

Energetische Optimierung der Wasserversorgung: Verteilung, Speicherung und Rückgewinnung

Die Betreiber von Trinkwassernetzen sind sowohl aus Kostensicht als auch aus ökologischen Erwägungen bestrebt, den Energiebedarf der Wasserverteilung zu minimieren. Darüber hinaus könnten im Zuge der Energiewende mit einem weiterhin steigenden Anteil volatiler regenerativer Stromerzeugung die Trinkwassernetze mit ihren Behältern zukünftig gezielt zum Lastmanagement eingesetzt werden.

Aufgrund einer Vielzahl versorgungstechnischer sowie wirtschaftlicher Randbedingungen und der damit einhergehenden Komplexität sind die energetischen Potentiale der Trinkwassernetze in der Praxis bisher nicht ausgeschöpft. Im Rahmen des Forschungsvorhabens ENERWA werden daher Simulations- und Optimierungsansätze entwickelt, mit dem Ziel, den Energiebedarf der Trinkwasserverteilung zu reduzieren und Lastverschiebungspotentiale zu nutzen, um die Integration der fluktuierenden Stromerzeugung aus Photovoltaik und Windkraft zu kompensieren.

Ausgangssituation und Zielsetzung

Für die Wasserversorgungsunternehmen (WVU) stellen die Energiekosten häufig einen der größten Kostenblöcke dar, weshalb diese bestrebt sind, ihren Energiebedarf möglichst zu reduzieren. Dies kann durch Netzmaßnahmen, eine Anpassung der Betriebsweise sowie Energierückgewinnungsanlagen (Turbinen) erfolgen.

Welches Potential für die Einsparung, Speicherung und Rückgewinnung elektrischer Energie in den Trinkwassernetzen besteht, wird im Rahmen des Forschungsvorhabens ENERWA untersucht. Die RZVN Wehr GmbH entwickelt hierzu neue Simulations- und Optimierungsverfahren, die eine höhere Energieeffizienz der Trinkwasserverteilung sowie eine Anpassung der Betriebsweise an die zukünftig zunehmend volatilen Strompreise ermöglichen.

Die Optimierungsansätze umfassen unter anderem die Ermittlung:

- a) der energetisch optimalen Druckzonengestaltung
- b) der energetisch und wirtschaftlich optimalen Kombination aus Speichervolumen, Nennweitendimensionierung und Pumpaufwand
- c) der Potentiale zur Lastverschiebung und Energierückgewinnung (zur Minimierung der Energiekosten)

Im vorliegenden Artikel wird der Ansatz a) vorgestellt, wobei eine energetische Gesamtoptimierung in der Praxis alle Ansätze einbeziehen muss.

Problemstellung

Zur Bestimmung des für die Trinkwasserverteilung mindestens notwendigen Energiebedarfs kann dieser gedanklich in zwei Teile getrennt werden:

- » den unvermeidbaren Energiebedarf, welcher primär auf die Überwindung der geodätischen Höhendifferenzen zzgl. des benötigten Lieferdrucks je Obergeschoss und sekundär auf die der strömungsbedingten Druckverluste zurückzuführen ist

- » den vermeidbaren Energiebedarf, der dem Drucküberschuss bei den Wasserabnehmern entspricht (Differenz zwischen benötigtem und geliefertem Wasserdruck) und sich in der Regel aus der bestehenden Druckzonengestaltung ergibt.

Der gelieferte Drucküberschuss wird oft auch als unvermeidbar betrachtet, solange die Druckzonengestaltung als eine fixe Randbedingung des Versorgungssystems gilt. Dieser Drucküberschuss gehört jedoch nicht zur Versorgungsaufgabe.

In historisch gewachsenen Netzen wurden Tief- bzw. Hochzonen vor allem zur Einhaltung der maximal zulässigen Rohrdrücke bzw. des Mindestdrucks bei den Abnehmern eingeführt. Aus Gründen der Betriebssicherheit und der Einsparung teurer Netzkomponenten (Wasserbehälter, Pumpen, Armaturen) wird angestrebt, die Anzahl der Druckzonen möglichst gering zu halten. Daher ist in der Praxis zu beobachten, dass im Istzustand bei vielen Abnehmern der Wasserdruck deutlich über dem benötigten Lieferdruck liegt. In diesem Forschungsprojekt werden die Energiekosten der Druckzonengestaltung nun quantitativ ermittelt. Ziel ist es, herauszufinden, ob und wie sich diese theoretische Energieeinsparpotentiale an der Schnittstelle zu den Abnehmern erschließen lassen und, ob eine Optimierung der Druckzonenstrukturen möglich ist.

Zuerst wird als einleitendes Gedankenexperiment der extreme Grenzfall eines rein energetisch ausgelegten Netzes genommen:

- a) flächendeckend wird nur ein Mindestnetzdruck (von z. B. 1 bar) gewährleistet; und
- b) bei jedem höher gelegenen Abnehmer wird der notwendige Druck dezentral¹ erhöht.

¹ o. B. d. A wird die dezentrale Pumpenergie z. B. vom Netzbetreiber bezahlt. Es geht nicht darum, Pumpenergiekosten auf Abnehmer zu verlegen, sondern die Pumpenergie „physikalisch“ zu senken.

Kosten (Barwert über 30 Jahre)

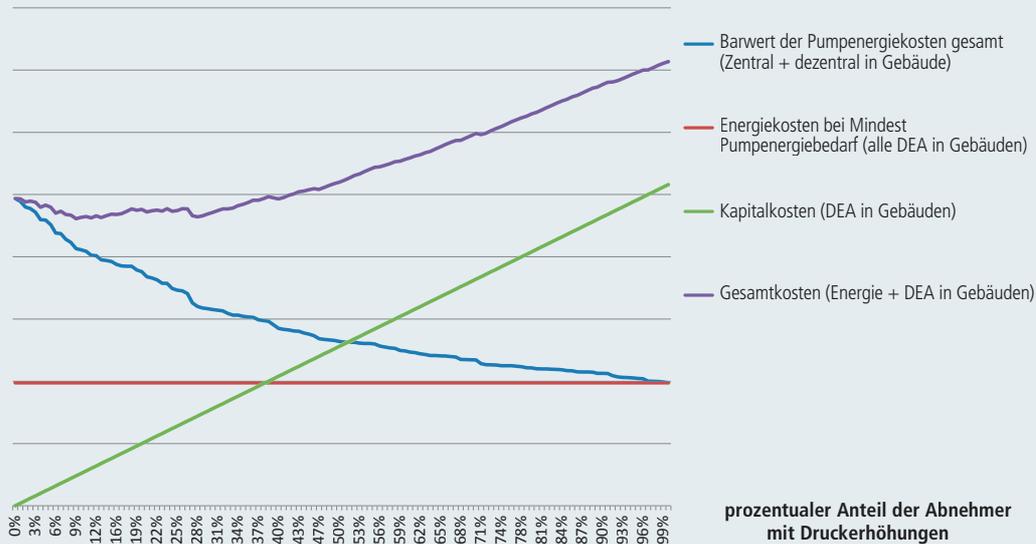


Bild 1a: Schematische Gesamtkostenbetrachtung (Pumpenergie und Investition, DEA in Gebäuden) je Anzahl an dezentralen Druckerhöhungen

Diese Konfiguration führt unter allen möglichen Konfigurationen offensichtlich zu der geringsten hydraulischen Pumpleistung² des Gesamtsystems (zentral und dezentral). Die netto elektrische Leistungs-Einsparung gegenüber dem Istzustand beträgt:

$$\Delta E_{net_spar,el} = \Delta E_{z,el} - \sum_i \Delta E_{d,i,el} = \rho \cdot g \cdot \left(\frac{\Delta H_z \cdot Q_z}{\eta_z} - \sum_i \frac{\Delta H_{d,i} \cdot Q_{d,i}}{\eta_{d,i}} \right) \quad (1)$$

mit den Indizes:

- z: zentral,
- d: dezentral,
- net_spar = netto Einsparung,
- el: elektrisch (also mit Berücksichtigung der Wirkungsgrade),
- i: Summationsindex der Wasserkunden,

und mit den Größen Q (Förderdurchfluss [m³/s]), ΔH (Änderung der Förderhöhe [m]), η (Wirkungsgrad der DEA³ (Pumpe + Antrieb) [-]) und E (elektrische Leistung [W]). Diese Konfiguration mit Druckerhöhung bei jedem Kunden

2 Die hydraulische bzw. elektrische Leistung ist hier vor bzw. nach der Berücksichtigung der Wirkungsgrade. Abgesehen von den schlechteren Wirkungsgraden bei den kleineren dezentralen Pumpen (η_{d,i} < η_z) stellt diese Konfiguration beinahe auch die geringste elektrische Gesamtleistung dar.
3 DEA = Druckerhöhungsanlage

ist in der Praxis unrealistisch, da die Anschaffungskosten aller Druckerhöhungen in Summe deutlich höher als die eingesparten Energiekosten wären.

In **Bild 1a** sind Energie- und Kapitalkosten in Abhängigkeit der Anzahl von dezentralen Druckerhöhungen schematisch veranschaulicht. Der Istzustand entspricht dem Fall mit 0 % DEA und das Gedankenexperiment dem Fall mit 100 % DEA.

In **Bild 1b** werden die Investitionskosten der DEA nicht in einzelnen Gebäuden, sondern im Netz (durch Bildung von Hochzonen) berechnet. Durch die Gruppierung der Abnehmer sind weniger Druckerhöhungsanlagen notwendig, wodurch die die Investitionskosten deutlich sinken. Wenn die vorhandene Hochzone für die Anbindung der Abnehmer nicht ausreicht, wird eine neue Hochzone mit einer eigenen DEA hinzugefügt (Sprung der Kapitalkosten, grüne Linie). Es wird erwartet, dass die dezentrale Pumpenergie geringfügig höher ausfällt (siehe Erklärungen später).

Aus den vorangegangenen Betrachtungen geht hervor, dass sich zwischen dem energie-intensiven Istzustand und dem kapitalintensiven Extremfall noch viele denkbare „gemäßigte Konfigurationen“ befinden, in denen nicht alle Abnehmer sondern nur eine überschaubare Teilmenge mit den höchstgelegenen Abnehmern in einer Hochzone verbunden werden. Gesucht werden Konfigurationen, in denen die Anschaffungskosten der neuen Druckerhöhung(en) im Netz geringer sind als die durch zentrale Druckabsenkung erreichte Energiekosteneinsparung. Diese optimalen Kom-

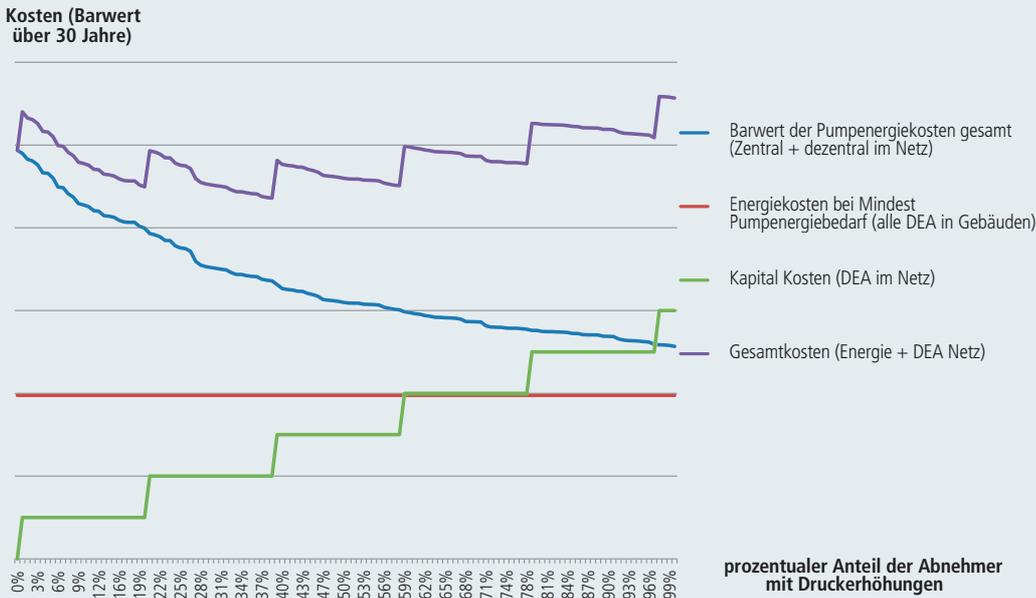


Bild 1b: Schematische Gesamtkostenbetrachtung (Pumpenergie und Investition, DEA im Netz) durch Bildung von Hochzonen

binationen sollen mit der folgenden Methodik ermittelt werden.

Methodik der Druckzonengestaltung

Hierzu werden – zunächst ausgehend von bestehenden Druckzonen – neue Hochzonen durch iterative netztechnische Anbindung ihrer höchst gelegenen Kunden gebildet.

Mit den summierten dezentralen Förderdurchflüssen ($Q_d = \sum_i Q_{d,i}$ [m³/s]) für die Hochzonen lässt sich aus Gleichung (1) unter Berücksichtigung⁴, dass $\forall i, \Delta H_{d,i} \leq \Delta H_z$ folgende Unterschranke ableiten:

$$\Delta E_{net_spar,el} \geq \rho \cdot g \cdot \Delta H_z \cdot \left(\frac{Q_z}{\eta_z} - \frac{Q_d}{\eta_d} \right) \quad (2)$$

Aus $Q_z/Q_d \gg 1$ (typische Größenordnung 5 bis 50) folgt, dass die netto eingesparte Pumpleistung $\Delta E_{net_spar,el}$ in der Regel immer positiv ist. Das Optimum muss jedoch iterativ ermittelt werden, da bei jedem Hinzufügen eines hoch gelegenen Kunden in die Hochzone folgende gegenseitige Effekte auftreten:

- » a) das zentrale Druckniveau kann weiter gesenkt werden (→ Zunahme der eingesparten Förderhöhe ΔH_z und daher –Leistung $\Delta E_{z,el}$);

⁴ Dabei werden die notwendigen druckvernichtenden Armaturen innerhalb der DEA-Anlagen zunächst vernachlässigt. Der wirkliche dezentrale Energieverbrauch kann geringfügig höher ausfallen. Die Energiebilanz dürfte jedoch davon nicht wesentlich betroffen sein.

- » b) die Fördermenge der Hochzone Q_d wächst um die Abnahmemengen:

- » des neuen hoch gelegenen Abnehmers,
- » aber auch aller Abnehmer, die aus Gründen des topologischen Zusammenhangs der Druckzonen in die Hochzone eingebunden werden müssen, obwohl sie nicht der Absenkung des zentralen Druckniveaus dienen (diejenigen auf dem Weg zur Anbindung des neuen Abnehmers an die Hochzone und sonstige durch diese Anbindung neu isoliert gewordene Kunden)

(→ Zunahme der dezentralen Pumpenergie)

Diese gegenseitigen Effekte wurden bei den unterschiedlichen Belastungsstufen (Spitzen-, Normal- und Nachtbedarf) für reale Netze ausgewertet. In den Ergebnissen der untersuchten Netze konnten mit zunehmender Größe der Hochzone drei Phasen beobachtet werden:

- » Phase 1: Zunahme von $\Delta E_{net_spar,el}$, vorwiegend dank Zunahme von ΔH_z
- » Phase 2: sukzessive Zu- oder Abnahme von $\Delta E_{net_spar,el}$, je nachdem ob Effekt a (ΔH_z) oder b (Q_d) überwiegt
- » Phase 3: Abnahme von $\Delta E_{net_spar,el}$, vorwiegend wegen Zunahme von Q_d .

Die Vergrößerung der Hochzonen wird beendet, wenn keine zusammenhängende Tiefzone mehr gebildet werden kann oder hydraulische Grenzwerte verletzt werden. Das Optimum bezüglich des Energiebedarfs wird jedoch in der Regel bereits einige Iterationsschritte vor dem Ende (in der Phase 2) gefunden.



Bild 2a: Ursprüngliche Zone (blaue Leitungen) und Rechteck zur Lagerdarstellung des Bildes 2b

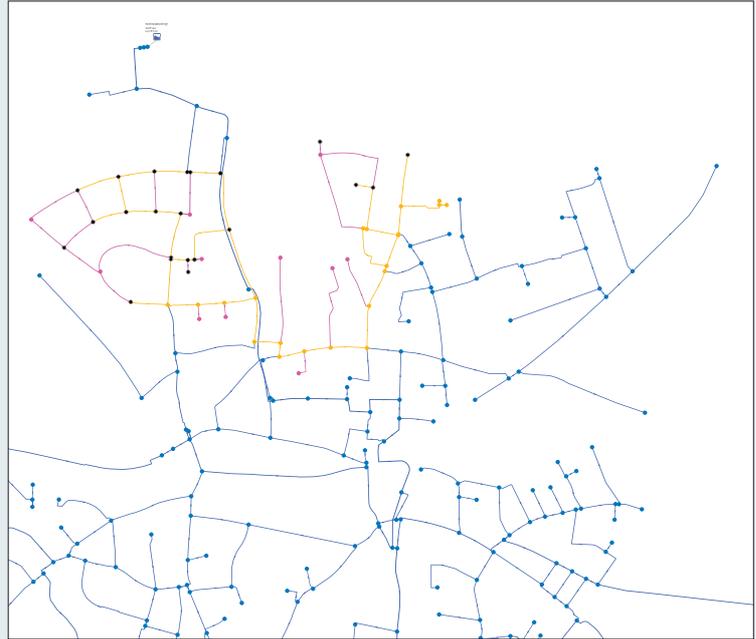


Bild 2b: Schrittweise Erweiterung einer Hochzone zur Anbindung der höchsten Kunden (schwarze Knoten) durch Anbindungsleitungen (gelb) und extra Leitungen für den Druckzonenzusammenhang (rosa)

Ergebnisse der automatisierten Ermittlung von Hochzonen

Bild 2a zeigt einen Netzausschnitt aus einer bestehenden Druckzone (blau) mit 205 m³/h Spitzenabgabe und 3 bar Einspeisedruck. Die Höhenlage der Abnehmer entspricht der geodätischen Höhe zzgl. der bekannten Gebäudehöhen.

Durch Bildung einer Hochzone (hier gelbe und rosa Leitungen) mit 11 m³/h Spitzenabgabe lässt sich in Bild 2b der Einspeisedruck bei Spitzenbedarf um 1,1 bar auf 1,9 bar senken (Einsparung: 8,2 kW).

Gemittelt über die Belastungsstufen Spitzen-, Normal- und Nachtbedarf betragen die eingesparten zentralen Energiekosten über eine Lebensdauer von 30 Jahren (mit der Barwertmethode⁵) 186.000 Euro. Dezentral werden für die Druckerhöhung im Netz 15.000 Euro Energiekosten benötigt.

Die eingesparten Energiekosten von 171.000 Euro müssen den Investitions- und Instandhaltungskosten der neu zu erstellenden Druckerhöhungsanlage gegenübergestellt werden. Da sich die Kosten für die Installation einer DEA je nach Grundstückskosten, hydraulischen Schutzmaßnahmen, etc. erheblich unterscheiden können, sind diese im Rahmen einer Einzelfallbetrachtung unter Einbeziehung des Herstellers und des Netzbetreibers zu ermitteln.

Bild 3 zeigt die Ermittlung einer Unterteilung mit zwei Hochzonen. Dabei können zusätzliche hochgelegene

Abnehmer die Tiefzone verlassen, da die netztechnische Verbindung der zwei unabhängigen Hochzonen leichter zu erfüllen ist. Gegenüber den ersparten Energiekosten von 220.000 Euro stehen jetzt die Anschaffungs- und Instandhaltungskosten für die beiden Druckerhöhungen im Netz.

Anschließend muss eine Detailuntersuchung mit den Netzbetreibern die Anschaffungskosten der benötigten DEA bestimmen, um zwischen den Konfigurationen mit unterschiedlicher Anzahl an Hochzonen die günstigste Variante zu wählen. Mit dem hier entwickelten Verfahren zur automatischen topologischen Vervollständigung der Hochzonen bei jedem neuen Kunden lassen sich mehrere Konfigurationen von Druckzonenunterteilung (zukünftig auch mit Kaskadierung der neuen Druckzonen, und/oder Bildung von Tiefzonen) untersuchen.

Festzuhalten ist, dass besonders bei Ist-Druckzonen mit großen Fördermengen ein signifikanter Anteil der zentralen Pumpenergie durch eine alternative Druckzonengestaltung eingespart werden kann. Die Bildung zusätzlicher Hochzonen ist jedoch nicht bei allen Wassernetzen sinnvoll.

Wirtschaftlich ist die Bildung von Druckzonen vor allem dann, wenn

- a) eine hohe gesamte Netzbelastung mit großer zentraler Fördermenge Q_z und
- b) eine geringe Streuung in der Höhenlageverteilung der höchstgelegenen Abnehmer vorliegt.

⁵ Hier mit einem Zinssatz von 3 % / a und Strompreis von 0,25 EUR/kWh.

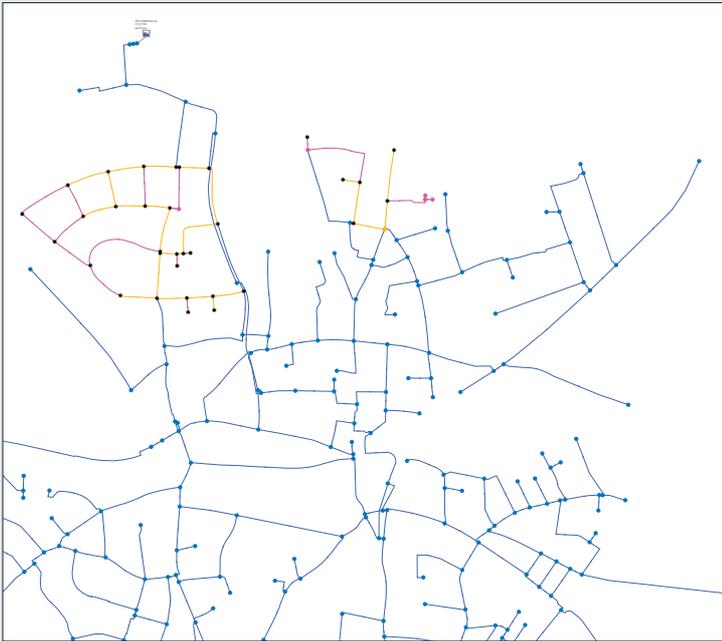


Bild 3: Lösung mit zwei unabhängigen Hochzonen

Hierfür sind folgende Gründe zu nennen:

Zu a) Eine hohe Netzbelastung führt zu absolut hohen Energieeinsparungen. Diese sind notwendig, um die hohen Fixkosten der zusätzlichen Druckerhöhungsanlagen zu kompensieren.
 Zu b) Wenn der nächste hochgelegene Abnehmer dagegen netztechnisch weit entfernt von der Hochzone liegt, bedeutet seine Anbindung an die Hochzone eine unzumutbare Zunahme der dezentralen Fördermenge Q_d oder der Bildung einer weiteren Hochzone mit entsprechend hohen Investitionen.

Eine Abwägung der beiden Effekte führt in jedem Netz zu einer optimalen Abgrenzung der Hochzone. Die Ermittlung dieser Potenziale ist jedoch nur bei Vorlage eines exakten Netzmodells (und mit möglichst präziser Angabe der Gebäudehöhen) möglich, da weit verstreute hochgelegene Kunden entweder zu hohen dezentralen Fördermengen oder zu vielen Druckerhöhungsanlagen im Netz führen.

Fazit und Ausblick

Die aktuell entwickelten Verfahren zur Verringerung des Energiebedarfs und der Energiekosten zeigen bei ersten Netzuntersuchungen, dass signifikante Einsparpotentiale sowohl in der Druckzonengestaltung als auch dem Netzbetrieb bestehen. Während betriebliche Optimierungen kurzfristig umgesetzt werden können, erfolgt die Anpassung der Netzstruktur und -dimensionierung schrittweise.

Hierzu bietet sich eine dreistufige ganzheitliche Konzeptplanung an, die die Druckzonengestaltung, die Behältergrößen sowie die Dimensionierung der Trinkwassernetze hinsichtlich des Energiebedarfs und der Energiekosten optimiert. Die erste

Stufe mit einer energetisch optimalen Druckzonengestaltung reduziert die Druck- und damit Energieüberschüsse in dem Netz. Die zweite Stufe dient dann der Minimierung der Energiekosten unter Einbeziehung des Spot- und Regelenergie-marktes. Dabei werden die Kennwerte wie Behältergröße und mittlere Rohrnenntweiten strategisch ausgelegt. Die anschließende Detailplanung der einzelnen Nennweiten erfolgt mit dem bereits etablierten Verfahren der Zielnetzermittlung.

SCHLAGWÖRTER: Wasserversorgung, Druckzonengestaltung

AUTOREN



Dr. **PIET HENSEL**
 Geschäftsführer, RZVN Wehr GmbH,
 Düsseldorf
 Tel. +49 211 6012 73 00
 hensel@rzvn.de



Dipl.-Ing. **VINCENT LAYEC**
 Projektgenieur, RZVN Wehr GmbH,
 Konstanz
 Tel. +49 7531 457188 0
 layec@rzvn.de