–2000) (vgl. Tab. 2.13-2)

d historische Speicherräume vor 1850, Talsperren ab $0,3 \times 10^9$ m³ Volumen nach LAWA (1998)

e ab diesem Zeitraum unter Berücksichtigung des HW-Schutzraumes von HRB (nach WOLFF 2006) (damit > D_{reg. 20})

f einschl. PSW Goldisthal (30.09.2003), TS Leipis ($39,2 \times 10^9$ m³, I/2005) sowie Erhöhung des HW-Schutzraumes um 16×10^9 m³ in TS Sachsens im Ergebnis des Elbe-HW 2002; ohne Talsperre Kriebstein mit $11,6 \times 10^9$ m³ Volumen (Auflassung 2008)

det gelten Flächen in einer Größenordnung von 14.500 bei HQ_{10} (HQ_{10} ist die statistische Abflussgröße für ein 10-jährliches Hochwasserereignis) bzw. 17.000 km^2 bei HQ_{100} (KLEEBERG, mdl. Mitt.).

Speicheranlagen repräsentieren ein Verbundsystem von natürlichen Speichereigenschaften des oberhalb liegenden Einzugsgebietes bzw. -körpers (mit temporärem Schneedeckenrückhalt und variablem Bodenwasser- und Grundwasserspeicherraum), von bewirtschaftbaren Speicherlamellen des künstlichen Speicherraums (z.B. Nutzraum und beherrschbarer HW-Schutzraum) und dem unterhalb gelegenen Vorteilsgebiet mit einem Gefährdungs- und Versorgungspotenzial; die integrierten Naturspeicher sind erst durch den Verbund Naturspeicher und Speicherraum bewirtschaftungsfähig (AURADA & RÖDEL 2007).

Mit der Energieerzeugung durch Wasserkraft und ihrer Speichermöglichkeit in Speicherbecken wurden zwei konkurrierende Strategien in die Bewirtschaftungsmöglichkeit des aufgestauten Wasserkörpers integriert: Nutzraum versus Schutzraum (BLACKBOURN 2008, 269); die bilanzierbare Kombination sowohl hochwasserrückhaltender als auch energieerzeugender bzw. wasserversorgender Speicher wird seither präferiert. Wasserkraftnutzung und Wasserversorgung (früher auch NW-Aufhöhung) verlangen nach einem möglichst gefüllten Stauraum bzw. Nutzraum, um effektiv Energie erzeugen bzw. Wasser abgeben zu können, der Hochwasserschutz erfordert einen möglichst entleerten Speicherraum bzw. HW-Schutzraum, um Spitzenabflüsse effektiv zurückhalten zu können.

Beide Systemzustände können aus sowohl technischen (Kapazität der Grundablässe der Talsperre) als auch ökologischen und ökonomischen Gründen (Durchlassfähigkeit des Gewässers) kurzfristig nicht in einander übergeführt werden; ein Überlaufen des Speichers bedeutet allerdings den sofortigen Verlust der Speicherwirkung (vgl. *Abb. 2.13-2*).

Um langfristig orientierte standardisierbare Berechnungsmöglichkeiten der Auswirkungen der Speicherentwicklung zu finden, war es sinnvoll, weniger nach klimatologischen Spezifika in den Niederschlagsreihen zu suchen, als eine längere Zeitreihe zu nutzen, um unter der begründeten Annahme von annähernd ausgeglichenen Niederschlagsverhältnissen eine tendenzielle Veränderung im Gesamtabfluss erkennen zu können.

Dafür bot sich die BAUR'sche Reihe (1851–1960) an, die als »Deutschlandreihe« (1851–2000) des DWD bis in die Gegenwart weitergeführt wird. Die jetzt vorliegenden Dezennienwerte (1851–2000) weisen bei einem Mittelwert von 695 mm eine ausgeglichene Bilanz auf: – 23,4 mm (1851–1925), + 23,3 mm (1926–

2000) bzw. $\pm 0,0$ mm (1851–2000) (vgl. *Tab. 2.13-2*).

Mit ihrer Akzeptanz wird eine den Industrialisierungszeitraum Deutschlands überstreichende Darstellung des Speicherraumausbaus über einen Zeitraum von 150 Jahren (1850–2000) ermöglicht.

Abb. 2.13-3 und *Tab. 2.13-3* lassen mit Bezug auf mittlere Wasserdargebotsverhältnisse (1851–2000) mit dem Regulierungsfaktor RV eine Erhöhung des Versorgungspotenzials von 100,02 % (1850) auf 104,55 % (2000) und mit dem Regulierungsfaktor RG eine Verminderung des Gefährdungspotenzials von 99,82 % (1850) auf 95,29 % (2000) erkennen. In diesem Zeitraum hat das Volumen aller Talsperren (= $D_{reg,100}$) seit 1850 in den Zeiträumen bis 1914, 1932, 1941, 1958, 1960, 1967, 1975 und 1983 um jeweils $0,5 \times 10^9$ m^3 zugenommen, beim Nutzinhalt (= $D_{reg,80}$) sind dies die Jahre 1924, 1935, 1954, 1960, 1972, 1979 und 1995.

Erst seit dem Übergang vom historischen Speicherbau zum modernen Talsperrenbau lässt sich seit 1900 eine signifikante Erhöhung des Versorgungspotenzials und Verringerung des Gefährdungspotenzials nachweisen. Seit 1891 (TS Remscheid; BORCHARDT 1897) wird aus technischer Sicht eine »Neuzeit« des Talsperrenbaus gesehen (ROUVÉ 1987; SCHMIDT 2001); diese Zäsur ist auch aus dem Blickwinkel der Dargebotsbeeinflussung gerechtfertigt.

Die natürlichen Retentionsflächen nahmen im Verlauf der eingangs skizzierten historischen Entwicklung der Flächennutzung trotz ihres frühen Bebauungsverbots (1905 in Preußen) von ca. 14.260 km^2 auf 3.237 km^2 ab. Durch den Speicherbau wird diese rückläufige Entwicklung zwar flächenmäßig, jedoch nicht abflusswirksam kompensiert; den auf $14,5 \times 10^3$ km^2 (HQ_{10}) bzw. $17,0 \times 10^3$ km^2 (HQ_{100}) geschätzten Überschwemmungsgebieten Deutschlands steht ein vier- bis fünffach größerer Anteil an indirekt bewirtschaftbaren Speicherraum-Einzugsgebietsflächen mit allerdings nur $956\text{--}987 \times 10^6$ m^3 Hochwasserschutzraum (FRANKE 2001) gegenüber.

Zukunftsfähige Wasserwirtschaft in Deutschland

Die Lösung wasserwirtschaftlicher Probleme wird vor dem Hintergrund einer Verknappung der Wasservorräte (Verringerung des Versorgungspotenzials) bei gleichzeitig nicht auszuschießender Zunahme von Extremereignissen (Erhöhung des Gefährdungspotenzials) zunehmend zu einer wesentlichen Komponente der Wirtschafts- und Sozialpolitik einzelner Nationalstaaten, von Staatengemeinschaften bzw. der internationalen Staatengemeinschaft. Ihre Größenordnungen werden von den sich verändernden Nutzungsbedingungen

historisch relativiert und können durch den Speicherbau in begrenztem Umfang beeinflusst werden (vgl. KOTLYAKOV et al. 1998, SHIKLOMANOV & RODDA 2003, 374).

Die Rückbesinnung auf Möglichkeiten sowohl eines aktiven Hochwasserschutzes als auch einer (gegenwärtig meist vernachlässigten) Niedrigwasserregulierung mit Hilfe von Speicherräumen entspricht grundsätzlich der Entscheidungssituation des ausgehenden 19. Jahrhunderts, dem Beginn des modernen Speicherraumbaus, nur dass bereits ein System seither entstandener Speicherräume mit Mehrzweckfunktion in Deutschland vorhanden ist. Ihre Bewirtschaftungsbedingungen verfolgen allerdings ein historisch entstandenes Konzept der Wasserdargebotsbewirtschaftung: Nutzraum versus Schutzraum.

Auf Grund nur noch begrenzt vorhandener günstiger Standortbedingungen und gegenwärtig abnehmender Akzeptanz für Talsperrenneubauten erscheint der Höhepunkt des Speicherraumbaus einerseits zwar überschritten zu sein, jedoch gilt andererseits: »Die Rückbesinnung auf die Bedeutung von Stauanlagen ... viele Parallelen mit der Gründerzeit des modernen Wasserbaues« (PETERS 2007, 3).

So könnte beispielsweise bei wasserkraftorientierten Energiegewinnungsanlagen eine jeweils regional begrenzte und zeitlich befristete Flexibilisierung der prioritären Speicherlamellenbewirtschaftung in Betracht gezogen werden. Die Energieersatzleistung ist in einem Energieverbundsystem (MÜLLER 1998) flexibler bereitzustellen als ein im HW- gefüllter oder im NW-Ereignisfall entleerter Speicherraum (GIESECKE 2001).

Eine zukunftsfähige und ausgewogene Wasserwirtschaft wird auf eine flexiblere Lösung des Widerspruchs zwischen räumlich und zeitlich variierendem Wasserdargebot und regional differenzierten Versorgungs- bzw. Schutzansprüchen im Rahmen eines sozio-ökonomisch und -ökologisch definierten kooperativen Systems (AURADA 2008) zu orientieren sein; adäquate Handlungssysteme bleiben jedoch in föderalistischen Strukturen suboptimal.

Dabei ist es naheliegend, Szenarien nicht ausschließender Veränderungsmöglichkeiten der Versorgungs- und Gefährdungsrisiken (PLATE 2010) mit Entwicklungsszenarien zur Erhöhung des verfügbaren und zur Verringerung des reduzierbaren Wasserdargebotes in einem substanziiell existierenden natural-technischen Sachsystem zu verbinden. Dieses Sachsystem bedarf unter Berücksichtigung der »Lebensdauer« von Speicherräumen allerdings inzwischen auch zunehmend einer Anpassung von mittlerweile über 100 Jahre alten Speicheranlagen an die sich verändernden Nutzungsbedingungen; ein nutzungsorientiertes »virtuelles« Wasserdargebot erscheint dabei wenig hilfreich zu sein.

Literatur

- AURADA K. D. (2003): Co-evolvierende + co-respondierende Systeme = co-operierendes System. *Erdkunde* 57 (4), 309–330.
- AURADA K. D. (2008): Logik und Logistik kooperativer Geosysteme. Olms, Hildesheim et al. 400 pp.
- AURADA K. D. & R. RÖDEL (2007): Steuerung kooperativer Systeme. *Wasserwirtschaft* 97(1–2), 32–37.
- BAUR F. (Hrsg.) (1962): Meteorologisches Taschenbuch. Neue Ausgabe. 1. Bd., 2. Aufl., Geest & Portig, Leipzig: 806 pp.
- BLACKBOURN D. (2008): Die Eroberung der Natur. München: 592 pp.
- BMU (Hrsg.) (2008): Grundwasser in Deutschland. Bonn: 72 pp.
- BORCHARDT C. (1897): Die Remscheider Stauweiheranlage sowie Beschreibung von 450 Stauweiheranlagen. Oldenbourg, München & Leipzig: 238 pp.
- DYCK S. (1983): Hydrologische Forschung und die wissenschaftlichen Grundlagen für die rationelle Bewirtschaftung der Wasserressourcen für die ökonomische und soziale Entwicklung. *Sitz.-ber. AdW DDR, Mathematik-Naturwissenschaften-Technik*, Berlin 1984, H. 11/ N: 30 pp.
- DYCK S. (1988): Umfang und Probleme der Nutzung des Wasserdargebotes. *Geogr. Ber.* 33 (1), 23–36.
- EIDEN C. (2006): Versorgungswirtschaft als regionale Organisation. Die Wasserversorgung Berlins und des Ruhrgebietes zwischen 1850 und 1930. Klartext, Essen: 366 pp. (= Rheinisch-Westfälische Hochschulschriften, 4)
- FÖHL A. (1993): Versorgungswirtschaft – Staatliche Regie und Privatindustrie in der Wasserversorgung. In: WENGENROTH U. (Hrsg.): Technik und Wirtschaft. VDI Verlag, Düsseldorf, 506–527 (= Technik u. Kultur, 8)
- FRANKE P. (Ed.) (2001): Dams in Germany. Glückauf, Essen: 495 pp.
- GARBRECHT J. (Hrsg.) (1987): Historische Talsperren. Wittwer, Stuttgart: 464 pp.
- GIESECKE J. (2001): Neue Perspektiven zur Wasserkraftnutzung. In: ATV-DVWK Bundes- und Landesverbandstagung 2001 Freiburg im Breisgau. Stuttgart, 46–60.
- HÄNSGEN D., S. LENTZ & S. TZSCHASCHEL (Hrsg.) (2010): Deutschlandatlas. WBG, Darmstadt: 240 pp.
- HERZIG T. (1993): Von der Werkstattzentrale zur Verbundwirtschaft. In: WENGENROTH, U. (Hrsg.): Technik und Wirtschaft. VDI-Verlag, Düsseldorf: 483–505 (= Technik u. Kultur, 8)
- HOLLÄNDER H. (2000): Kommentare und Notizen zur Bildgeschichte des Bergbaus. In: HOLLÄNDER H. (Hrsg.): Erkenntnis, Erfindung, Konstruktion. Mann, Berlin: 643–671.
- HUGHES T. P. (1989): The Evolution of Large Technical Systems. In: WIEBE E. B., T. P. HUGHES & T. PINCH (eds.): The Social Construction of Large Technological Systems. MIT Press, Cambridge: 51–82.
- ICOLD (INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS) (2001): ICOLD World Register of Dams – Dams in Germany. In: FRANKE, P. (ed.): Dams in Germany. Glückauf, Essen: 466–495.
- KOTLYAKOV V. M., LIOUTY A. A., FINKO E. A., KRENKE E. A., LEONOV YU. G. & A. A. VELICHKO (EDS.) (1998): Resources and Environment World Atlas. Ed. Hözel, 2 volumes, Vienna: 190 plates.
- LAWA (1998): Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken in der Bundesrepublik Deutschland mit mehr als 0,3 hm³ Speicherraum. Kulturbuch, Berlin, 2. Aufl.: 72 pp. (= LAWA-Dokumentationen)
- MÜLLER L. (1998): Handbuch der Elektrizitätswirtschaft. Springer, Berlin et al.: 415 pp.
- MÜLLER-WESTERMEIER G. (2006): Wetter und Klima in

- Deutschland. Hirzel, Stuttgart, 4. Aufl.: 174 pp.
- PETERS J. (2007): „TalsperrenKurs – steigend!“. *Wasserwirtschaft* 97 (10), 3.
- PLATE E. J. (2010): Hydrologische Bemessungspraxis im Wandel der Zeiten. *Hydrologie u. Wasserbewirtschaftung* 54 (2), 93–104.
- RADKAU J. (1993): Entwicklungsprozesse und gesellschaftliche Entscheidungsspielräume in der Geschichte großtechnischer Systeme. In: ALBRECHT, H. & C. SCHÖNBECK (HRSG.): *Technik und Gesellschaft*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 373–410 (= *Technik u. Kultur*, 10)
- REICHE H. & R. BUSSKAMP (2010): Wasserversorgung: Wassergewinnung und -entnahme. In: HÄNSGEN, D., S. LENTZ & S. TZSCHASCHEL (HRSG.): *Deutschlandatlas*. Wiss. Buchges., Darmstadt, 174.
- ROPOHL G. (1999): *Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik*. Hanser, München & Wien, 2. Aufl.: 360 pp.
- ROUVÉ, G. (1987): Die Geschichte der Talsperren in Mitteleuropa. In: GARBRECHT, G. (Hrsg.): *Historische Talsperren*. Wittwer, Stuttgart: 299–325.
- SHIKLOMANOV I. A. & J. C. RODDA (2003): *World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century*. Cambridge University Press, Cambridge: 435 pp.
- SCHMIDT M. (2001): Before the Intze Dams – Dams and Dam Construction Techniques in the German States prior to 1890. In: FRANKE, P. (ed.): *Dams in Germany*. Glückauf, Essen: 10–35.
- SCHNAPAUFF J. (1977): Frühe Wasserversorgung besonders in Deutschland mit Einzelheiten über die Tätigkeit von Jörg Reinhardt für die Neue Wasserkunst in Rostock/ Mecklenburg und für die Versorgung von Demmin/ Pommern. 1618–1620. ZfGW-Verlag, Frankfurt a. M.: 125 pp.
- SIEKER F. (2004): Vorbeugender Hochwasserschutz in urbanen Flächen. In: OHLIG, C. (HRSG.): *Wasserhistorische Forschungen*. Demand, Siegburg: 181–187 (= *Schrift. Deut. Wasserhist. Ges.*, 4)
- VOIGT M. (1997): *Die Nutzung des Wassers*. Springer, Berlin et al.: 491 pp.
- WENGENRÖTH U. (1993): Elektroenergie. In: WENGENROTH, U. (HRSG.): *Technik und Wirtschaft*. VDI-Verlag, Düsseldorf: 325–345 (= *Technik u. Kultur*, 8).
- WOLFF H. (2006): *Effekte der Organisation und Regulation durch den Talsperrenbau und die Talsperrenbewirtschaftung*. Dipl.-arb., Greifswald: 135 pp.

*Prof. Dr. Klaus Aurada
Universität Greifswald
Geographisches Institut
F.-L.-Jahn. 16 - 17489 Greifswald
k-aurada@t-online.de*