Extreme Stauanlagenzuflüsse - Lehren aus dem Hochwasser 2002 in Sachsen

Ingo Dittrich, Albrecht Münch,
Andreas Wahren, Helmut Birke

Es wird gezeigt, wie wenig sicheres Wissen aus beobachteten Jahreshöchstdurchflüssen abgeleitet werden kann. Die Theorie der hydrologischen Extremwertstatistik wird nicht wahr, indem sie immer wieder von einem Lehrbuch für Hydrologie und Wasserwirtschaft in das nächste abgeschrieben wird *(nach Morton 1978)*. Hochwasserhäufigkeitsanalysen liefern keine Vorhersagen, um die Gültigkeit ihrer Hypothesen zu testen, sondern wenden Hypothesen an, um nicht überprüfbare Vorhersagen zu machen *(Klemeš 2000)*.

1 Wahrnehmung und Scholastik der hiesigen Hydrologie

Bis zum August 2002 war die extremwertstatistische Welt in Sachsen im Lot. Jahr um Jahr stieg die Zahl der Durchflußwerte in den Datenspeichern; bisweilen lieferte ein Rechenprogramm diese oder jene Verteilungsfunktion und teils „amtlich“ genannte Bemessungsdurchflüsse, versehen mit einem Wiederkehrsintervall. Seit Jahren wurde die Mathematisierung und Computerisierung von Modellkonzepten, verknüpft mit farbigen GIS-Applikationen, zum Hauptgegenstand der Beschäftigung. Feldforschung und Nachdenken über die hydrologischen Konzepte traten zurück.

Aus dem Bewußtsein verdrängt, lauert Ungemach im Nebel der Vergangenheit: Wie waren die Hochwasser von 1958, 1954, 1927, 1897 oder noch früher in den linken Elbe-Nebenflüssen des Erzgebirges einzuordnen? Als „Ausreißer“, die bei der „Statistik“ tunlichst unter den Tisch fallen?

Aristoteles schrieb: „Es ist wahrscheinlich, daß etwas Unwahrscheinliches passiert.“. Die Niederschläge vom 12. bis 14.8.2002 in Sachsen erreichten lokal die Höhe des maximierten Gebietsniederschlages MGN *(Schmidt 1997)* der entsprechenden Dauer. Dem MGN, so schreiben die Autoren, sei „eine nahe bei unendlich liegende Jährlichkeit“ zuzuordnen. Und: „Ein Auftreten des MGN (ist) während der vorgesehenen Standzeit am vorgesehenen Standort einer wasserwirtschaftlichen Stauanlage sehr unwahrscheinlich und (kommt) nach menschlichem Ermessen nicht vor“. Scheute man vor den Konsequenzen zurück, den MGN als reales Ereignis zu denken? Einige waren erschrocken, daß solche hohen Niederschläge und „noch nie gesehene“ Durchflüsse zu ihrer Lebzeit eintraten.

Beim anschließenden Hochwasser wurde an 14 Stauanlagen im Freistaat Sachsen das Stauziel Z_{H1} für $HQ_{1.000}$ und das $BHQ_2 = HQ_{10.000}$ an sechs Stauanlagen erreicht oder überschritten *(Sieber 2003).* Anstatt schlicht zu konstatieren, daß ein extremes, lokal katastrophales Hochwasser stattfand, wurde u.a. schnell die Frage gestellt, ob bisherige Bemessungsdurchflüsse noch gültig sind. Aber auf welcher Grundlage? Mit einem einzigen zusätzlichen Durchflußwert?

Klemeš (2000) formulierte das dahinter versteckte Dilemma: „Die Hauptsache, die der Ingenieur (und die Behörden) bei hochwasserrelevanten Planungen und Bemessungen braucht, ist Schutz – nicht so sehr gegen das Hochwasser selbst, sondern gegen Anschuldigungen, daß seine (ihre) Hochwasserschutzplanung

1. unterbemessen war, da der Flutschaden nicht verhindert wurde, oder
2. überbemessen war, wenn der Schaden verhindert wurde.“

Es widerspiegelt den Gegensatz zwischen dem öffentlichen Wahrnehmen extremer Hochwasser und ihrer politisch-administrativen Verarbeitung auf der einen Seite und dem, was auf der anderen Seite wissenschaftlich **sicher** über **seltene Hochwasser-Ereignisse** ausgesagt werden kann.

Dazu noch ein Blick in die Realität. Die in der Literatur überlieferten – es ist dazu in den letzen Jahren kaum zusätzliches Wissen entstanden – oder im Universitätsbetrieb oft von Bauingenieuren gelehrten extremwertstatischen Verfahren werden mit mehr oder weniger umfangreichen mathematischen Finessen angewendet, um durch Extrapolation Durchflüsse mit sehr kleinen Überschreitungswahrscheinlichkeiten zu erzeugen. Meist beruhte das auf einigen Dutzend „gemessener“ Jahreshöchstdurchflüsse. Abgesehen vom meist kleinen Stichprobenumfang gibt es in der gegenwärtigen Hydrologie dazu ein verdrängtes, folgenschweres Defizit: Es ist Praxis, die relative Häufigkeit eines hydrologischen Ereignisses in einer Beobachtungsreihe mit seiner Wahrscheinlichkeit gleichzusetzen. Um das widerspruchsfrei tun zu können, müssen unbedingt zwei Voraussetzungen der Stochastik erfüllt sein:

1. Die hydrologischen Prozesse sind stationär über die Zeit. Die Prozeßgröße fluktuiert um eine Konstante mit einem konstanten Muster.
2. Die Ereignisse sind Resultat eines ergodischen stochastischen Prozesses. Ergodizität bedeutet, daß die verfügbare Beobachtung eine von unendlich

vielen, gleichwahrscheinlichen Realisierungen ist, wobei die Stichprobenmittelwerte gleich dem Mittelwert der Grundgesamtheit sind.

Der Blick auf zahlreiche Klimareihen oder längere Klimaproxies zeigt, daß die Prozesse weder stationär noch ergodisch sind (Strahlung, Niederschlag, Temperatur, Abfluß). Wenn die essentielle Grundlage fehlt, hat Hochwasserstatistik keinen Wert. Wird aus „praktischen“ Gründen dennoch eine solche Statistik aufgestellt, steigt Glauben zu vermeintlichem Wissen auf. Das ist Scholastik.

Nach dem Hochwasser war zu überlegen, ob die Hydrologen diesen mißlichen Zustand überwinden und extreme Stauanlagenzuflüsse möglichst voraussetzungsfrei abschätzen können. Um die gängige Scholastik aufzudecken, geben wir in Kapitel 2 einige Beispiele, wie wenig Wissen über sehr große Hochwasser aus hydrologischen Beobachtungen abgeleitet werden kann. Anschließend wird im Kapitel 3 an die Nichtlinearität hydrologischer Systeme erinnert und ein Weg gezeigt, die Größe und Wahrscheinlichkeit sehr großer Hochwasser für die gegenwärtigen Klimabedingungen abzuschätzen.

2 Was tun mit Beobachtungsdaten?

2.1 Erkenntnistheorie

Die statistische Analyse von Hochwasserdurchfluß-Zeitreihen muß die Erkenntnistheorie beachten, um falsche Schlüsse zu vermeiden. Der Mathematiker *Taleb (2002)* hat treffende Sätze im Zusammenhang mit Börsengeschäften formuliert, die auch Hydrologen nützlich sind:

„Die Geschichte lehrt uns, daß Dinge, die niemals zuvor geschehen sind, passieren können.“ Unser empirisches Wissen ist begrenzt und überwiegend durch die Ereigniswahrnehmung im Laufe eines endlichen Menschenlebens geprägt.

„Das Problem der Interpretation von Daten aus der Vergangenheit illustriert folgende induktive Aussage: Ich habe soeben eine gründliche statistische Untersuchung des Lebens von Präsident Bush durchgeführt. 55 Jahre lang – bei fast 16.000 Beobachtungspunkten – starb er kein einziges Mal. Daher kann ich ihn mit einem hohen Grad an statistischer Signifikanz für unsterblich erklären.“ Der Schluß aus Beobachtungsdaten ist abhängig vom Verständnis, das der Analytiker vom beobachteten Prozeß hat.

„Es wird geglaubt, man könnte die Eigenschaften einer Verteilung aus einer beobachteten Stichprobe ableiten.“ … „Als seltenes Ereignis bezeichne ich jede Fehleinschätzung von Risiken, die sich aus einer engen Auslegung von Zeitreihen aus der Vergangenheit ergeben.“ Weitere Durchflußrekorde (siehe Kap. 2.2) sind solchen Prozessen immanent.

„Es gibt Grund zu der Annahme, daß wir aus einem evolutionären Zweck heraus so programmiert sind, daß wir beharrlich an Ideen festhalten, in die wir Zeit investiert haben.“ Hier ist als treffendes Beispiel die übliche Extremwertstatistik zu nennen.

„Noch mehr Überraschungen stehen uns ins Haus, wenn der Zufall seine Gestalt ändert, etwa bei Regimewechseln.“ Die sogenannten Verteilungen ändern sich ständig durch zahlreiche, überlagerte Instationaritäten (Klimawandel, Landnutzungsänderung usw.). So stammt z.B. der holozäne Auelehm überwiegend aus Bodenerosion in den Waldflächen, die im Mittelalter gerodet wurden.

„Er (Karl Popper) weigerte sich, blind die Auffassung zu akzeptieren, daß Wissen immer durch Hinzunahme weiterer Informationen verbessert werden könnte.“ ... „Ich kann Daten nutzen, um eine Behauptung zu entkräften, aber niemals, um sie zu beweisen.“ Unverzichtbar bleiben hydrologische Daten für die Gebietszustandseinschätzung und den Nachweis von Trendentwicklungen, die aktuelle Wasserbewirtschaftung und die Steuerung wasserwirtschaftlicher Anlagen. In Hinblick auf die seltenen, sehr großen Hochwasser ist der durch Beobachtung entstehende jährliche Zuwachs empirischen Wissens klein.

2.2 Rekorde in unabhängigen Beobachtungsreihen - Theorie

Als Rekordwert R wird ein Durchfluß bezeichnet, der größer ist als alle anderen Werte zuvor: $R = \max(X_1, X_2, \ldots X_n)$. Wie oft treten Rekorde auf, von denen lebende Beobachter sagen, sie noch nie gesehen zu haben? Betrachtet werde dazu eine Beobachtung von Jahreshöchstdurchflüssen (Abb. 2). Die aufeinanderfolgenden Beobachtungen seinen unabhängig. Der Erwartungswert von Rekorden E(R), d.h. deren mittlere Anzahl in einer Reihe von n unabhängigen Beobachtungen in chronologischer Reihenfolge, ist nach *Glick (1978)* gegeben durch

$$E(R) := \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{i} \; .$$

E(R) ist in Abbildung 1 zusammen mit der Standardabweichung dargestellt.

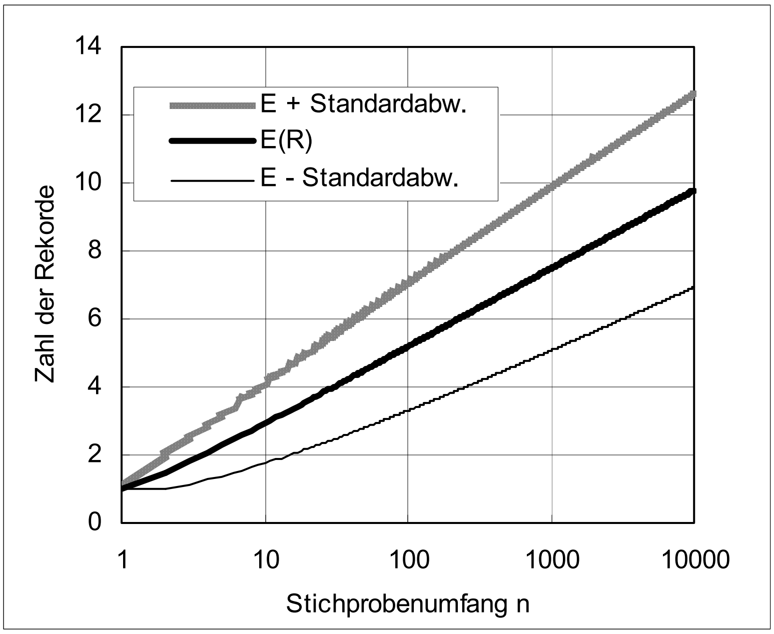

Abbildung 1: Erwartungswert von Rekorden in einer unabhängigen Stichprobe.

In einer zehnjährigen Reihe unabhängiger Ereignisse findet man als Erwartungswert gerade 2,9 Rekorde, in einer 100jährigen 5,2 und in einer 1000jährigen Reihe 7,5 Rekorde! Alles was davon erheblich abweicht, muß auf Instationarität geprüft werden.

Bei unabhängigen Beobachtungen sind die Eintrittszeit eines Rekords und der Zeitabstand zwischen zwei Rekorden unabhängig von der Verteilungsfunktion der Beobachtungen *(Glick 1978)*.

2.3 Ereignishäufigkeit und Rekorde - Realität

Der Müglitz-Durchfluß des Jahres 2002 in Dohna (Abb. 2) erhält mit n = 91 Jahren (ohne 1897) die empirische Häufigkeit $p_{ü} = 1/n = 0{,}01099$. Ist das die wahre Überschreitungswahrscheinlichkeit? Niemand weiß es! Auch die zeitliche „Informations“erweiterung mit historischen Daten bringt kein Wissen, da die tatsächliche Wahrscheinlichkeitsverteilung unbekannt bleibt.

Betrachtet man nur die Hochwasser oberhalb des Schwellenwertes 100 m^3/s, so finden wir sechs Ereignisse, die irregulär auftreten und eine erhebliche Spannweite aufweisen. Diese Situation ist im wesentlichen in allen sächsischen und benachbarten Einzugsgebieten ähnlich. Seit 1897 haben wir real R = 3, wobei für n ~ 100 E(R) = 5,2 ± 1,9 sein sollte. Die Rekordhäufigkeit ist also geringer als erwartet.

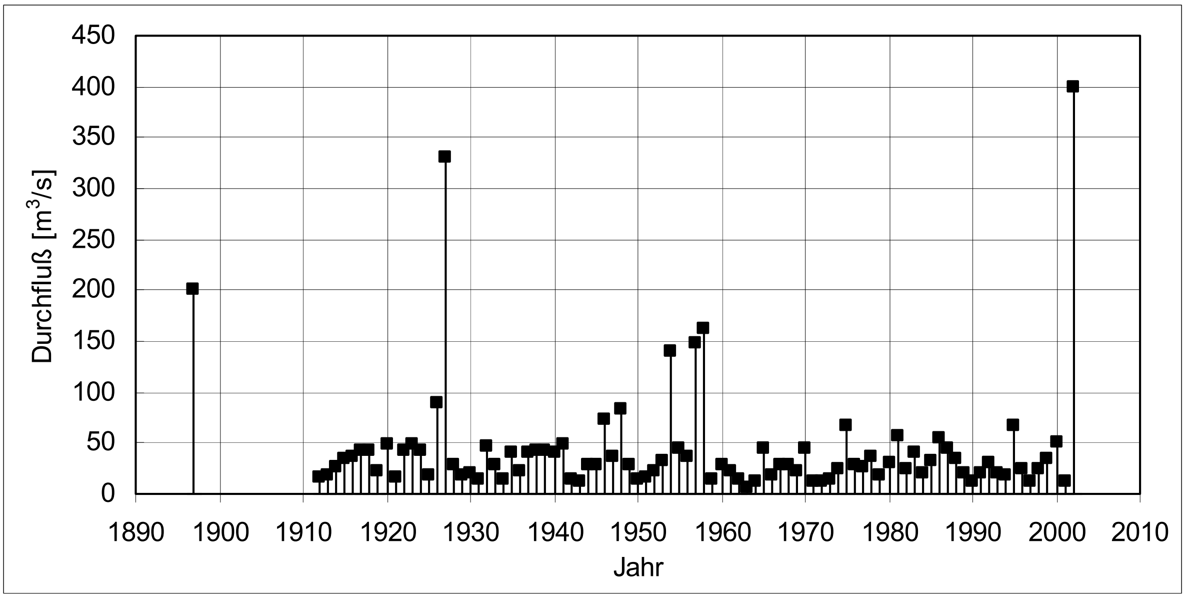

Abbildung 2: Insgesamt 86 % aller Jahreshöchstdurchflüsse (1912-2002) am Pegel Dohna, Müglitz, sind kleiner als 100 m3/s. Durchfluß von 1897 geschätzt.

Im Zusammenhang mit den Hochwasserschutzkonzepten des Freistaates Sachsen wurden die „Extremwertverteilungen“ mit den Rekorddurchflüssen vom August 2002 neu „ermittelt“; meist stieg der „Bemessungsdurchfluß“. Als Konsequenz reicht z.B. die Durchlaßfähigkeit von Brücken, die bisher für ein einhundertjähriges Ereignis konzipiert waren, „plötzlich“ nicht mehr aus. Was tun, wenn es im Jahr 2004 oder 2006 an gleicher Stelle ein weiteres Rekordhochwasser gibt? *Schwarze (2003)* schwante Böses, indem er kritisch fragt, ob es denn überhaupt eine Verteilungsfunktion gäbe, da eine Reihe von unkalkulierbaren Zufällen beim Hochwasserablauf mitwirken.

Anstatt mit allen verfügbaren Mitteln darzustellen, daß die übliche Infrastruktur in unseren Mittelgebirgstälern im besten Falle auf „normale“ Hochwasser eingerichtet ist – es kommt dem notwendigen Hochwasserrisikomanagement nach *Grünewald (2003)* nahe –, wird suggeriert, man könne zufälligen Kombinationen extremer hydrometeorologischer Prozesse Einhalt gebieten.

Im übrigen sind Überflutungsflächen der Talauen durch holozäne Flußsedimente (!) gekennzeichnet und in jeder (auch sehr alten) geologischen Karte sichtbar.

2.4 Weitere Wahrscheinlichkeitsaussagen aus unabhängigen Stichproben nach den Regeln der Stochastik

a) Die Wahrscheinlichkeit P, in einer Stichprobe von n unabhängigen Werten ein Ereignis mit der Überschreitungswahrscheinlichkeit $p_ü$ zu finden, beträgt

$P = 1 - (1 - p_ü)^n$ (Abb. 3). In einhundert Beobachtungsjahren haben wir nur eine 10-%-Chance, das „1000jährliche Hochwasser“ zu sehen.

Mit obiger Gleichung kann auch der Effekt einer wachsenden Funktionsdauer F einer Stauanlage berechnet werden. Dazu ist n durch F zu ersetzen. Sehr kleine Überschreitungswahrscheinlichkeiten $p_ü$ führen nach stochastischen Regeln in Bereiche, wo die Verteilungsfunktion der Durchflüsse **unbekannt** ist.

Überspitzt formuliert: Der Irrsinn, ein 10.000jährliches Hochwasser anhand einer fünfzigjährigen Beobachtung angeben zu wollen, wird klar, wenn man bedenkt, daß vor zehntausend Jahren Europa mit Eis bedeckt war.

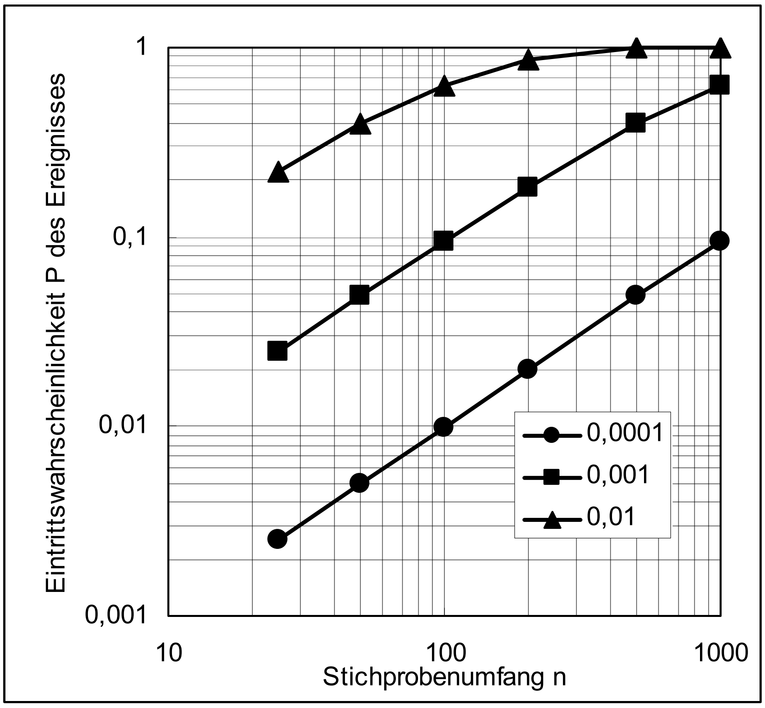

Abbildung 3: Erfolgswahrscheinlichkeit P, in einer Stichprobe von n unabhängigen Werten ein Ereignis mit der Überschreitungswahrscheinlichkeit $p_ü$ (Signatur im Kasten) zu finden.

b) Hinsichtlich der für Verteilungen wichtigen Stichprobenmomente k = 1...4, das sind Mittelwert, Varianz, Schiefe und Wölbung, sagt Tukeys Fünferregel *(in Sachs 1999):* „Man berechne das k-te Moment erst dann, wenn wenigstens 5^k Beobachtungen vorliegen.“ Für k = 3, die Schiefe einer Verteilung, sollten demnach mehr als 125 Jahreshöchstdurchflüsse vorhanden sein! In der gegenwärtigen Hydrologie ist es üblich, das anhand 30jähriger Reihen zu tun.

c) Nach *Taleb (2002)* ist die Verteilung und die Eintrittswahrscheinlichkeit seltener Ereignisse unbekannt. Dann lautet die Konsequenz: In einer Reihe von n unabhängigen Beobachtungen, deren Verteilung unbekannt ist, liegt das 95-%-

Konfidenzintervall der Überschreitungswahrscheinlichkeit $p_ü$ des Maximalwertes im Bereich

$$1 - (1 - p_ü)^{1/n} < p_ü < 1 - p_ü^{1/n}.$$

Abbildung 4 zeigt das ernüchternde Ergebnis dieser Relation *(Kritskiy & Menkel 1981, Lloyd 1996)*. So hat z.B. der größte Wert einer 100jährigen Reihe ein wahres „Wiederkehrsintervall“ zwischen 22 und 10.000 Jahren. Diese gewaltigen Unsicherheiten pflanzen sich in alle „Risikobetrachtungen“ fort, werden aber in der Regel ignoriert.

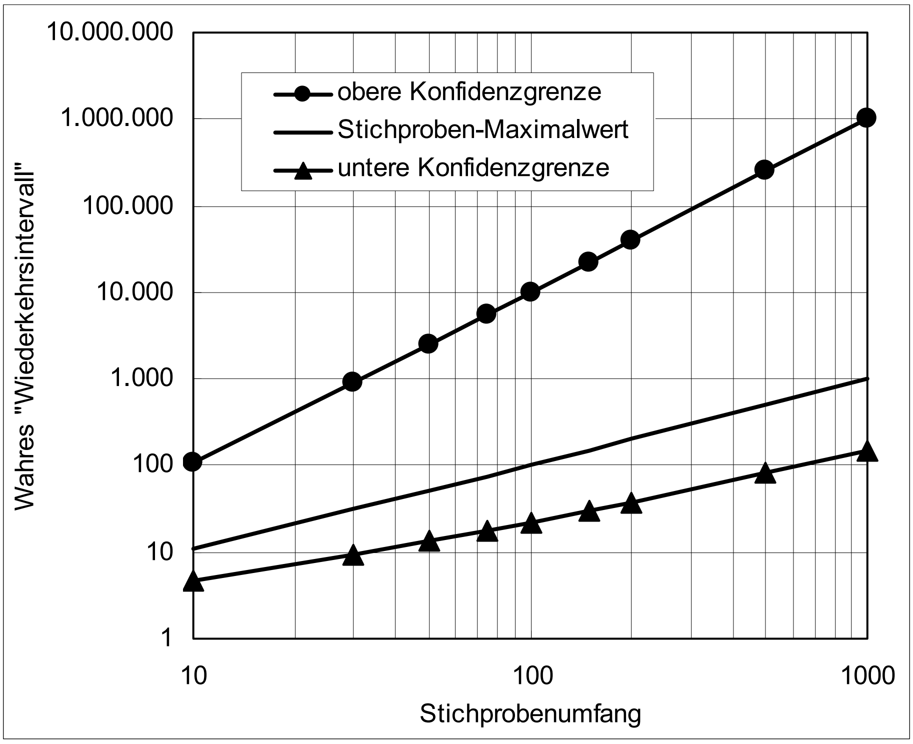

Abbildung 4: Konfidenzintervall des Stichprobenmaximalwertes bei unbekannter Verteilung (S = 95 %).

d) Wird die Logik der Stochastik für unbekannte Verteilungen zu Ende gedacht, sollte man das einfachste Hilfsmittel, die schlichte Normalverteilung, verwenden (Abb. 5). In dem für die Hochwasserbemessung interessanten Bereich sehr großer Durchflüsse kann nach Augenmaß verlängert werden. Die so geschätzten hohen Durchflüsse sind nicht ungenauer als irgendwelche „extremwertstatistisch“ extrapolierten Werte *(Klemeš 2000)*.

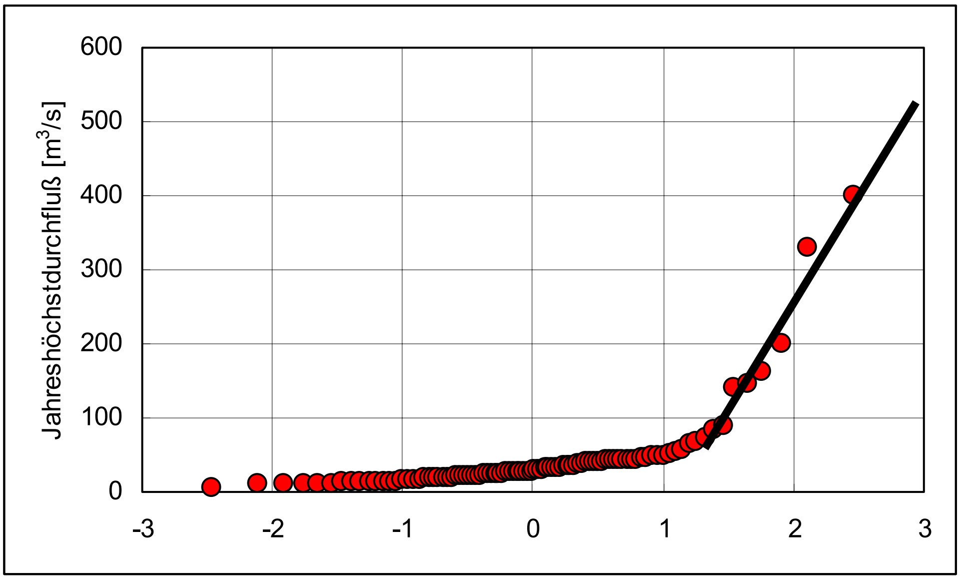

Abbildung 5: Verteilung der Jahreshöchstdurchflüsse am Pegel Dohna, Müglitz (1912-2002 und 1897).

e) Die „Genauigkeit" einer Extrapolation mit den üblichen Extremwertverteilungen ist einfach zu kontrollieren. Man nehme eine Durchflußreihe und ändere die drei kleinsten Werte um einen konstanten, sinnvollen Betrag nach oben und nach unten. Dann wird die Verteilung der Originalreihe und der beiden manipulierten Reihen berechnet und die Extrapolationsergebnisse verglichen. Erstaunt wird man feststellen, daß die manipulierten drei Kleinstwerte die extrapolierten Durchflüsse verändern. Was heißt das aber für einen, der in der Wasserwirtschaft entscheiden muß: Die Extrapolation hat keinen Realitätswert!

3 Extreme Stauanlagenzuflüsse

Sind wir uns der realen Unsicherheit von Extrapolationen aus Abflußbeobachtungsdaten bewußt, auf deren Grundlage bisher entschieden wurde, müssen wir nach einem Weg suchen, die Unsicherheit zu reduzieren. Dieser Weg wird erläutert.

3.1 Integrationseffekt nichtlinearer hydrologischer Systeme

Jeder Input in ein hydrologisches System wird in ihm integriert und erzeugt Output. Eine simple physikalische Integrationsmaschine erzeugt aus einem Sinus-Input einen Kosinus-Output, verschoben um die $\pi/2$-Phase. Die Integration eines *Dirac*-Impulses gibt die Stufenfunktion zurück. Grundsätzlich liefern hydrologische Prozesse über die Integration nichtlinearen Output.

Auf einer kurzen Zeitskala stellt dieser Impuls das wesentliche Merkmal eines heftigen Gewitterschauers dar. Auf einer längeren Zeitskala entspricht er einer Periode, in der z.B. die Niederschläge signifikant höher (oder niedriger) sind als „normal“. Eine Reihe extrem niederschlagsarmer oder –reicher Monate oder Jahre führt zu einem Abwärts- bzw. Aufwärtstrend oder einem Sprung weg vom vorherigen Gleichgewichtsniveau der hydrologischen Prozesse. Würde sich z.B. die Niederschlagsarmut des Jahres 2003 im Erzgebirge einige Jahre fortsetzen, könnten trockenheitsempfindliche Fichten absterben. Die Albedo der Landoberfläche steigt und über den Umweg der Bodenwasserspeicherung und des Verdunstungsprozesses kommt es zur systematischen Abflußzunahme, wenn die Niederschläge danach wieder auf das alte Niveau steigen. Modelle wie AKWA-M® *(Münch 1994)* liefern Ursache-Wirkungsanalysen verschachtelter Prozesse.

Hinsichtlich der seltenen, außergewöhnlich großen Hochwasser bietet allein die voraussetzungsfreie Kombination der real unendlichen Vielfalt von hydrologischen und hydrometeorologischen Zuständen den Schlüssel zu verbesserter Erkenntnis *Klemeš (2000)*.

Einerseits wird der Abfluß an einem Pegel als das hydrologisch „normale“ Rauschen gemessen. Andererseits ist anzunehmen, daß es physikalische Obergrenzen des instationären (!) Niederschlages gibt, die sich aus den Daten der jüngeren Vergangenheit ableiten lassen und nur für diesen Zeitraum gültig sind. Die Obergrenze ist über einen langen Zeitraum keine Konstante (Klima) und vom empirischen Wissen bestimmt. Zwischen dieser Obergrenze, das kann vorläufig der maximierte Gebietsniederschlag MGN sein, und dem „normalen“ Rauschen sind die physikalischen Systemzustände kombinatorisch zu verknüpfen, was eine Schätzung für die Häufigkeit und die Größe außergewöhnlicher Niederschläge und Hochwasser liefert.

3.2 Obergrenze der Talsperrenzuflüsse

Die Bemessung von Stauanlagen muß rigoros erfolgen. Frei von allen willkürlichen Bemessungsfällen (z.B. $BHQ_2 = HQ_{10.000}$ usw.) sollte gegenwärtig mindestens der Zufluß aus MGN oder ähnlich großen Niederschlägen *(siehe Tetzlaff & Raabe 1999)* mit einem deterministischen Niederschlags-Abfluß-Modell berechnet werden. Das Staubauwerk muß den Abflüssen aus diesen unter gegenwärtigen oder zukünftigen Klimabedingungen maximalen Niederschlägen widerstehen. Als Beispiel wurden MGN-Zuflüsse für die Talsperren Malter und

Lehnmühle mit dem N-A-Modell HQ(T)® *(Münch & Dittrich 1999)* geschätzt (Tabelle 1).

Tabelle 1 Talsperrenzuflüsse aus angenommenen MGN-Niederschlägen.

MGN-Niederschlag		Talsperre Malter (EZG = 105 km²)			Talsperre Lehnmühle (EZG = 60 km²)		
Dauer D [h]	Menge [mm]	Q(MGN) [m³/s]	Zufluß-summe [Mio m³]	Abfluß-beiwert [%]	Q(MGN) [m³/s]	Zufluß-summe [Mio m³]	Abfluß-beiwert [%]
1	175	241	14,3	77	142	7,7	71
2		297	17,6	80	175	9,6	75
6	220	312	19,0	81	185	10,4	76
10		321	20,9	82	189	11,4	78
12	250	**323**	21,9	83	**190**	12,0	78
15		322	23,5	84	187	12,9	79
24	325	313	29,6	86	177	16,4	82
48	410	220	38,4	89	123	21,5	86
72	510	188	49,0	91	106	27,6	88

Für die Talsperre Malter ergibt sich bei D = 12 ... 15 h ein maximaler Scheitelzufluß Q(MGN) ~ 320 m³/s. Die Abflußspende erreicht 3,1 $m^3/(s \cdot km^2)$. An der Talsperre Lehnmühle beträgt der maximale Zufluß 185 ... 190 m³/s für D = 6 ... 15 Stunden. Die Abflußspende beträgt ebenfalls 3,1 $m^3/(s \cdot km^2)$. Direktabflußbeiwerte liegen bei 70 bis 90 Prozent. Wird D > 24 h, sinken die Abflüsse deutlich. Die Leistung der Hochwasserentlastung und der Betriebsablässe beträgt an der Talsperre Malter 249 m^3/s (Stauhöhe 334,34 m NN) und an der Talsperre Lehnmühle 137 m^3/s (Stauhöhe 525,05 m NN). Aus den MGN-Zuflußganglinien und hydraulischen Charakteristika haben wir u.a. für beide Talsperren die Dauer der Mauerkronenüberströmung und die maximale Menge der Mauerkronenüberströmung geschätzt (Abb. 6 und 7). Der kritische Lastfall: Eine lang anhaltende Dauer des Abflusses über die Hochwasserentlastungsanlage sowie ein Überströmen der Bauwerkskrone.

Die längste Dauer der Mauerkronenüberströmung tritt mit rund 14 h für den 24-h-Niederschlag ein. Im August 2002 standen einige Talsperren kurz vor oder im Lastfall des Überströmens (RHB Glashütte). Die maximale Kronenüberfallmenge beträgt 74 m^3/s in Malter bzw. 53 m^3/s in Lehnmühle. Die damalige Planung der Talsperren war fast richtig: Die Hochwasserentlastung kann den größten Teil des Q(MGN) abführen.

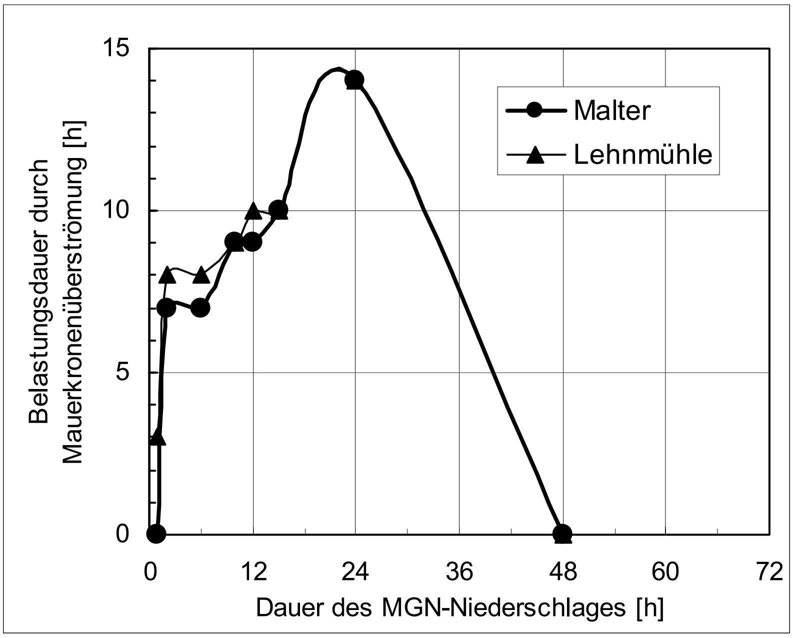

Abbildung 6: Dauer der Mauerkronenüberströmung.

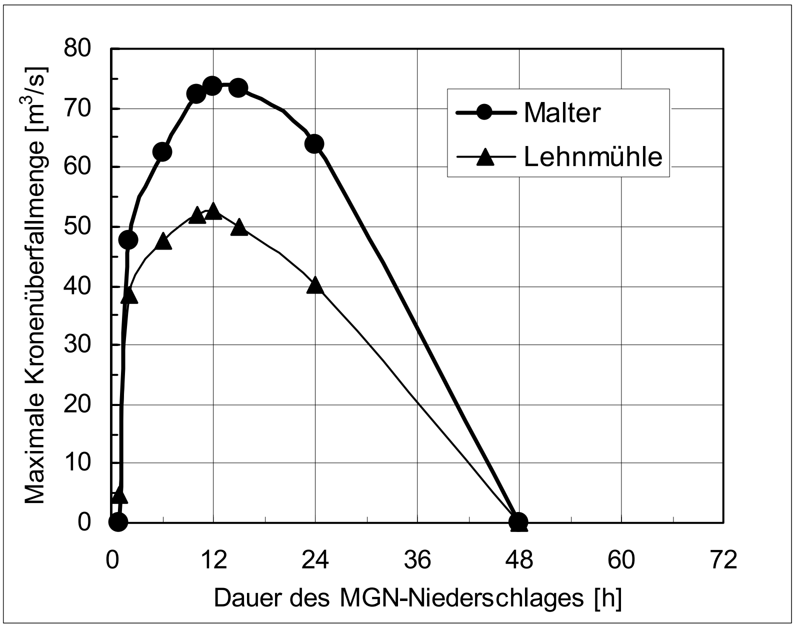

Abbildung 7: Maximale Kronenüberfallmenge.

Selbst „kurze“ MGN verursachen lange Gesamtbelastungszeiten. Für D > 48 h wird entsprechend den Modellannahmen nur noch die Hochwasserentlastung in Anspruch genommen.

Für das realistische Szenario Q(~MGN) sollte die Belastbarkeit der Krone und der Luftseite insbesondere von Schüttdämme nachgewiesen sein. Dabei sei es dahingestellt, ob mit zunehmenden Wissen andere, eventuell höhere Niederschläge anzusetzen sind. Wichtig erscheint uns, solch große Abflüsse *wahrzunehmen*.

3.3 Niederschlagskombinatorik

Nun wird die Lücke zwischen Q(MGN) hinab zu dem gemessenen „Rauschen" gefüllt. Für die Einzugsgebiete der Stauanlagen ist z.B. die empirische Verteilung der jährlichen maximalen (24-h-)Niederschläge auf der Grundlage des Verfahrens von *Klemeš (1993)* zu bestimmen. Der Grundgedanke ist dabei, die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen physikalisch sinnvollen niederschlagsbildenden Komponenten separat abzuschätzen. Dazu werden getrennt die jährlichen Maxima des Flüssigwassergehaltes der Luftmasse, die Effizienz der unkorrelierten orographischen und konvektiven Niederschläge und der Niederschlag selbst ermittelt. Durch Kombinatorik aller unabhängigen Einzelkomponenten ergibt sich eine synthetische Häufigkeitsverteilung des (24-h-)Niederschlages, die im Beispiel von *Klemeš* bei 40 Jahreswerten einen Stichprobenumfang von n = 47.680 ($p_{ü} \sim 10^{-5}$) annimmt.

3.4 Gebietszustände

Die Einzugsgebiete haben unmittelbar vor jedem Niederschlag eine unendliche Vielfalt von Systemzuständen (Vorfeuchte, jahreszeitlich variable Vegetation, plötzliche oder kontinuierliche Änderungen der Flächennutzung usw.) mit ihren zugehörigen Häufigkeitsverteilungen. Jeder dieser Zustände läßt sich mit dem zuvor bestimmten Niederschlag kombinatorisch verknüpfen.

Beispielhaft wird dazu die empirische Häufigkeitsverteilung der Monatswerte von Füllständen der Boden- und Grundwasserspeicher im Einzugsgebiet des Pegels Ammelsdorf (Zufluß zur TS Lehnmühle, Wilde Weißeritz) angegeben. Die Speicherfüllungen wurden mit dem Wasserhaushaltsmodell AKWA-M® *(u.a. Golf 1984, Münch 1994)* berechnet (Abb. 8). Auch Tageswerte lassen sich angeben. Infolge der Nichtlinearität ergibt sich insbesondere beim Bodenspeicher eine unsymmetrische Verteilung mit vielen Monaten der Speichersättigung bzw. weitgehend ausgeschöpftem Bodenspeicher. Die Füllstände beider Speicher sind unkorreliert. Je nach Füllstand ergeben sich für gleiche Niederschläge unterschiedlich große Abflüsse.

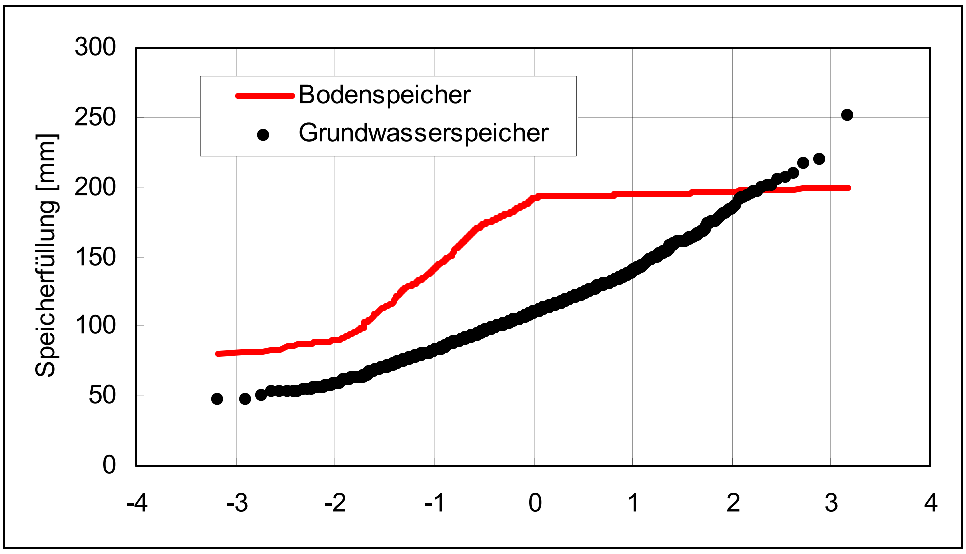

Abbildung 8: Verteilung der Boden- und Grundwasserspeicherfüllung zum Monatsende (Einzugsgebiet Pegel Ammelsdorf, Wilde Weißeritz, n = 834, Mai 1930 bis Oktober 1999).

Auf diesem Weg wird gesichertes empirisches Wissen genutzt, um über die beobachtete Ereignisvielfalt, wie sie Abbildung 9 zeigt, hinauszugehen. Die synthetische Häufigkeitsverteilung extremer Abflüsse wird voraussetzungsfrei und besser geschätzt.

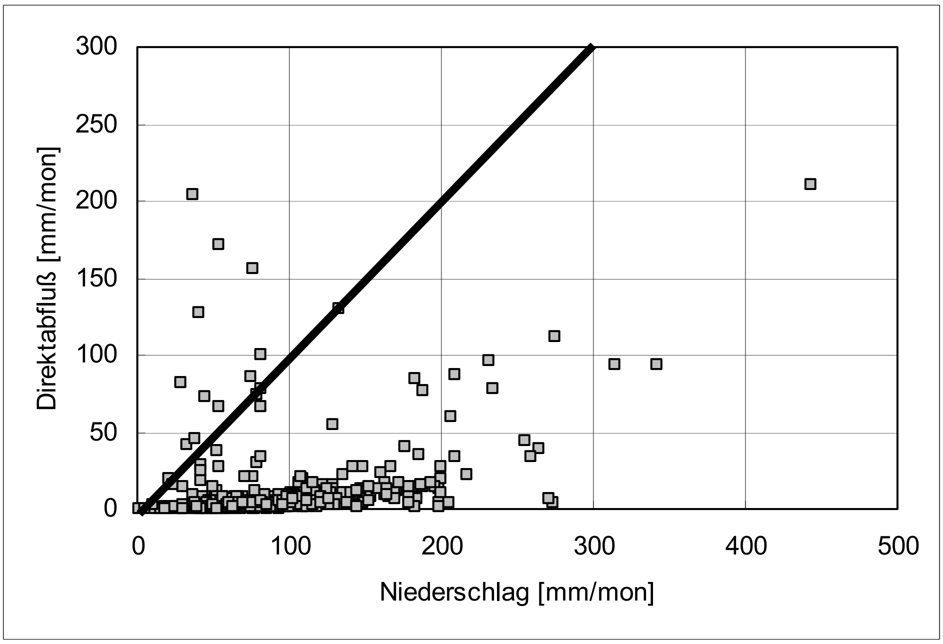

Abbildung 9: Monatliche Niederschläge und Direktabflüsse (Einzugsgebiet Pegel Ammelsdorf, Wilde Weißeritz, n = 834, Mai 1930 bis Oktober 1999).

Dieses Vorgehen erhebt allerdings die Zuordnung von Wahrscheinlichkeiten zu geophysikalischen Phänomenen nicht in den Rang einer Wissenschaft. Aber es werden mehr Informationen aus einer gegebenen Periode genutzt, die zugrundeliegenden physikalischen Prozesse werden direkter einbezogen und es kann jederzeit neues, empirisches Wissen einbezogen werden.

4 Literatur

Glick, N. (1978): Breaking records and breaking boards. American Mathematical Monthly 85, 2-26.

Golf, W. (1984): Prinzipien der Bilanzierung des Wasserhaushaltes mit einem Anwendungsbeispiel in der Mittelgebirgsregion der DDR. Diss. B. Technische Universität Dresden.

Grünewald, U. (2003): Hochwasservorsorge in Deutschland – Lernen aus der Katastrophe 2002 im Elbegebiet. Hydrobrief Nr. 22. Hydrologische Wissenschaften, Fachgemeinschaft in der ATV-DVWK.

Klemeš, V. (1993): Probability of extreme hydrometerological events – a different approach. In: Extreme Hydrological Events: Precipitation, Floods and Drougths, IAHS Publ. No. 213, 167-176.

Klemeš, V. (2000): Common sense and other heresies. Canadian Water Ressources Association. Cambridge, Ontario 2000.

Kritskiy, S.N. & Menkel, M.F. (1981): Gidrologicheskie osnovy upravlenia rechnym stokom. Nauka, Moskva.

Kron, W. (2003): Naturkatastrophen: Ursachen – Auswirkungen – Vorsorge. Wasser & Boden, 55, Heft 7+8, 40-45.

Lloyd, E.H. (1996): A note on the exceedance probability of the sample maximum and the exceedance probabilities of other order statistics. BC Hydro. Vancouver, B.C. (unveröffentlicht, zit. in Klemeš, V. (2000)).

Morton, F.I. (1978): Estimating evapotranspiration from potential evaporation: practicability of an iconoclastic approach. Journal of Hydrology, 38,1-32.

Münch, A. (1994): Wasserhaushaltsberechnungen für Mittelgebirgseinzugsgebiete unter Berücksichtigung einer sich ändernden Landnutzung. Dissertation. Technische Universität Dresden.

Münch, A. & Dittrich, I. (1999): HQ(T)® – Programm zur Berechnung von Hochwasserwellen. Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH, Bannewitz (unveröffentlicht).

Sachs, L. (1999): Angewandte Statistik: Anwendung statistischer Methoden. Springer, Berlin.

Schmidt, Th. (1997): Maximierte Gebietsniederschlagshöhen für Deutschland. DVWK–Mitt. Heft 29. Bonn.

Sieber, H.-U. (2003): Auswirkungen des Extremhochwassers vom August 2002 auf die Sicherheit von Speicheranlagen der sächsischen Landestalsperrenverwaltung – eine erste Einschätzung. Wasserwirtschaft, Heft 1-2, 30-35.

Schwarze, R. (2003): Hochwasser an der Elbe und ihren Nebenflüssen. In: Kleeberg, H.-P. (Hrsg.) Klima – Wasser – Flußgebietsmanagement – im Lichte der Flut. Hydrologische Wissenschaften – Fachgem. ATV-DVWK, Heft 04.03, Hennef.

Taleb, N.N. (2002): Narren des Zufalls. Die verborgene Rolle des Glücks an den Finanzmärkten und im Rest des Lebens. WILEY-VCH Verlag, Weinheim.

Tetzlaff, G. & Raabe, A. (1999): Räumliche und zeitliche Verteilung maximaler Niederschläge. In: Extreme Naturereignisse und Wasserwirtschaft – Niederschlag und Abfluß. Informationsberichte Heft 5/99. Bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München

Autoren:

Dr. rer. nat. Ingo Dittrich
Dr. rer. nat. Albrecht Münch
Dipl.-Hydrol. Andreas Wahren

Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH
Gerlinger Straße 4
D 01728 Bannewitz

Tel.: ++49 – 351 – 4014793
Fax: ++49 – 351 – 4014796
E-Mail: Hydro-Consult@t-online.de

Dipl.-Hydrol. Helmut Birke

Böttgerstraße 53
D 01129 Dresden

Tel.: ++49 – 351 – 8493276
Fax: ++49 – 351 – 8493276
E-Mail: birke_helmut@t-online.de

HQ(T)® und AKWA-M® sind eingetragene Warenzeichen der Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH.