System zur kontrollierten Auf- und Verteilung eines nicht bedarfsdeckenden Wasserdargebots

David Walter, Philipp Klingel

Eingereicht am: 11.08.2020
Begutachtet im Peer-Review-Verfahren: 22.12.2020

Wasserversorgung, gerechte Wasserverteilung, Wasserknappheit, Entwicklungs- und Schwellenländer, kontrollierte Aufteilung, Wasserverteiler

In diesem Artikel wird ein Wasserversorgungssystem zur planvollen und kontrollierten Verteilung eines limitierten und schwankenden Wasserdargebots vorgestellt. Das System ermöglicht auch bei nicht bedarfsdeckender Versorgung eine gerechte Verteilung der vorhandenen Ressourcen. Das Dargebot wird über ein verästeltes Leitungsnetz, an dessen Verzweigungen das Wasser in sogenannten Wasserverteilern über Wehrüberfälle aufgeteilt wird, gravitär zu den Wasserspeichern in Verbrauchernähe transportiert. Von den Verbrauchern nicht benötigtes Wasser wird im System automatisch umverteilt. Im Artikel werden das Konzept, die Komponenten, Planungskriterien und die Auslegung sowie die Modellierung erläutert. Die Umsetzung in einem Versorgungsgebiet im Norden Vietnams wird kurz beschrieben.

System for controlled subdivision and distribution of non-demand-covering water supply

This paper presents a novel water supply system to distribute limited water resources with varying quantity. The system enables a controlled and planned and, thus, fair distribution of the available resources independently from the consumption patterns. The system input is transported by gravitation through a branched pipe system to storage tanks close to the consumers. At every branch the water is distributed within a small tank with several chambers which are separated by weirs. Water which is not consumed is redistributed in the system automatically. The concept, the components, planning criteria and system design as well as the system modelling are described within the paper. The application of the solution in a supply area located in northern Vietnam is shortly outlined.

Einleitung

Während in den Industrienationen auch die Wasserversorgung ländlich geprägter Gebiete größtenteils über leitungsgebundene Wasserversorgungssysteme stattfindet, beträgt der Anschlussgrad in den Entwicklungs- und Schwellenländern lediglich 28 % [1]. Der nicht an ein Wasserversorgungssystem angeschlossene Anteil der Bevölkerung muss sich durch alternative, meist individuell umgesetzte Konzepte mit Wasser versorgen. Dies kann z. B. die Beschaffung von Quell- oder Oberflächenwasser, das Sammeln von Regenwasser oder der Kauf von Trinkwasser bei kommerziellen Anbietern sein. Dazu werden auch private Versorgungsinstallationen genutzt, beispielsweise Zisternen, Schläuche oder Rohrleitungen und Behälter (siehe z. B. [2, 3, 4]).

Eine derartige Versorgung ist verbunden mit einem großen Aufwand für die Verbraucher, z. B. durch die Distanz zur nächstgelegenen Ressource, und vergleichsweise hohen Kosten, z. B. für private Installationen, den Zukauf von Wasser oder den Verdienstausfall in Zeiten der Beschaffung. Die heterogene örtliche Verteilung und die zeitliche Variabilität des Dargebots bergen für die einzelnen Verbraucher Unsicherheiten sowie vor allem auch eine Ungleichheit hinsichtlich Zugang, Qualität und Quantität. Je ausgeprägter die, ggf. temporäre, Wasserknappheit in einer Region ist, desto gravierender sind die Defizite und die

Ungleichheit in der Versorgungsituation (siehe z. B. [5, 6]).
Bei größeren Distanzen zwischen Wasserdargebot und Verbrauchern kann zur Verbesserung der Versorgungssituation ein zentrales System für den Transport des Wassers von der Ressource zu den Versorgungsgebieten zielführend sein. Es hat sich gezeigt, dass die Realisierung einer zentralen Wasserverteilung, wie sie in den Industrieländern weitgehend umgesetzt ist und bei der das System kontinuierlich mit Wasser vollgefüllt und unter Druck betrieben wird, große Anforderungen an Know-how bzgl. Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung sowie Organisation und Management stellt. Außerdem muss der Wasserbedarf entsprechend der Konzeption jederzeit gedeckt sein. Sind diese Voraussetzungen nicht gegeben, wird das für einen kontinuierlichen Betrieb konzipierte Wasserverteilungssystem früher oder später intermittierend betrieben. Dabei wird in das Verteilungssystem nur für beschränkte Zeitperioden Wasser eingespeist. Den Verbrauchern wird folglich auch nur für eine beschränkte Dauer Wasser zur Verfügung gestellt, was eine private Speicherung erforderlich macht. Zudem kann das verfügbare Wasser auf Grund der Systemhydraulik nicht gleichmäßig verteilt werden. Durch den Betrieb entgegen der Konzeption verschlechtert sich der Zustand der Versorgungsinfrastruktur fortwährend, die Wasserverluste nehmen sukzessive zu. Die eingespeiste Wasserqualität kann nicht aufrechterhalten werden, das Wasser muss abgekocht und Trinkwasser zugekauft werden. Letztlich werden die Verbraucher mit unterschiedlicher Wasserquantität und -qualität versorgt (siehe z. B. [7, 8, 9, 10]).
In diesem Artikel wird eine technische Lösung vorgestellt, die den vorrangigen Zweck hat, ein limitiertes und schwankendes Wasserdargebot planvoll und kontrolliert im Versorgungsgebiet zu verteilen. Damit kann eine gerechte Verteilung eines nicht bedarfsdeckenden Wasserdargebots realisiert werden. Anforderungen an die Lösung sind wartungsarme Bestandteile und ein möglichst geringer Aufwand für die Steuerung/Regelung. Zentrales Element der Lösung ist der sogenannte Wasserverteiler, der aus mehreren Wasserkammern aufgebaut ist. Das in eine Kammer des Verteilers fließende Wasser wird über Wehrüberfälle mit variablen Breiten in weitere Kammern aufgeteilt, an die über Rohrleitungen tiefer liegende Wasserverteiler angeschlossen sind. Das in das System eingespeiste Wasser fließt damit mittels Gravitation über ein verästeltes Rohrnetz, bei dem an jeder Leitungsverzweigung ein Verteiler angeordnet ist, bis in die Speicherbehälter bei den Verbrauchern an den Enden des Netzes. Wird zur Verfügung stehendes Wasser nicht abgenommen, schließt ein Schwimmerventil den Behälter und somit den Systemast. Das Wasser fließt über den nächsthöheren Verteiler in den parallelen Ast. Findet auch dort keine Abnahme statt, fließt das Wasser im wiederum nächsthöher gelegenen Verteiler in den parallelen Ast usw. Über die Wehrbreiten kann das eingespeiste Wasser unabhängig vom Zufluss in einem vorgegebenen Verhältnis aufgeteilt werden. Übersteigt der Bedarf das Dargebot oder geht das Dargebot gegen Null, ist auch ein Leerlaufen des Systems oder einzelner Äste möglich.
Das Grundprinzip der Wasseraufteilung mittels Wehrüberfall ist altbekannt. Beispielsweise beschreibt bereits im ersten Jahrhundert v. Chr. der römische Ingenieur Vitruv eine Lösung zur Aufteilung des einer Stadt zufließenden Wassers in einem Behälter mit mehreren Becken, die über Rohre verbunden sind [11, 12]. Ähnliche Systeme zur Wasseraufteilung wurden im römischen Reich auch tatsächlich umgesetzt, z. B. in Pompeji, in Thuburbo Minus im heutigen Tunesien und in Nemausus, dem heutigen Nîmes in Frankreich [13, 14, 15, 16]. Auch später findet die Lösung weiter Anwendung, z. B. im mittelalterlichen Heidelberg [17]. In der aktuellen Versorgung mit Trink- oder Brauchwasser spielt das Prinzip bisher keine Rolle, lediglich bei Freispiegelgerinnen zur Bewässerung sind Umsetzungen bekannt (siehe z. B. [18]).
Der Fokus der folgenden Ausführungen liegt auf der Erläuterung der Konzeption und der Komponenten der technischen Lösung sowie der Systemauslegung und -modellierung. Die pilothafte Umsetzung des Systems in einem Versorgungsgebiet im Norden Vietnams wird kurz beschrieben.

System und Komponenten

Die Aufgabe eines Wasserverteilers (WV) ist die Aufteilung und Weiterleitung von Wasser innerhalb des Verteilungssystems. Ein WV besteht aus einer Vorkammer (VK) und mehreren Unterkammern (UK). Zufließendes Wasser gelangt zunächst in die VK und wird dann auf die UK aufgeteilt. Die so entstehenden Teilströme werden über Rohrleitungen und ggf. tiefer liegende WV zu den Wasserspeichern (WS) bei den Verbrauchern geleitet. Die Anzahl der UK ergibt sich in Abhängigkeit der benötigten Teilströme.
Die Aufteilung des Wassers wird über Wehrüberfälle umgesetzt, die zwischen VK und UK angeordnet sind. Die Wehrüberfälle müssen eine Einstellung der Wehrbreite ermöglichen. Über die Relation der Wehrbreiten zueinander kann definiert werden, welcher Anteil des Zuflusses in die jeweiligen UK gelangt. Die Wehrbreiten sollten flexibel einstellbar sein, damit eine Anpassung der Aufteilung während des Betriebs ermöglicht wird, um z. B. langfristige oder kurzzeitige Änderungen des Wasserbedarfs zu berücksichtigen.
Bis auf den höchstgelegenen, zentralen WV, der am Beginn eines Verteilungssystems steht und die Systemeinspeisung erstmals aufteilt, sind alle WV und alle WS mit Schwimmerventilen ausgestattet. Schwimmerventile ermöglichen eine Drosselung des Zuflusses, falls ausreichend Wasser zur Deckung des Bedarfs vorhanden ist. Besteht kein Bedarf wird der Zufluss unterbrochen. Überschüssiges Wasser wird rückgestaut und über die höher gelegenen WV im gesamten System umverteilt. Für einen

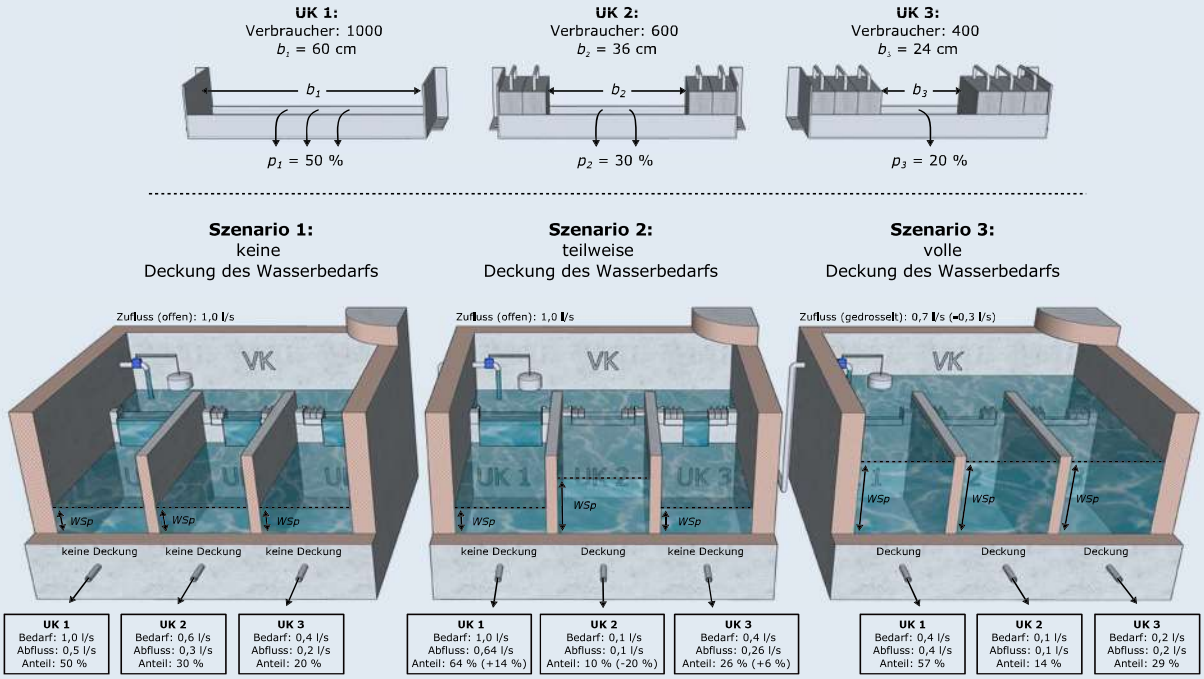

Bild 1: Funktionsweise eines Wasserverteilers mit drei Unterkammern

WV ergeben sich daher drei mögliche Betriebsszenarien. **Bild 1** verdeutlicht diese Betriebsszenarien an einem WV, der Wasser in drei UK aufteilt. Um eine gerechte Aufteilung zu erlangen sind die Wehrbreiten im Beispiel entsprechend der an die UK angeschlossenen Verbraucher gewählt. In Szenario 1 findet keine Deckung des Wasserbedarfs statt. Das Wasser fließt von den UK direkt zu den Verbrauchern und die Aufteilung ergibt sich entsprechend der eingestellten Wehrbreiten. Während eines nicht bedarfsdeckenden Betriebs wird der Zufluss also kontrolliert verteilt. In Szenario 2 findet eine teilweise Deckung des Wasserbedarfs statt. Da der Zufluss in UK 2 den Bedarf übersteigt, kommt es zu einem Rückstau. UK 2 füllt sich bis zum Wasserspiegel der VK. Das überschüssige Wasser wird nun gemäß den Wehrbreiten anteilig auf die übrigen UK aufgeteilt. Bei einer Überschussmenge von 20 % aus UK 2 fließen somit 14 % in UK 1 und 6 % in UK 3. Während eines teilweise bedarfsdeckenden Betriebs wird überschüssiges Wasser also ebenfalls proportional aufgeteilt und im System umverteilt. In Szenario 3 findet eine vollständige Deckung des Bedarfs statt. Der Abfluss aus den UK entspricht dem Bedarf. Das überschüssige Wasser staut sich in allen UK zurück und es kommt zu einem Überstau der Wehrüberfälle, die ihre Funktion verlieren. Der Zufluss in den WV wird nun durch das Schwimmerventil gedrosselt. Während eines bedarfsdeckenden Betriebs verhält sich der WV also wie ein gefüllter Durchlaufbehälter.

Das Systemkonzept basiert auf einer dezentralen Wasserspeicherung in Verbrauchernähe und einem verästelten Zubringersystem mit WV. Am höchstgelegenen zentralen WV erfolgt die Systemeinspeisung. Hier wird das Wasser erstmals aufgeteilt und an tieferliegende WV und WS weitergeleitet. Weitere Einspeisungen in diese WV sind prinzipiell möglich. Jeder Systemast endet im WS einer sogenannten Versorgungseinheit (VE), die mehrere Verbraucher umfasst. Zwischen WS und Verbraucher der VE können wiederum verschiedene Verteilstrukturen bestehen. Ein typisches Beispiel hierfür wäre ein Dorf mit einem gemeinsam genutzten Dorftank. Die dezentrale Wasserspeicherung schafft eine hydraulische Trennung, die den Verbrauchern nur den Bezug des ihrer VE zugeteilten Wassers ermöglicht.

Das Systemkonzept ist schematisch in **Bild 2** dargestellt. Die Notation der VE und der Systemelemente ergibt sich aus deren Anordnung im Verteilungssystem und aus dem dazugehörenden Versorgungspfad. Die Aufteilung innerhalb der WV wird in Form von Prozentsätzen p_n bestimmt. Jeder Prozentsatz bezieht sich dabei auf den Wehrüberfall einer UK, wobei innerhalb eines WV alle Prozentsätze relativ zueinander betrachtet werden. Der absolute Anteil einer Versorgungseinheit ergibt sich somit aus dem Produkt aller zuvor durchlaufenen relativen Prozentsätze.

Auslegung

Leitungssystem

Da das Verteilungssystem bei einem ausreichenden Wasserdargebot eine bedarfsdeckende Versorgung ermögli-

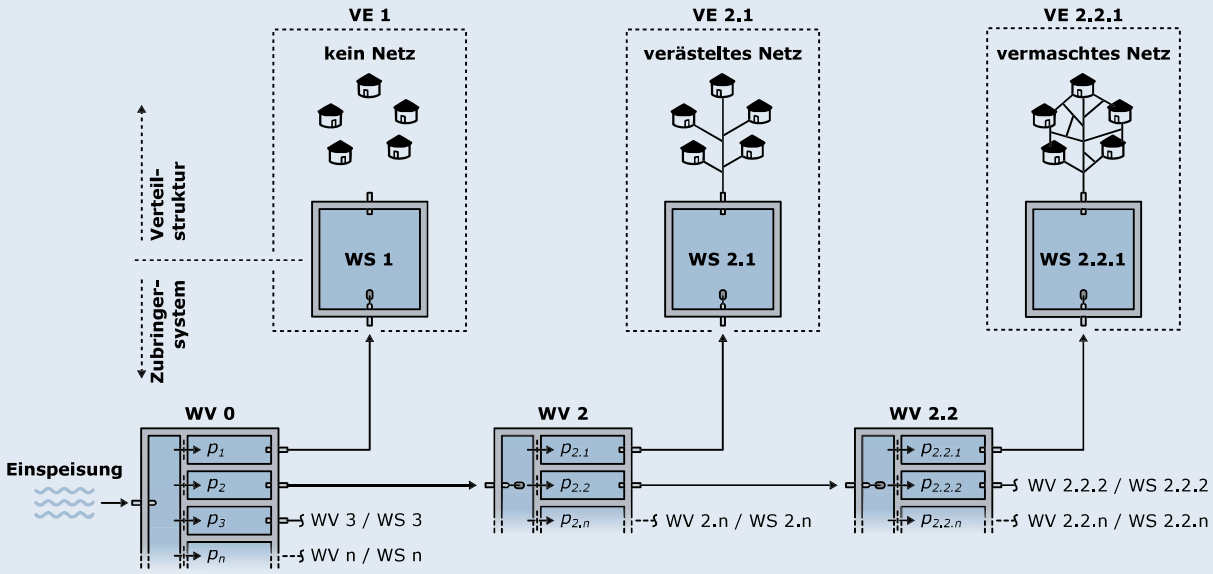

Bild 2: Systemkonzept mit Wasserverteiler (WV), Versorgungseinheiten (VE) und Wasseraufteilung gemäß der Prozentsätze p_n

chen soll, wird das Leitungssystem mit dem Ansatz der Spitzenfaktoren gemäß DVGW W 400-1 [19] und DVGW W 410 [20] ausgelegt. Das gesamte Zubringersystem kann auf Grund des Ausgleichs von Bedarfsschwankungen in den Wasserspeichern vergleichsweise wirtschaftlich auf den maximalen Tagesbedarf Q_{dmax} ausgelegt werden. Die Auslegung auf den maximalen Stundenbedarf Q_{hmax} ist nur bei den Verteilstrukturen zwischen WS und Verbrauchern notwendig.

Durch die freien Wasserspiegel herrscht in den WV und WS atmosphärischer Druck. Diese Komponenten müssen entlang eines Versorgungsasts daher auf sukzessiv abfallenden Höhenlagen angeordnet sein. Da die Zubringerleitungen stets zwei Komponenten verbinden, ergibt sich der Durchfluss im verbindenden Leitungsabschnitt in Abhängigkeit des Höhenunterschieds der Komponenten, der Länge des Leitungsabschnitts, des Rohrdurchmessers sowie der kontinuierlichen und lokalen Energieverluste. Die Lage der WV nimmt daher einen direkten Einfluss auf die Systemauslegung. Gemäß einer wirtschaftlichen Bemessung gilt es also Höhenlagen zu wählen, die in Abhängigkeit von Bemessungsdurchfluss und Leitungslängen möglichst geringe Rohrdurchmesser im Gesamtsystem erlauben.

Je nach Dargebots- und Bedarfssituation muss eine Entleerung, Befüllung oder Teilfüllung des Leitungssystems in Kauf genommen werden. Ein nicht dauerhaft gefülltes Leitungssystem kann jedoch mit negativen Auswirkungen hinsichtlich Wasserqualität und Betrieb verbunden sein. So kann z. B. ein Schmutzeintrag durch Leckagen in leere Leitungsabschnitte erfolgen oder es können Lufteinschlüsse während des Befüllungsprozesses entstehen, die für eine Reduktion des Durchflusses sorgen. Der Leitungsverlauf nimmt hierbei einen maßgebenden Einfluss auf die Ausprägung dieser negativen Auswirkungen. Typische Leitungsverläufe sind in **Bild 3** dargestellt. In Leitungsverläufen mit kontinuierlich fallendem Höhenprofil oder mit ausgeprägtem Tiefpunkt ergibt sich eine gleichmäßige Entleerung und Befüllung. Die Entlüftung findet eigenständig, entweder durch einen Anstieg des Wasserspiegels am oberen Leitungsende statt oder Luft wird durch die turbulente Interaktion zwischen Freispiegel- und Druckströmung in die Strömung eingetragen und zum unteren Leitungsende transportiert [21]. Während sich Leitungen mit fallendem Höhenprofil vollständig entleeren, sorgt ein ausgeprägter Tiefpunkt für einen stetig gefüllten Teilabschnitt. Die negativen Auswirkungen reduzieren sich hierbei nur auf den oberen Teil der Leitung. Wenn zwischen den WV z. B. eine bestimmte Höhenlage aufrechterhalten werden soll, kann durch einen steilen Abfall zu Beginn des Verlaufs ein Großteil der Leitung dauerhaft gefüllt bleiben. Bei Leitungsverläufen mit mehreren Hoch- und Tiefpunkten findet eine ungleichmäßige Entleerung und Befüllung statt, die unter anderem zu erheblichen Druckschwankungen führen kann. Zudem bilden sich Lufteinschlüsse in den abwärts geneigten Abschnitten, die zu einer Verminderung der hydrostatischen Druckenergie führen. Hierdurch verringert sich der Durchfluss, wobei es auch zu einer vollständigen Verhinderung der Fließbewegung kommen kann [22]. Ein solcher Leitungsverlauf sollte daher vermieden werden. Andernfalls muss ein Austrag der Lufteinschlüsse durch z. B. Entlüftungsventile ge-

währleistet werden. Da Entlüftungsventile in Entwicklungs- und Schwellenländern auf Grund des Wartungsaufwands oft potenzielle Ursache von Wasserverlusten sind, empfiehlt sich hier zunächst die Überprüfung der Selbstentlüftungsfähigkeit, z. B. nach *Aigner* [22] oder *Horlacher* und *Helbig* [23].

Wasserverteiler

Da WV keine Speicherfunktion haben, kann die hydraulische Bemessung nicht durch die Bestimmung des Speichervolumens erfolgen. Die Auslegung zielt daher auf ein ausreichendes Volumen der VK und UK zur Gewährleistung eines sachgemäßen Betriebs während der verschiedenen Dargebots- und Bedarfssituationen ab. Die Kammervolumen werden folglich in Abhängigkeit der Bemessungsdurchflüsse von Zu- und Abfluss (Q_{Zu} und Q_{Ab}) ermittelt.

Um einen sachgemäßen Betrieb des Schwimmerventils und der Wehrüberfälle zu gewährleisten, muss in der VK eine ausreichende Energiedissipation des Zuflusses stattfinden. Bei zu großen Wasserspiegelschwankungen würde sich eine Verfälschung der Wasseraufteilung und ein oszillierendes Öffnen und Schließen des Schwimmerventils während einer Bedarfsdeckung ergeben. Der Energieeintrag findet, wie in **Bild 4** dargestellt, in Form eines Freistrahls statt. Die Länge des Strahl-Kernbereichs ergibt sich in Abhängigkeit des Durchmessers D_{Zu} der Zulaufleitung und beträgt ca. $5 \cdot D_{Zu}$. In einem Abstand von $10 \cdot D_{Zu}$ ist bereits ein Großteil der kinetischen Energie abgebaut [24]. Für die Höhe h_{VK} der VK wird daher eine Mindesthöhe von $h_{VK} \geq 10 \cdot D_{Zu}$ definiert. Diese Höhe entspricht der notwendigen Höhe der Wehrüberfallkante. Der Strahlwinkel eines Freistrahls beträgt ca. 20°. Um eine möglichst große Energiedissipation am Boden der VK zu erreichen, muss der Strahl in vollem Umfang auf dem Boden auftreffen. Weiter muss zwischen dem äußeren Rand des Strahls und der Wandung ein ausreichend großer Abstand herrschen, um eine nach oben quellende Rückströmung zu verhindern. Dieser Abstand muss mindestens dem Radius des Strahls am Kammerboden entsprechen. Somit ergibt sich in Abhängigkeit des Strahlwinkels und der Kammerhöhe h_{VK} bzw. des Durchmessers D_{Zu} eine Mindestlänge der VK von $l_{VK} \geq 40 \cdot \tan(10°) \cdot D_{Zu}$. Eine ausreichende Breite b_{VK} und somit auch ein ausreichend großes Volumen zur Sicherstellung einer hinreichenden Energiedissipation ergibt sich zwangsläufig aus konstruktiven Gründen, da ein WV aus mindestens zwei UK besteht.

Die UK sollten so bemessen werden, dass eine kurzzeitige Entnahme in einer VE, die den Zufluss in die UK übersteigt, nicht direkt zu einer Entleerung der Kammer und zu einem Lufteintrag in das System führt. Der Abfluss aus der UK ergibt sich gemäß der hydraulischen Bemessung des Leitungssystems und entspricht etwa dem Bemessungsdurchfluss Q_{Ab}. Für diesen Abfluss kann, bei Ver-

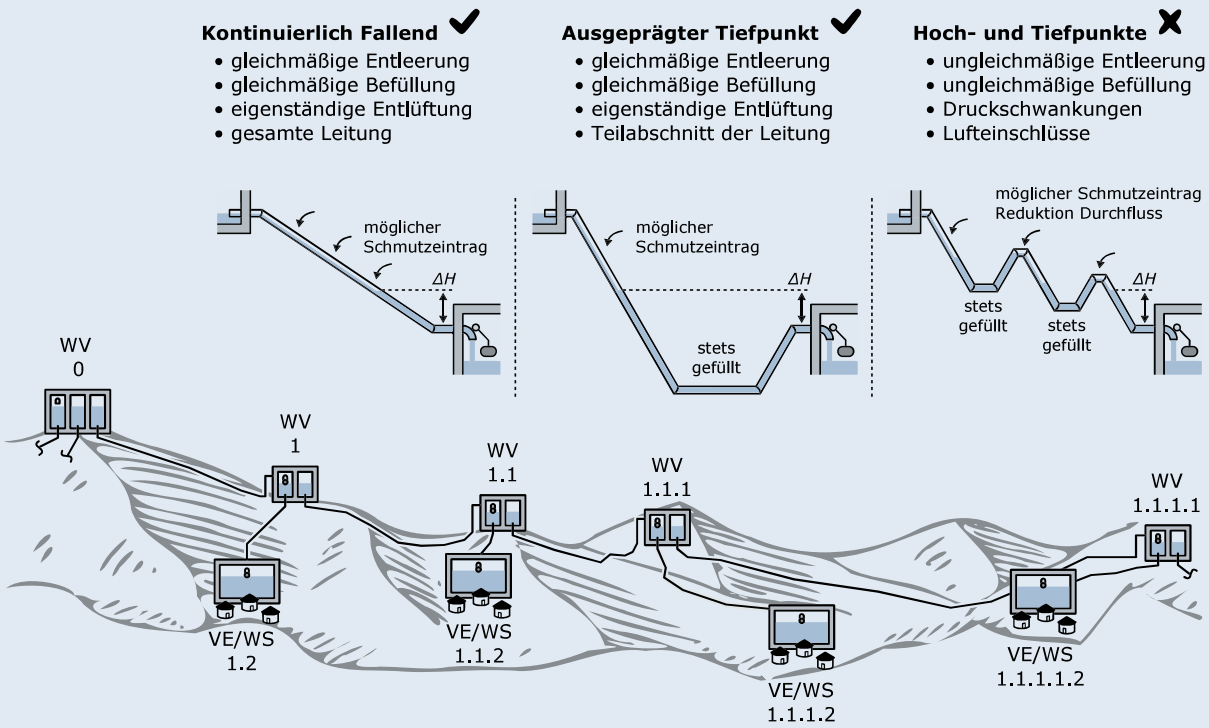

Bild 3: Mögliche Leitungsverläufe mit ihren Vor- und Nachteilen

nachlässigung des Zuflusses (konservative Annahme), ein fluktuierendes Kammervolumen V_{UK} ermittelt werden, welches eine Entleerung der UK für eine definierte Dauer verhindert. Für UK, die Wasser direkt in eine VE weiterleiten, hat sich eine Dauer von $t = 15$ min bewährt. In der VE kann also kurzzeitig eine Wassermenge äquivalent zum 15-minütigen Bemessungsabfluss entnommen werden, ohne dass ein Lufteintrag stattfindet. Für UK, die Wasser zu einem WV weiterleiten, ist wegen der Pufferwirkung der unterstrom liegenden WV eine Dauer von $t = 5$ min zweckmäßig. Das fluktuierende Kammervolumen ergibt sich dann zu $V_{UK} = Q_{Ab} \cdot t$. Hinzu kommen noch das Totraumvolumen unterhalb der Ablaufleitung und ein Volumen zur Realisierung der Mindestüberdeckung $h_{UK,krit}$ über der Ablaufleitung. Die Mindestüberdeckung $h_{UK,krit}$ verhindert einen Lufteintrag durch Wirbelbildung und kann z. B. nach *Knauss* [25] ermittelt werden.

Nach Ermittlung von h_{VK}, l_{VK}, $h_{UK,krit}$ und V_{UK} können die Breite b_{UK} und die Länge l_{UK} der UK gewählt werden. Aus bautechnischer Sicht ist zu empfehlen, alle UK eines WV mit den gleichen Abmessungen auszuführen. Dies kann zwar eine konservative Überbemessung einiger Kammern zur Folge haben, erleichtert jedoch Planung, Bau und Betrieb der Anlage. Weiter können bei gleicher Breite der UK identische Wehrüberfallsysteme installiert werden. Dies erleichtert deren Fertigung und führt zu einem einfacheren Verständnis hinsichtlich der Aufteilung des Wassers. Weiter ist empfehlenswert, die UK mindestens so breit wie die Länge der VK auszuführen ($b_{UK} \geq l_{VK}$), wobei zusätzlich die Herstellung des Wehrüberfallsystems und die Einstellung möglicher Wehrbreiten berücksichtigt werden sollten.

Modellierung

Zur Untersuchung der Deckung des Wasserbedarfs in den einzelnen VE sowie des Rückstaus und der Umverteilung bei unterschiedlichen Dargebots- und Bedarfsszenarien eignen sich Simulationen mit einem Rohrnetzmodell. Im Folgenden wird das Prinzip der Systemmodellierung erläutert, das mit gängigen Softwareprodukten umgesetzt werden kann. Hier wird die Open-Source Software EPANET genutzt [26]. Bis auf die WV können alle Systemelemente herkömmlich nach *Klingel* [27] und *Rossmann* u. a. [26] modelliert werden. Die Modellierung eines WV muss die Füllung und Entleerung der Kammern, die Aufteilung des Wassers von der VK in die UK, den Rückstau aus den UK in die VK, sowie eine veränderte Aufteilung während eines Rückstaus abbilden.

Ein schematisches Knoten-Stränge-Modell eines WV ist in **Bild 5** dargestellt. VK und UK werden als separate Behälter mit einer geodätischen Sohlhöhe $h_{NN,Behälter}$ abgebildet. Alle die Behälter verbindende Stränge werden so modelliert, dass sie hydraulisch nicht relevant sind, z. B. mit sehr kurzer Länge und sehr geringer Rauheit. Die Durchmesser sollten

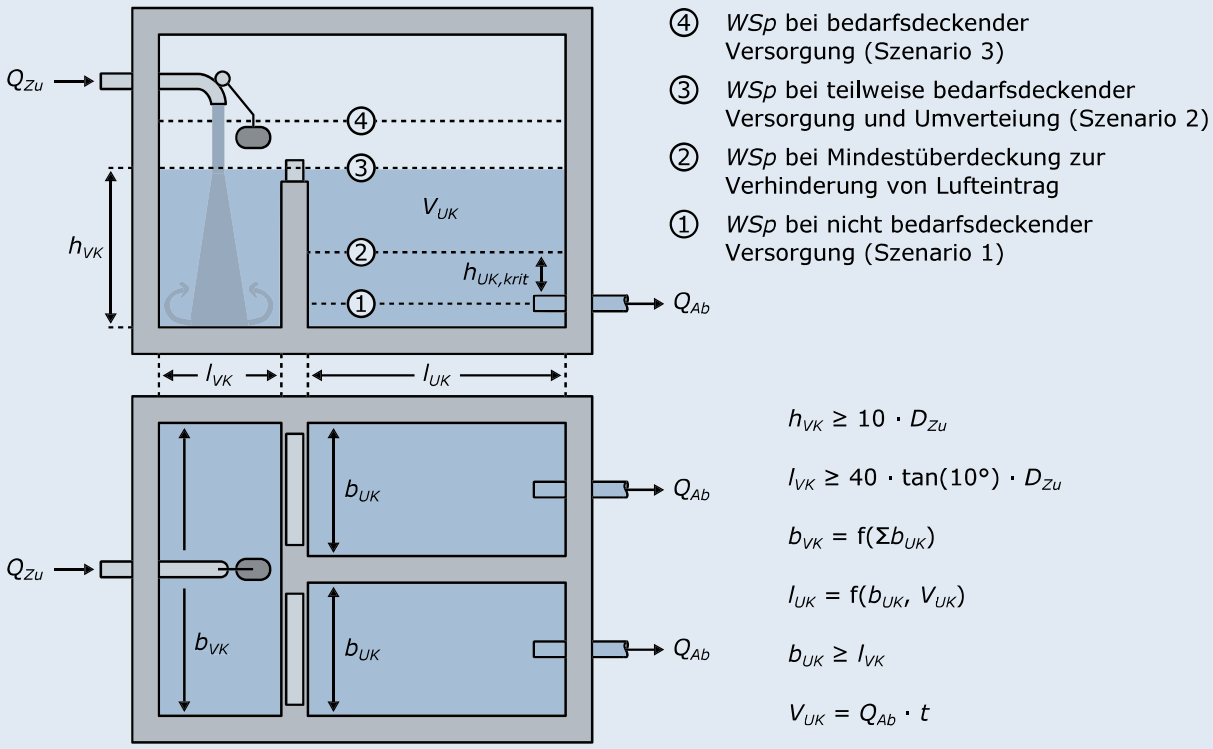

Bild 4: Schematische Schnitte eines Wasserverteilers mit Bemessungsgrößen

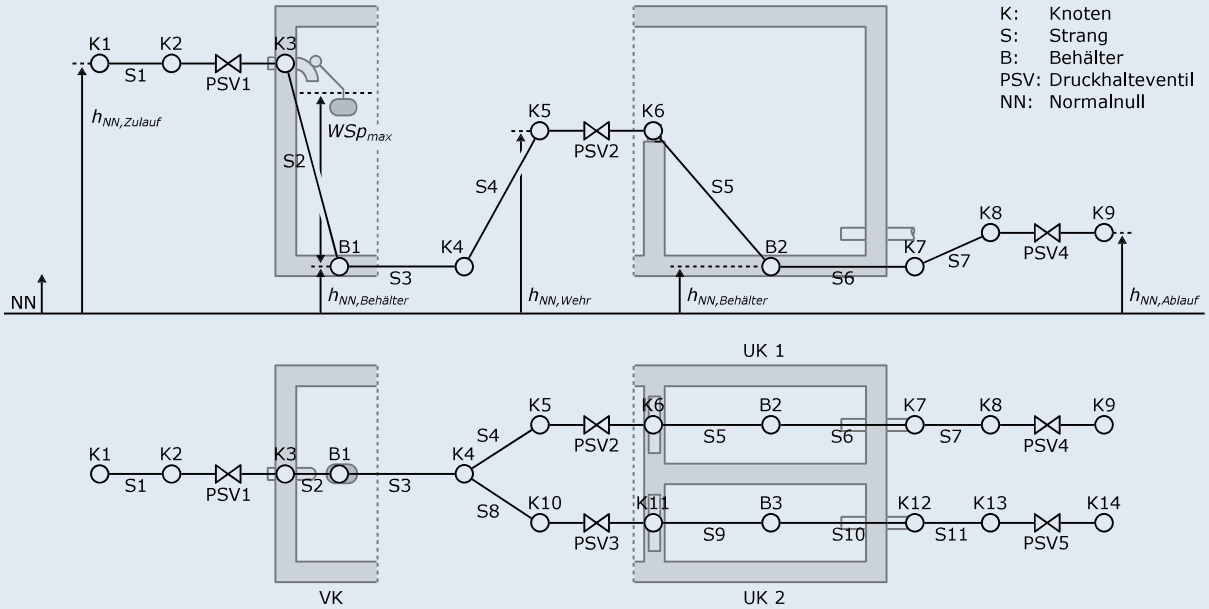

Bild 5: Schematische Darstellungen der Modellierung eines Wasserverteilers

D_{Zu} entsprechen, da die Aufteilung durch lokale Energieverluste modelliert wird, die sich in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit ergeben, siehe Gleichung rechts. Da Behälterzuläufe in Rohrnetzmodellen meist standardmäßig am Behälterboden abgebildet sind, würde sich der Zufluss in Abhängigkeit der Wasserspiegel ergeben. Der Zulauf oberhalb des Wasserspiegels wird daher durch ein Druckhalteventil auf Höhe des Zulaufs $h_{NN,Zulauf}$ modelliert. Das Schwimmerventil am Zufluss wird durch eine wasserstandsabhängige Regelung auf den maximalen Füllstand WSp_{max} umgesetzt.

Wehrüberfälle werden durch ein Druckhalteventil mit der geodätischen Höhe $h_{NN,Wehr}$ des Wehrs modelliert. Sobald der Wasserspiegel in der VK die Höhe des Wehres erreicht, ergibt sich ein ausreichendes Potential zum Öffnen des Druckhalteventils und es entsteht ein Zufluss in die UK. Füllt sich die UK auf die Wasserspiegelhöhe der VK, beträgt der Potentialunterschied Null und es findet kein Zufluss mehr statt. Bei einem bedarfsdeckenden Szenario mit einer gefüllten UK stellt sich automatisch ein dem Bedarf entsprechender Potentialunterschied ein. Das überschüssige Wasser sorgt dann für einen Anstieg des Wasserspiegels in der VK und somit für eine Erhöhung des Zuflusses in die übrigen UK.

Die Aufteilung des Wassers wird über induzierte Energieverluste in den Zulaufsträngen der UK modelliert (S4 und S8 in **Bild 5**). Durch die Angabe sehr kurzer Stranglängen, z. B. 0,1 m, und geringer Rauheiten, z. B. 0,1 mm, sind die kontinuierlichen Energieverluste vernachlässigbar klein. Da die Potentialhöhe H in der VK für alle Zulaufstränge der UK identisch ist, ergeben sich die Energieverluste und somit auch die Zuflüsse Q rein durch die lokalen Energieverluste $h_{vö} = \zeta \cdot v^2/(2g)$. Damit kann die Aufteilung des Zuflusses durch die Verlustbeiwerte ζ_n der Stränge bestimmt werden. Es lässt sich das folgende Proportionalitätsgesetz aufstellen, mit dem sich der Verlustbeiwert ζ_n in Abhängigkeit des Prozentsatzes p_n in % für jeden Strang berechnen lässt:

$$H = \zeta \cdot \frac{v^2}{2g} \rightarrow Q \sim \sqrt{\frac{1}{\zeta}} \rightarrow \zeta_n = \frac{1}{(p_n \cdot 0{,}01)^2}$$

Der Abfluss aus den UK wird durch ein Druckhalteventil mit der geodätischen Höhe $h_{NN,Ablauf}$ modelliert. Es stellt sich somit ein dem Zufluss in die UK entsprechender Potentialunterschied ein. Bei einem nicht bedarfsdeckenden Szenario entspricht der Abfluss damit immer dem Zufluss. Bei der Interpretation der Simulationsergebnisse muss berücksichtigt werden, dass alle Stränge als stets gefüllt angesehen werden. Der Befüllungs- und Entleerungsprozess des Leitungssystems kann somit nicht abgebildet werden. Hierdurch ergibt sich zwar eine zeitliche Verschiebung der Behälterfüllung, es entsteht jedoch kein Einfluss auf die Aufteilung und Umverteilung des Wassers.

In **Bild 6** ist die Simulation der Wasserspiegellagen für ein Minimalbeispiel, bestehend aus einem WV und zwei identischen WS dargestellt. Die Systemeinspeisung beträgt 5,0 l/s, die Entnahmen je 1,0 l/s. Die Aufteilung des Wassers erfolgt gemäß den Prozentsätzen $p_{1.1}$ = 40 % und $p_{1.2}$ = 60 %. Zu Beginn der Simulation sind alle Behälter leer und nur die VK füllt sich. Bei t_1 ist die VK gefüllt und Wasser fließt über die UK zu den WS. Gemäß der Aufteilung kommt es zu einer schnelleren Füllung von WS 1.2, der bei

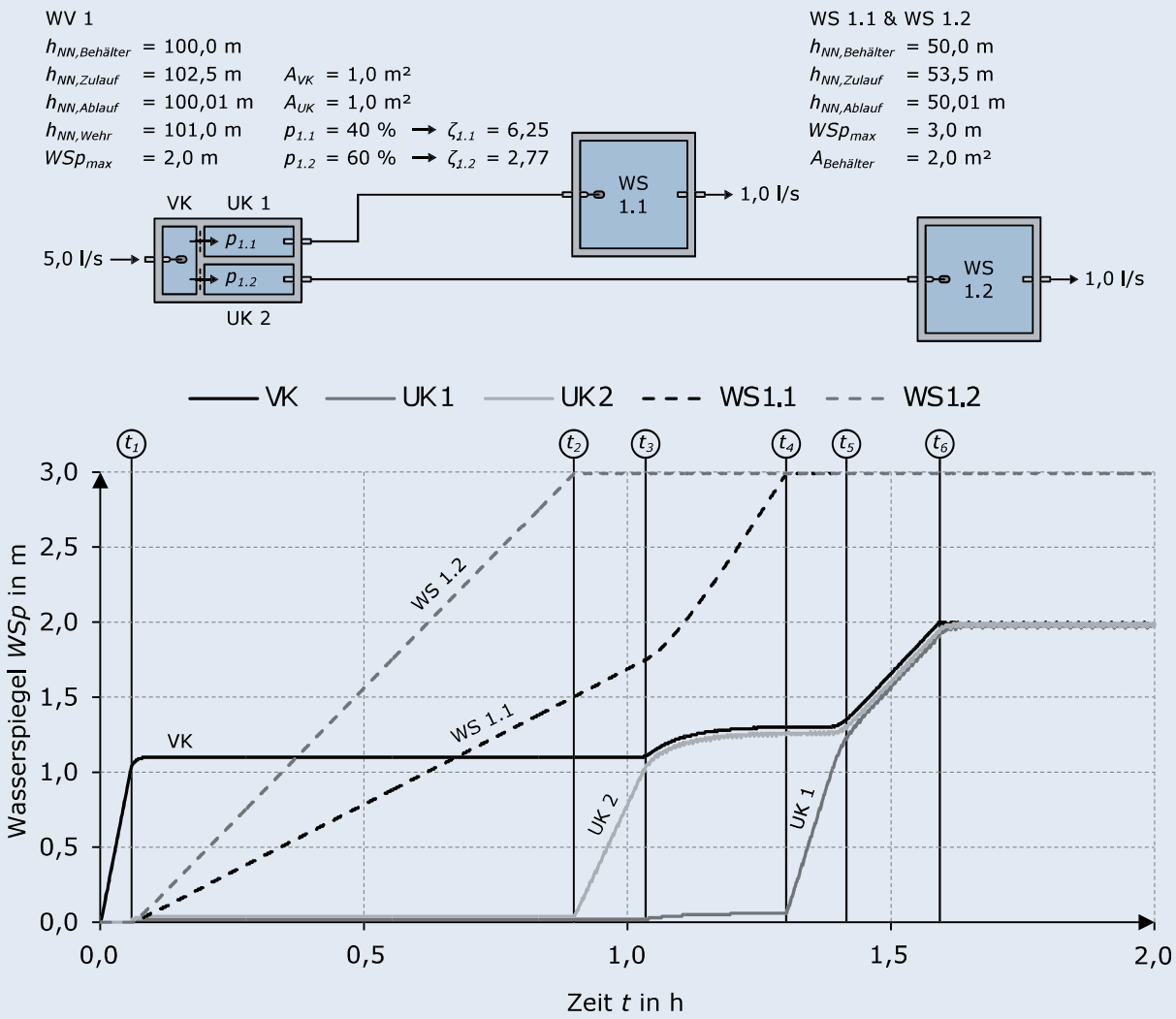

Bild 6: Beispielsystem (*oben*) und Simulationsergebnis (*unten*)

t_2 gefüllt ist. Gleichzeitig beginnt sich UK 2 durch den entstehenden Rückstau zu füllen. Bei t_3 ist UK 2 gefüllt und überschüssiges Wasser fließt über die VK zu WS 1.1. Es ergibt sich eine schnellere Füllung von WS 1.1, der bei t_4 gefüllt ist. Durch den Rückstau füllt sich UK 1 ebenfalls und ist bei t_5 gefüllt. Bei t_6 sind alle Kammern des Wasserverteilers gefüllt und der Zufluss wird durch sukzessives Öffnen und Schließen des Zuflusses auf den Bedarf gedrosselt. Eine genauere Beschreibung der Berechnungsergebnisse kann *Walter* [17] entnommen werden.

Beispielhafte Umsetzung

Die in den vorigen Abschnitten beschriebene technische Lösung wurde im Distrikt Dong Van in der Provinz Ha Giang im Norden Vietnams pilothaft umgesetzt. Die ausgeprägten Regen- und Trockenzeiten in der Region führen zu einem saisonal sehr ungleich verteilten Wasserdargebot. Der Jahresniederschlag liegt bei durchschnittlich ca. 1.360 mm, wobei ca. 84 % des Niederschlags in der Regenzeit während den Sommermonaten fällt [28, 29]. Das Versorgungsgebiet umfasst einen urbanen Bereich, die Distrikthauptstadt Dong Van mit derzeit ca. 4.300 Einwohnern, und einen ländlich geprägten Bereich mit ca. 2.500 Einwohnern, die in 13 kleinen Siedlungen mit etwa 40 bis 300 Einwohnern leben. Das Versorgungsgebiet ist ökonomisch und technisch vergleichsweise gering entwickelt; ca. 47 % der Einwohner Dong Vans und die gesamte ländliche Bevölkerung leben unterhalb der Armutsgrenze [30].

In Dong Van beziehen ca. 45 % der Einwohner ihr Wasser ausschließlich über ein intermittierend betriebenes, defizitäres zentrales Wasserversorgungssystem. Die Bevölkerung des ländlichen Bereichs sowie 55 % der Einwohner von Dong Van nutzen zur Wasserversorgung vorwiegend private, individuelle Lösungen [31, 32, 33]. *Zindler* und *Stolpe* [30] beziffern den einwohnerbezogenen Tagesverbrauch inkl. gewerblicher Wassernutzung in Dong Van auf 135 l/(E · d). Hierbei sind während der Regenzeit etwa

5 %, während der Trockenzeit etwa 35 % der Bevölkerung mit Wasserknappheit konfrontiert. Im ländlichen Bereich beträgt der einwohnerbezogenen Tagesverbrauch inkl. des Wasserverbrauchs für die Nutztierhaltung durchschnittlich ca. 20 l/(E · d). Der sehr geringe Wert kann auf die knappe Verfügbarkeit, die aufwendige und zeitintensive Beschaffung des Wassers - im Mittel werden für die Beschaffung von 20 l etwa 60 Minuten benötigt - und den sparsamen Umgang mit Wasser zurückgeführt werden. Während der Regenzeit sind etwa 45 %, während der Trockenzeit sogar 97 % der ländlichen Bevölkerung von Wasserknappheit betroffen.

Das neue Wasserverteilungssystem mit seinen Komponenten ist mit topografischem Bezug in **Bild 7** dargestellt. Eine neu implementierte, mit Wasserkraft betriebene Förderanlage pumpt Wasser aus dem Fluss Seo Ho über ca. 550 m Höhe zum zentralen WV 0 in der Siedlung Ma U. Je nachdem, ob der Abfluss im Seo Ho den Betrieb keiner, einer oder beider der zwei parallel aufgestellten Pumpen zulässt, beträgt die Förderleistung 0,0 l/s, ca. 9,5 l/s oder ca. 18,4 l/s, womit sich im Wasserverteilungssystem bedarfsdeckende oder nicht bedarfsdeckende Betriebsszenarien einstellen können [17, 34].

Die Systemeinspeisung in das Wasserverteilungssystem und die erste Aufteilung des Wassers auf die vier Versorgungsgebiete Ma U, Dong Van, Nord und West findet in WV 0 statt. Für die Siedlung Ma U sowie die Stadt Dong Van sind WS direkt an den WV 0 angeschlossen. Auf Grund der Höhendifferenz ist vor der Einspeisung in das Netz von Dong Van ein Druckunterbrecher angeordnet. Im Versorgungsgebiet West wird das Wasser zu einem WV geleitet und dort auf zwei WS aufgeteilt. Im Versorgungsgebiet Nord wird das Wasser über vier WV auf vier WS verteilt. Dabei teilen sich mitunter zwei beieinander liegende Siedlungen einen WS. Das schwankende Dargebot wird proportional zu den Einwohnern auf die einzelnen Versorgungseinheiten aufgeteilt.

Die Bemessungsdurchflüsse wurden, wie oben erläutert, für eine bedarfsdeckende Versorgungssituation mit gefüllten Systemkomponenten ermittelt. Um das Verteilungssystem möglichst einfach zu gestalten und den Aufwand für Planung, Bau und Betrieb gering zu halten, wurde für den zentralen und für alle übrigen WV je ein Bauwerkstyp mit gleichen Maßen entworfen. Für die Verteilerfunktion des zentralen WV 0 mit vier UK wäre ein Gesamtvolumen (zwischen Boden und Decke) von ca. 57 m³ bei einem Kammervolumen (zwischen Boden und Wehroberkante) der VK von ca. 8,8 m³ und der vier UK von jeweils ca. 7,2 m³ ausreichend. Davon abweichend wurde ein Gesamtvolumen von ca. 205 m³ gewählt, um eine zusätzliche Wasserspeicherung zu realisieren. Für alle übrigen WV sind hinsichtlich der Systemkonzeption nur zwei UK erforderlich. Das Kammervolumen einer UK beträgt dabei ca. 0,8 m³ und das der VK ca. 0,7 m³. Das Gesamtvolumen beträgt ca. 6 m³. **Bild 8** zeigt beispielhaft Komponenten des Versorgungsgebiets West: WV 0 (im Bau), WV 3 (im Bau) sowie WS 3.1. **Bild 9** zeigt die aus Stahl- und Betonelementen gefertigten Wehrüberfallsysteme im WV 0 während des Betriebs.

Das Rohrleitungssystem umfasst Nennweiten von DN 125 im Leitungsast zum Versorgungsgebiet Dong Van bis zu DN 25 bei der Anbindung der WS in den drei ländlichen Versorgungsgebieten. Unter Nutzung der ausgeprägten Höhenunterschiede im Versorgungsgebiet konnten die

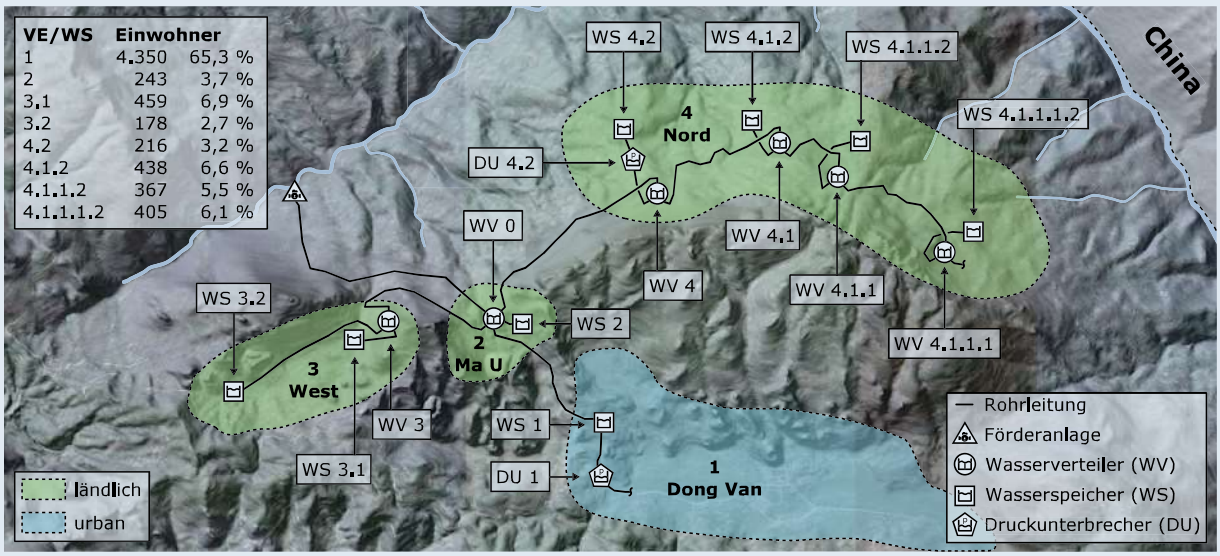

Bild 7: Topologie des Wasserverteilungssystems mit wesentlichen Komponenten und Aufteilung auf die Versorgungseinheiten (VE)

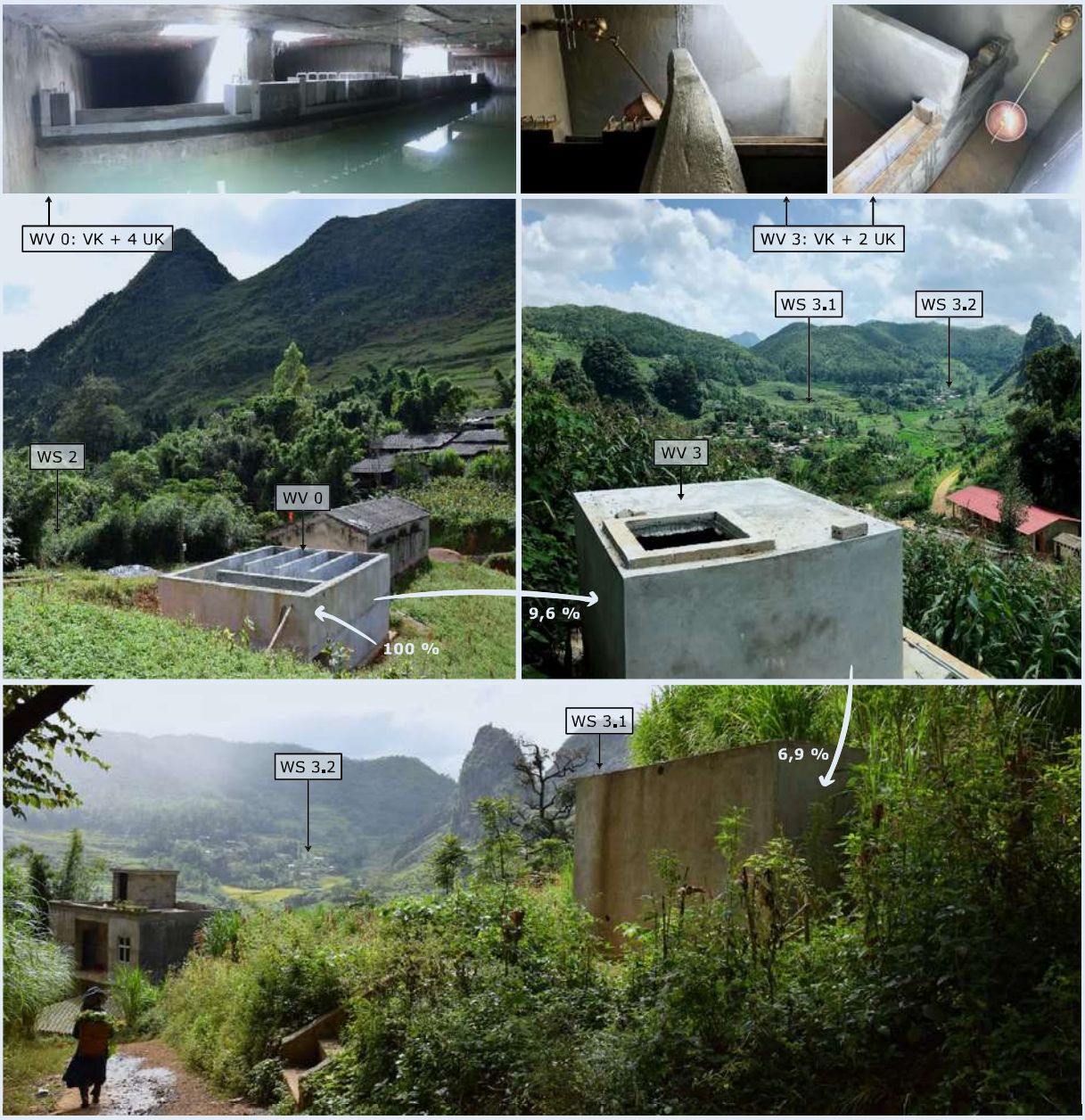

Bild 8: Wasserverteiler WV 0 (im Bau) mit Innenansicht (*links oben*), Wasserverteiler WV 3 (im Bau) mit Innenansichten (*rechts oben*) und Wasserspeicher WS 3.1 des Versorgungsgebiets West (*unten*).

konzeptionellen Anforderungen an die Höhenprofile der Leitungsabschnitte, ein starker Abfall bzw. Anstieg an den Leitungsabschnittsenden sowie ein ausgeprägter Tiefpunkt im Leitungsverlauf, umgesetzt werden.

Messungen im Betrieb des Pilotsystems ergaben beim Vergleich von geplanter zu tatsächlicher Wasseraufteilung Abweichungen von ca. 2 bis 3 %. Ursächlich dafür sind große Unterschiede der Wehrbreiten im zentralen WV, Ungenauigkeiten bei der Fertigung der Stahl- und Betonelemente sowie die relativ einfachen Methoden zur Ausrichtung und zum Einbau der Wehrüberfallsysteme. Die Abweichungen bewegen sich in einer vertretbaren Größenordnung, die gewünschte Funktionalität der WV ist gegeben. Die Prüfung der Auslegung des Rohrleitungssystems mit einem Vergleich rechnerischer und gemessener Durchflüsse ergab ebenfalls nur geringe Abweichungen. Beispielsweise ist im Abschnitt WV 0 bis WV 3 in einem Betriebsszenario der rechnerische Durchfluss 1,25 l/s und der gemessene 1,29 l/s. Die Selbstentlüftung des Systems wurde im Abschnitt WV 0 bis WS 1 über extreme Betriebsszenarien erfolgreich getestet. Für das Versorgungsgebiet West wurden Simu-

lationsergebnisse und gemessene Werte verglichen. Die Evaluierung ergab eine gute Übereinstimmung und damit Aussagekraft des Modellierungsansatzes, wie beispielhaft **Bild 10** zeigt.

Zusammenfassung

Die in diesem Artikel vorgestellte technische Lösung dient der planvollen Verteilung eines limitierten und schwankenden Wasserdargebots im Versorgungsgebiet, die nicht vom Verbraucherverhalten beeinflusst werden kann. Damit kann die gerechte Verteilung eines nicht bedarfsdeckenden Dargebots in Wassermangelgebieten umgesetzt werden.

Kern des Lösungsansatzes ist die Verschiebung der Wasserspeicherung hin zu den Verbrauchern und die Aufteilung der Systemeinspeisung im verästelten Verteilungssystem mit sogenannten Wasserverteilern. Durch die dezentrale Wasserspeicherung in Verbrauchernähe wird der Einfluss des Verbraucherverhaltens auf die Systemhydraulik begrenzt auf die Systemteile nach der Speicherung. Im Gegensatz zur herkömmlichen zentralen Wasserverteilung kann das Verbraucherverhalten somit die Aufteilung des Dargebots auf Versorgungseinheiten nicht beeinflussen. Für die Aufteilung des Dargebots ist an jeder Verzweigung des verästelten Leitungsnetzes ein Wasserverteiler angeordnet. Jeder Wasserverteiler umfasst eine Vorkammer und mehrere Unterkammern, die mit Wehrüberfällen variabler Breite mit der Vorkammer verbunden sind. Der Zufluss in die Vorkammer wird proportional zu den Wehrbreiten auf die Unterkammern und damit auf die Systemäste unterstrom aufgeteilt. Wird zur Verfügung stehendes Wasser in einem Systemast nicht oder nur teilweise abgenommen, wird das Wasser durch Rückstau im übrigen System verteilt. Fällt das verfügbare Dargebot zeitweise unter den Bedarf, läuft der Systemast leer.

Die Einstellung der Wasserverteilung über Wehrbreiten ist simpel und transparent. Ist ein System eingestellt, ist im Normalbetrieb für die Steuerung/Regelung kein Personal notwendig. Die anteilige Wasserverteilung auf die Versorgungseinheiten erfolgt selbsttätig. Der Wartungsaufwand ist auf Grund wenig komplexer Bauteile, simpler Konstruktionen und einfacher Armaturen (Schwimmerventile, Absperrarmaturen) gering.

Eine wesentliche Voraussetzung und damit Anwendungsgrenze für die Lösung sind ausreichende Höhenunterschiede im Versorgungsgebiet, die einen gravitären Wassertransport und Leitungsführungen entsprechend der Auslegungskriterien ermöglichen. Die Wasserressourcen müssen dabei jedoch nicht zwingend höher als die Verbraucher liegen. Zur Nutzung räumlich verteilter Wasserressourcen kann eine zusätzliche Systemeinspeisung auch an tiefer gelegenen Wasserverteilern erfolgen.

Da die Systemkonzeption das temporäre Leerlaufen von Teilen des Systems beinhaltet, sind Beeinträchtigungen der eingespeisten Wasserqualität bei der Verteilung nicht auszuschließen. Die Beeinträchtigung ist allerdings vermutlich geringer als bei einem „klassischen" intermittierenden System, weil die Möglichkeit von Unterdrücken ausgeschlossen ist und damit das Potential zu Einträgen in das System reduziert wird. Diese Einschränkung wird aber auch bewusst toleriert, zu Gunsten der planvollen Wasseraufteilung, des robusten und wartungsarmen Systemaufbaus und des selbsttätigen Betriebs. Aspekte, die für die nachhaltige Umsetzung einer leitungsgebundenen Wasserverteilung in den anvisierten Anwendungsfällen entscheidend sind. Zudem ist ei-

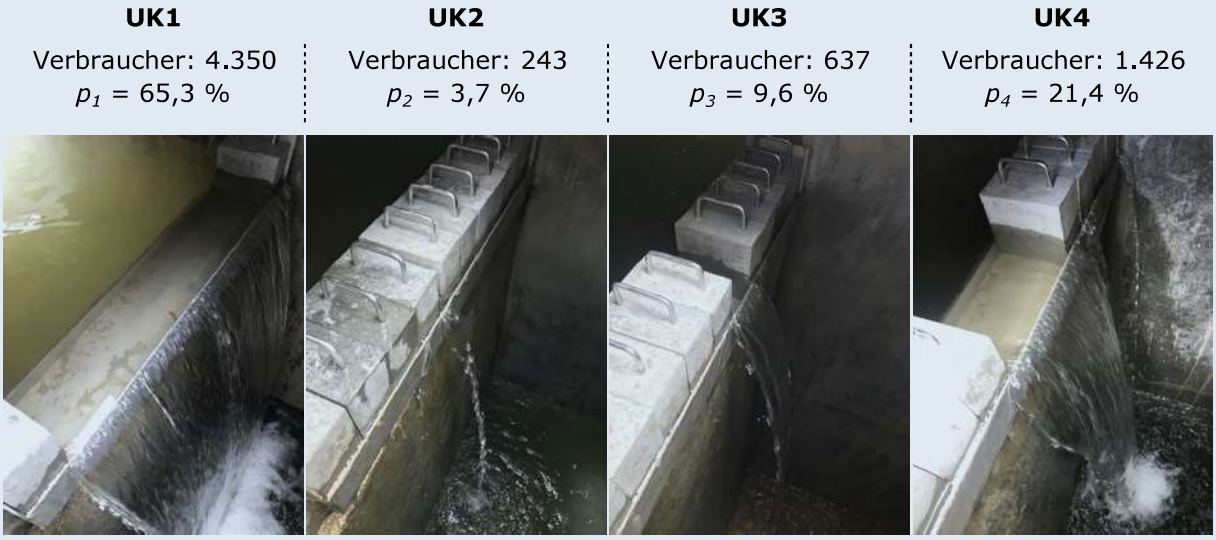

Bild 9: Wehrüberfallsystem aus nichtrostendem Stahl mit Betonelementen zur flexiblen Einstellung der Wehrbreite im Wasserverteiler WV 0

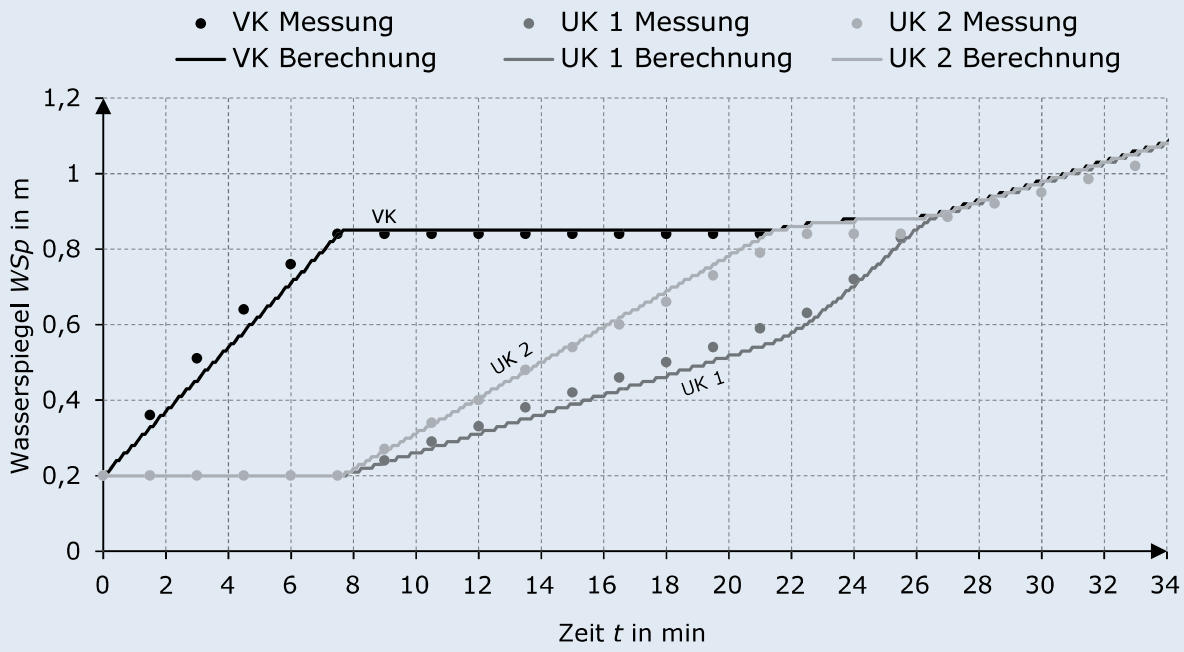

Bild 10: Messung (Punkte) und Berechnung (Linien) der Wasserspiegel im Wasserverteiler WV 3 bei geschlossenen Ablaufleitungen.

ne Ergänzung des Verteilungssystems durch semi-zentrale oder dezentrale Lösungen zur Wasseraufbereitung möglich. Mit der theoretischen Planung und der pilothaften Umsetzung im Versorgungsgebiet Dong Van konnte gezeigt werden, dass mit der hier skizzierten Lösung das Ziel einer planvollen, gerechten Verteilung eines schwankenden und limitierten Dargebots mit einem robusten System mit geringem Wartungs- und Betriebsaufwand erreicht werden kann.

Danksagung

Die vorgestellte Arbeit wurde im Rahmen der Projekte KaWaTech (FKZ: 02WCL1291A) und KaWaTech Solutions (FKZ: 02WCL1415) der Fördermaßnahme CLIENT des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und entstand weitgehend während der Tätigkeit der Autoren am Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung.

Literatur

[1] UNICEF und WHO (2015). Progress on sanitation and drinking water – 2015 update and MDG assessment, Bericht, United Nations Children's Fund (UNICEF) und World Health Organization (WHO), Genf. ISBN 978 92 4 1509145.

[2] *Zelenika, M.* (1991). Application of Appropriate Technology for Rural Water Supply, Rudarsko-geolosko-naftni zbornik, 3(1991), 85-88.

[3] *Sutton, S.* (2004). Self Supply: A Fresh Approach to Water for Rural Populations, Field note, Water and Sanitation Program, Nairobi und The Rural Water Supply Network, St. Gallen.

[4] *Mara, D.* und *Evans, B.* (2011). Sanitation and Water Supply in Low-income Countries, Ventus Publishing ApS, Frederiksberg. ISBN 978-87-7681-866-1.

[5] *Aleixo, B., Rezende, S., Pena, J. L., Zapata, G.* und *Heller, L.* (2016). Human Right in Perspective: Inequalities in Access to Water in a Rural Community of the Brazilian Northeast, Ambiente & Sociedade, 19(1), 63-84. DOI: 10.1590/1809-4422asoc150125r1v1912016.

[6] *Ohwo, O.* (2019). Dimensions of Inequality in Urban and Rural Water, Sanitation and Hygiene Services in Sub-Saharan Africa, European Scientific Journal, 15(8), 144-162. DOI: 10.19044/esj.2019.v15n8p144.

[7] *Klingel, P.* (2013). Die Problematik der intermittierenden Wasserverteilung, gwf-Wasser|Abwasser, 154 (1), 94-101.

[8] *Ameyaw, E. E., Memon, F. A.* und *Bicik, J.* (2013). Improving equity in intermittent water supply systems, Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA, 62(8), 552-562. DOI: 10.2166/aqua.2013.065.

[9] *Kumpel, E.* und *Nelson, K. L.* (2016). Intermittent Water Supply: Prevalence, Practice, and Microbial Water Quality, Environmental Science and Technology, 50(2), 542-553. DOI: 10.1021/acs.est.5b03973.

[10] *Simukonda, K., Farmani, R.* und *Butler, D.* (2018). Intermittent water supply systems: causal factors, problems and solution options. Urban Water Journal, 15(5), 488-500. DOI: 10.1080/1573062X.2018.1483522.

[11] *Perrault, C.* (1684). Les dix Livres d'architecture de Vitruve, Jean-Baptiste Coignard, Paris.

[12] *Callebat, L.* (1973). Vitruve - De l'architecture - Livre VIII, Les Belles Lettres, Paris. ISBN 978-2251013077.

[13] *de Montauzan, C. G.* (1908). Les Aqueducs antiques de Lyon: étude comparée d'archéologie romaine, Ernest Leroux, Paris.

[14] *Stübinger, O.* (1909). Die römischen Wasserleitungen von Nîmes und Arles, In: Zeitschrift für Geschichte der Architektur, Beiheft 3, Winter, Heidelberg, 242-303.

[15] *Kretschmer, F.* (1983). Bilddokumente römischer Technik, 5. Aufl., VDI-Verlag, Düsseldorf. ISBN 978-3184005986.

[16] *Ohlig, C.* (2004). Wasserbauten im Königreich Urartu und weitere Beiträge zur Hydrotechnik in der Antike, Schriften der Deutschen Wasserhistorischen Gesellschaft (DWhG), Band 5, Books on Demand, Norderstedt. ISBN 9783833415029.

[17] *Walter, D.* (2020). Wasserverteilungssysteme zur Umsetzung einer gerechten Verteilung eines limitierten Wasserdargebots, Dissertation, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. DOI: 10.5445/IR/1000117534.

[18] *van den Bosch, B. E., Snellen, W. B., Brouwer, C.* und *Hatcho, N.* (1993). Structures for water control and distribution, Irrigation Water Management, Training manual No. 8, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rom.

[19] DVGW W 400-1 (A) (2015). Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV); Teil 1: Planung, DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., Bonn.

[20] DVGW W 410 (A) (2008).Wasserbedarf – Kennwerte und Einflussgrößen, DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., Bonn.

[21] *Kalinske, A. A.* und *Robertson, J. M.* (1943). Entrainment of Air in Flowing Water: A Symposium: Closed Conduit Flow, Transactions of the American Society of Civil Engineers ASCE, 108(1), 1435-1447.

[22] *Aigner, D.* (2003). Lufttransport in (wassergefüllten) Rohrleitungen, Wasserbauliche Mitteilungen, Bd. 26, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, Dresden.

[23] *Horlacher, H. B.* und *Helbig, U.* (2018). Rohrleitungen 2: Einsatz, Verlegung, Berechnung, Rehabilitation, Springer, Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-50354-6.

[24] *Schlichting, H.* und *Gersten, K.* (2006). Grenzschicht-Theorie, Springer, Berlin Heidelberg.

[25] *Knauss, J.* (1987). Swirling flow problems at intakes, hydraulic structures design manual, Balkema Publishers, Rotterdam.

[26] *Rossman, L., Woo, H., Tryby, M., Shang, F., Janke, R.* und *Haxton, T.* (2020). EPANET 2.2 User Manual. Bericht EPA/600/R-20/133, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. URL: https://www.epa.gov/water-research/epanet.

[27] *Klingel, P.* (2018). Modellierung von Wasserverteilungssystemen, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN 978-3-658-21269-8.

[28] NCHMF (2017). Vietnam National Centre for Hydro-Meteorological Forecastings (NCHMF), Hanoi.

[29] Climate-Data.org (2020). Klima Dong Van (Vietnam), Daten und Graphen zum Klima und Wetter für Dong Van. Online (abgerufen am 05.07.2020). URL: https://de.climate-data.org/asien/vietnam/ha-giang-province/%C4%91ong-van-974322/

[30] *Zindler, B.* und *Stolpe, H.* (2018). FuE-Verbundvorhaben KaWaTech: Vietnamesisch-Deutsche Kooperation zur Entwicklung nachhaltiger Technologien für die Karstwasserwirtschaft, Teilprojekt 7, Ländliche Entwicklung, Ressourcenschutz und soziokulturelle Aspekte, Bericht, Umwelttechnik und Ökologie im Bauwesen, Ruhr-Universität Bochum, Bochum.

[31] *Klingel, P., Oberle, P.* und *Nestmann, F.* (2016). Innovative technologies for the sustainable water supply in a rural karst area of Vietnam, Water Solutions, 2(2016), 38-43.

[32] *Ender, A. F.* (2019). Evaluation of highly variable water quality as basis for a sustainable water supply in the Dong Van karst region, Northern Vietnam, Dissertation, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. DOI: 10.5445/IR/1000083139.

[33] *Pham, T. T.* (2019). Technical Performance Indicators for Small-sized Water Supply Networks - Case Study in Dong Van City, Vietnam, Dissertation, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. DOI: 10.5445/IR/1000092685.

[34] *Oberle, P., Stoffel, D., Walter, D., Breiner, R., Vogel, M., Müller, H. S.* und *Nestmann, F.* (2017). Innovative Technologien zur Wasserförderung und -verteilung in Gebirgsregionen, Bautechnik, 94(8), 514-525. DOI:10.1002/bate.201700066.

Autoren

Dr.-Ing. David Walter (Korrespondenzautor)
david-walter@gmx.de
Freiberuflicher Ingenieur
für Wasserversorgung
Rudolfstr. 8
76131 Karlsruhr

Dr.-Ing. Philipp Klingel
philipp.klingel@netzservice-swka.de
Stadtwerke Karlsruhe Netzservice GmbH
Daxlander Straße 72
76127 Karlsruhe

+++ gwf-wasser.de +++ gwf-wasser.de +++ gwf-wasser.de +++ gwf-wasser.de +++ gwf-wasser.de +++