Fraunhofer
UMSICHT

Abschlussbericht
Sicherheitstechnische Untersuchung von Versorgungsleitungen für Lösemittel - II

bearbeitet von
Dipl.-Ing. A. Dudlik (Tel.: 02 08/85 98-125)
Bereich Sicherheits- und Prozesstechnik

Oberhausen, 29. November 1999

Zusammenfassung

Basierend auf den Ergebnissen des ersten Auftrags „Sicherheitstechnische Untersuchung einer Versorgungsleitung für Lösemittel“ vom 01.10.99 wurden ergänzende Simulationen durchgeführt

Ziel der Untersuchungen war es, die notwendigen Maßnahmen zu definieren, um die Lösemittelleitungen in der Nennweite DN50 mit der Druckstufe PN16 betreiben zu können. Hierfür sollten alle Szenarien, in denen unzulässige Überdrücke entstehen können, nachgerechnet und bewertet werden. Die resultierenden Maßnahmen gegen Überdruck und Druckstöße sollten entwickelt und anschließend berechnet werden.

Ergebnisse für alle Lösemittel außer NaOH und HCl:
Für die Leitungsklasse DN50 empfehlen wir die Ausführung in der Druckstufe PN16. Voraussetzung hierfür ist, dass nach einem möglichen Pumpenausfall die unten näher erläuterten Sicherheitsmaßnahmen getroffen werden. Der Durchfluss der Lösemittel ist auf maximal 7 m^3/h zu begrenzen.

Ergebnisse für NaOH-Lösung (50 Gew.-%):
Für die Leitungsklasse DN50 empfehlen wir die Ausführung in der Druckstufe PN16. Voraussetzung ist, dass am Gebäudehochpunkt ein Pufferbehälter installiert wird, dessen Zulaufarmatur höchstens mit der unten beschriebenen Stellgeschwindigkeit geschlossen werden darf. Der Durchfluss der Lösemittel in der Pufferbehälter-Zulaufrohrleitung ist auf maximal
5 m^3/h, in den Ablaufleitungen auf max. 4 m^3/h zu begrenzen.

Ergebnisse für HCl (37 Gew.-%):
Für die Leitungsklasse DN50 (Stahl mit PTFE-Inliner) empfehlen wir die Ausführung in der Druckstufe PN16. Der Durchfluss ist auf maximal 3 m^3/h zu begrenzen. Für einen Maximaldurchfluss von 2 m^3/h empfehlen wir die Druckstufe PN10. Bei Einsatz einer GFK-Leitung empfehlen wir für einen Maximaldurchsatz von 3 m^3/h die Druckstufe PN10.

Durch betriebliche Durchflussregelvorgänge werden ebenfalls Druckschwankungen mit jedoch erheblich kleineren Amplituden ausgelöst. Diese Schwankungen haben jedoch keine Auswirkung auf die Standfestigkeit der eingesetzten MSR-Einrichtungen. Dies gilt ebenfalls für Lösemittel-Entnahmestellen, bei denen der Durchfluss 2 m^3/h nicht übersteigt.

1. Arbeitsprogramm

Die Versorgungsleitung mit den für die Berechnung relevanten Einbauten und geometrischen Verhältnissen ist in Bild 1 dargestellt. Eine Kreiselpumpe P1 fördert Chemikalien aus einem Tanklager (1) über eine Rohrbrücke in die Behälter 9 und 31 der Zweige 1 und 2. Die Abzweige erfolgen an der Verteilerstation im Gebäude.

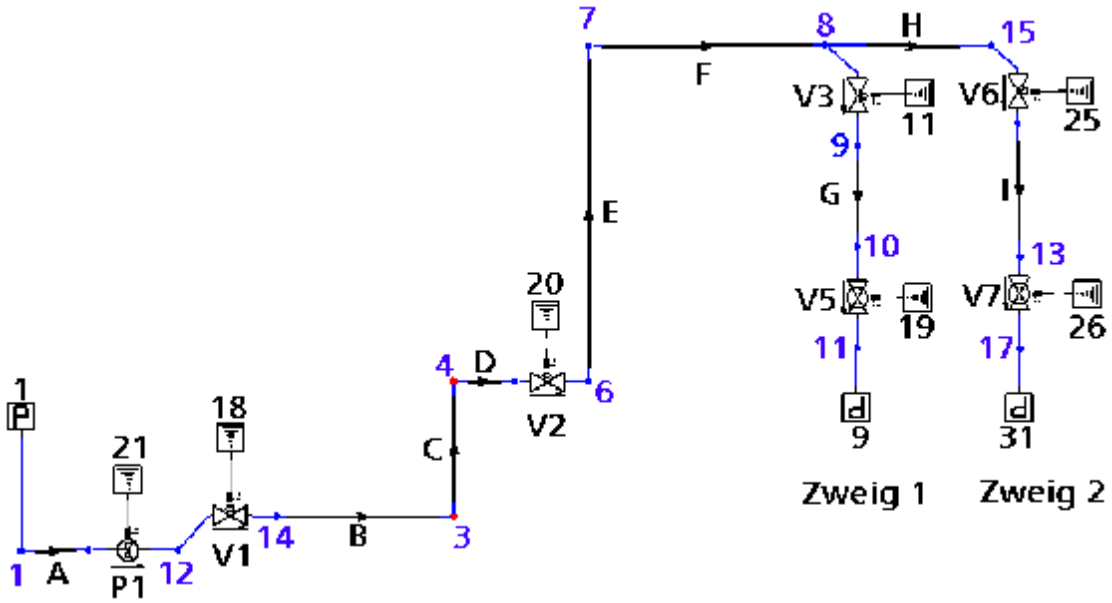

Bild 1: Veränderte Simulationsgeometrie mit Verzweigungen an der Verteilerstation

1	Medien	DMF, NaOH 50% und HCl 37% (Gew.-%)
2	Leitung	DN50, DN65 gebäudeseitig verzweigt, Zweige in DN50
3	Material	Edelstahl, Edelstahl mit PTFE-Auskleidung, GFK
4	Gesamtlänge B1 - V5/V7	500 m
5	Fluiddurchsatz	10, 7 m^3/h (DMF); 5, 3 und 2 m^3/h (NaOH); 3, 2 m^3/h (HCl)
6	Temperatur	NaOH und HCl: 20 °C, DMF: 30 °C
P1	Pumpe P1	Kreiselpumpe wie in Teil I, Pumpe mit steiler Kennlinie
V1	Armatur	Kugelhahn (schließt automatisch bei Pumpenausfall)
V2	Notabsperrarmatur	Schließzeit: 1,0 s
V3	Kugelhahn	Schließzeit: 0,5 s
V5	Armatur	Regelventil, Schließzeit 0,5 s

Tab. 1: Für Simulationsrechnungen relevante Daten

Pos.	Medium	Szenario	NW	Durchsatz [m^3/h]			Bem.
				A-F	Zweig 1	Zweig 2	
A1	DMF	V3 zu - 0,5 s	65	10	4	6	steile Kennlinie
A2	DMF	V3 zu - 0,5 s	65	7	4	3	steile Kennlinie
A1a	DMF	V3 zu - 0,5 s - V7 regelt nach	65	10	4	6	steile Kennlinie
A2a	DMF	V3 zu - 0,5 s - V7 regelt nach	65	7	4	3	steile Kennlinie
A1b	DMF	V3 zu - 0,5 s	65	10	4	6	flache Kennlinie
A3	DMF	V3 - 0,5 s	50	7	7	0	flache Kennlinie
B1	DMF	Pumpenausfall-100 s	65	10	4	6	flache Kennlinie
B1a	DMF	Pumpenausfall - 30 s	65	10	4	6	flache Kennlinie
B2	DMF	Pumpenausfall-100 s	50	7	7	0	flache Kennlinie
C1	DMF	V2 zu 1,0 s	65	10	4	6	flache Kennlinie
D	NaOH-Lsg.	Schallgeschwindigkeiten ermitteln	-	-	-	-	NaOH: 50%
D1	NaOH	V3 - 0,5 s	65	3	3	0	flache Kennlinie
D2	NaOH	V3 - 0,5 s	50	2	2	0	flache Kennlinie
D3	NaOH	Pumpenausfall 100 s	50	3	3	0	flache Kennlinie
D4	NaOH	Pumpenausfall 120 s Durchflussbegrenzung	50	2	2	0	flache Kennlinie
D5	NaOH	Pufferbehälter	50	4	4	0	flache Kennlinie
E	HCl- Lsg.	Schallgeschwindigkeiten ermitteln	-	-	-	-	HCl: 37%
E1	HCl	V3 - 0,5 s, $3m^3/h$	50	3	3	0	flache Kennlinie
E1a	HCl	V3 - 0,5 s, $2m^3/h$	50	2	2	0	flache Kennlinie
E2	HCl	Pumpenausfall	50	3	3	0	flache Kennlinie
		Bericht					

Tab. 2: Durchgeführte Simulationen und sonstige Arbeiten; (Szenarien, in denen Durchflussregel- oder -absperrvorgänge < 3 m^3/h vorkommen, sind grau hinterlegt)

2. Ergebnisse zu den Szenarien A (Dimethylformamid)

Die Ergebnisse des Szenarios A1 sind in Abb. 1 dargestellt. Der Durchfluss in Zweig 1 (Component 13) wird dabei durch Absperren von V3 auf Null herab-

gesetzt. In Zweig 2 (Component 28) steigt der Durchfluss infolgedessen auf ca. 8 m^3/h an. Die dabei entstehenden Druckspitzen an den Knoten 3, 8 und 13 betragen maximal 12 bar.

Beim simulierten Regelvorgang der Armatur V7, den ursprünglichen Zustand von 4 m^3/h wieder zu erreichen (Szenario A1a, s. Abb. 2), entstehen die in Abb. 3 dargestellten zeitlichen Druckverläufe. Hierbei entstehen Druckmaxima von 16 bar am Fuß der Rohrbrücke.

Ähnliche Ergebnisse erhält man für die Szenarien A2 und A2a (s. Abbn. 4 und 6). Trotz des geringeren Durchflusses (7 m^3/h) kann der Druck nicht verringert werden. Ursache hierfür ist die steile Fördercharakteristik der Kreiselpumpe.

Günstig wirkt sich eine Pumpe mit flacher Pumpenkennlinie auf die zeitlichen Druckverläufe aus (s. Abb. 7). Beim gewählten Szenario A1b schließt die Armatur V3 (Component 13) den Zweig 1 vollständig ab. Die auftretenden Druckstöße sind erheblich kleiner. Der Durchfluss durch den Zweig 2 (Armatur V7 - Component 30) schwankt nur wenig um die gewünschte Menge von 6 m^3/h. Die dabei auftretenden Druckschwankungen im Leitungssystem sind im Vergleich zu den o.g. Szenarien mit steiler Pumpenkennlinie klein.

Für die Leitungsklasse DN50 treten beim Szenario A3 Druckspitzen von höchstens16 bar auf, wenn der Durchfluss auf 7 m^3/h begrenzt wird (s. Abb. 8).

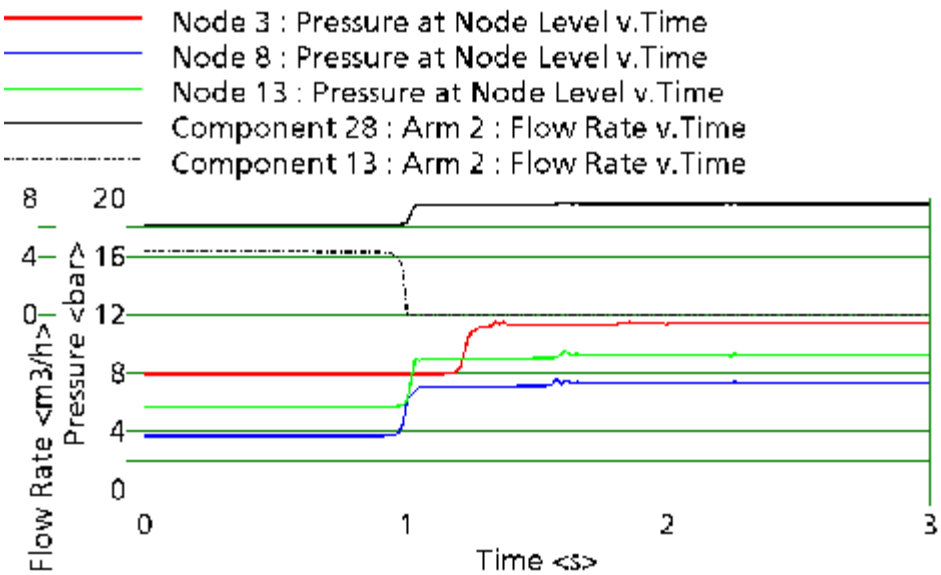

Abb. 1: Szenario A1 - Zeitliche Druck- und Durchflussverläufe (Armatur V7 - Component 30, Leitung I, Zweig 2 - Component 28)

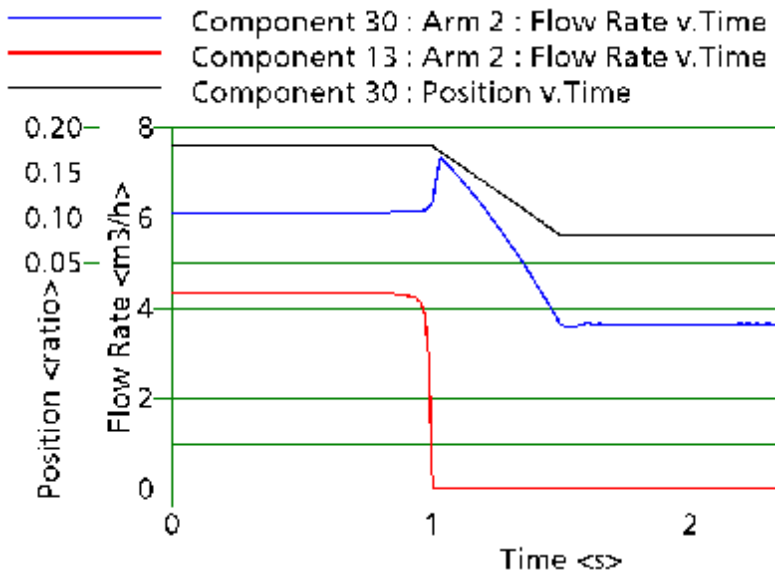

Abb. 2: Szenario A1a - Zeitliche Verläufe von Durchfluss und Stellung V7 sowie Durchfluss V3 (Armatur V7 - Component 30, V3 - Component 13)

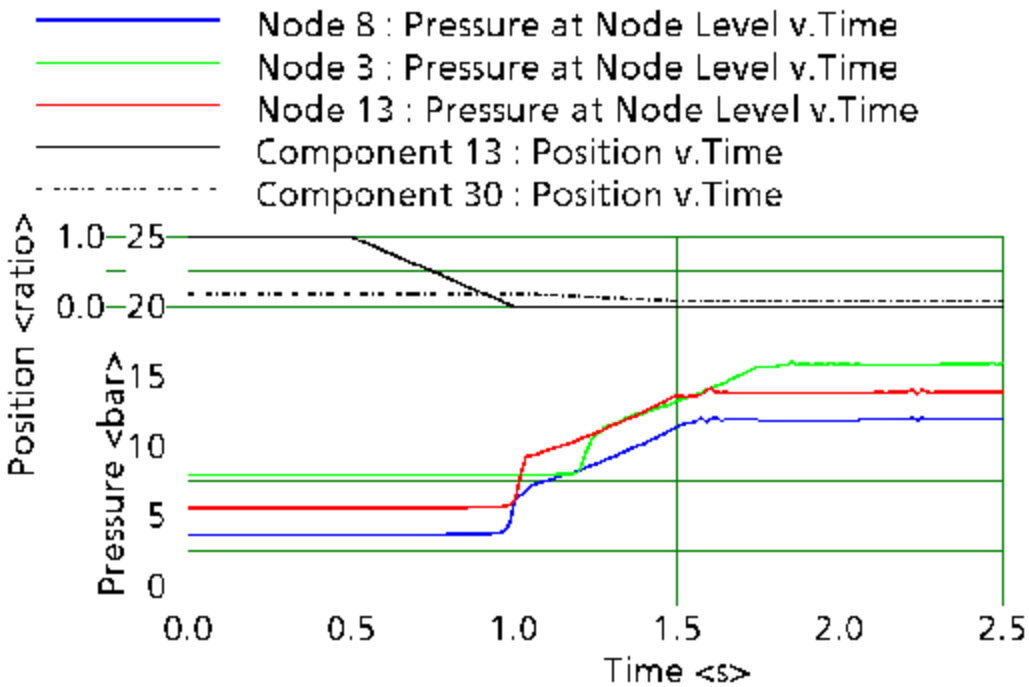

Abb. 3: Szenario A1a - Zeitliche Druck- und Durchflussverläufe

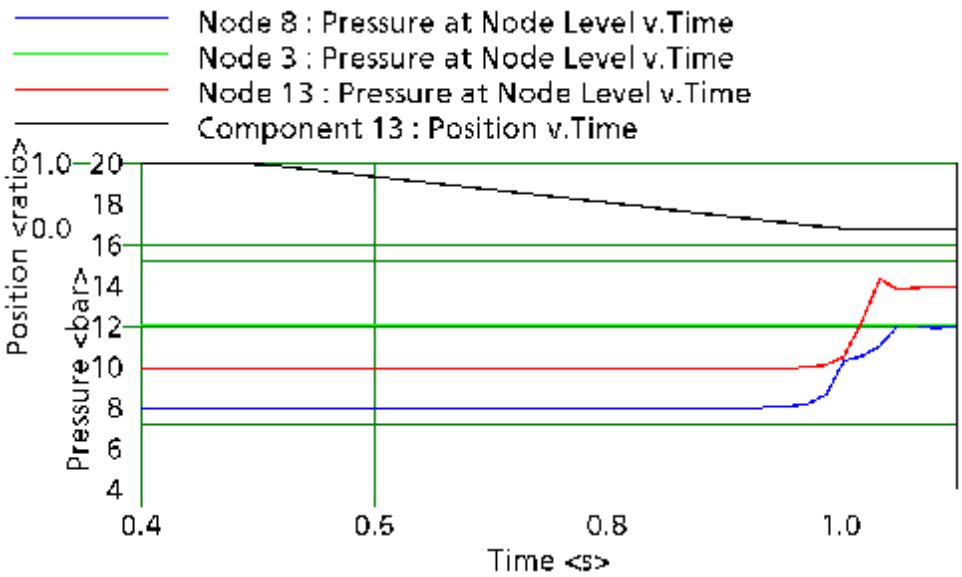

Abb. 4: Szenario A2 - Zeitliche Druck- und Durchflussverläufe

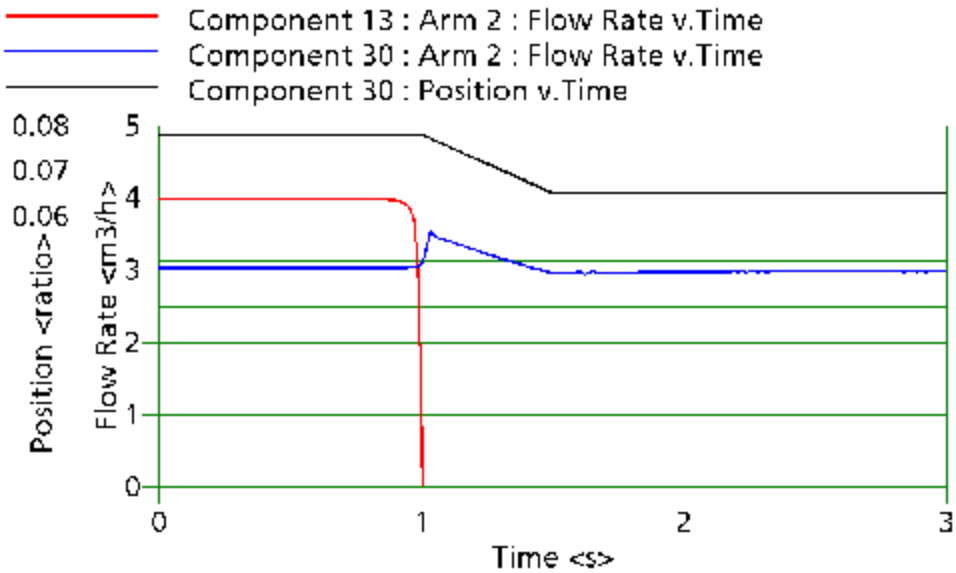

Abb. 5: Szenario A2a - Zeitliche Verläufe von Durchfluss und Stellung V7

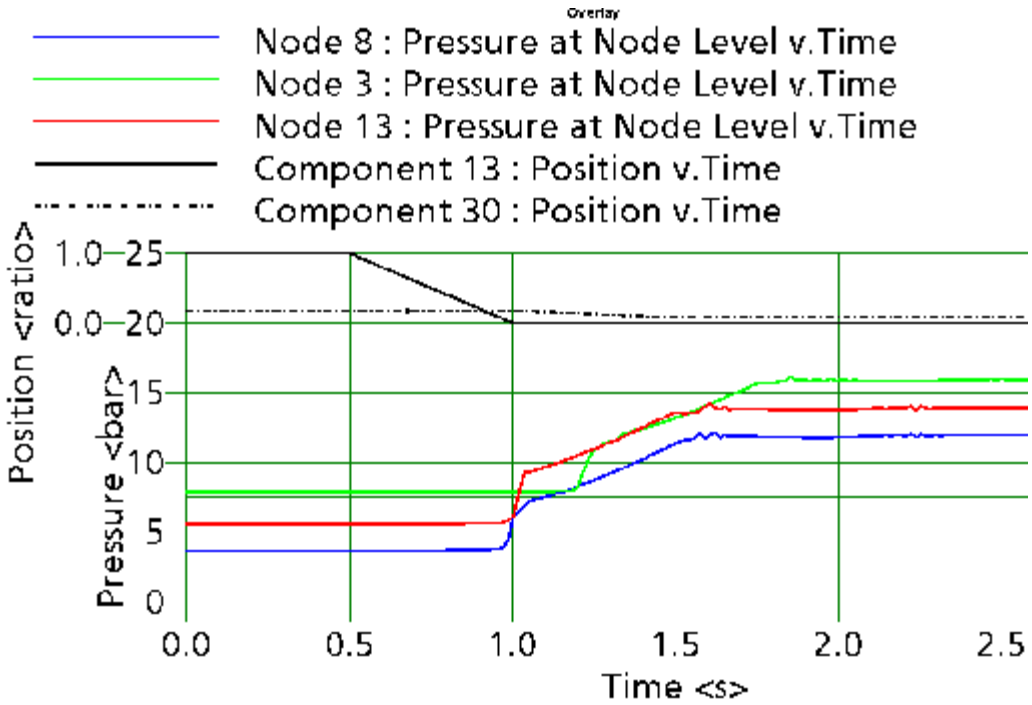

Abb. 6: Szenario A2a - Zeitliche Druck- und Durchflussverläufe

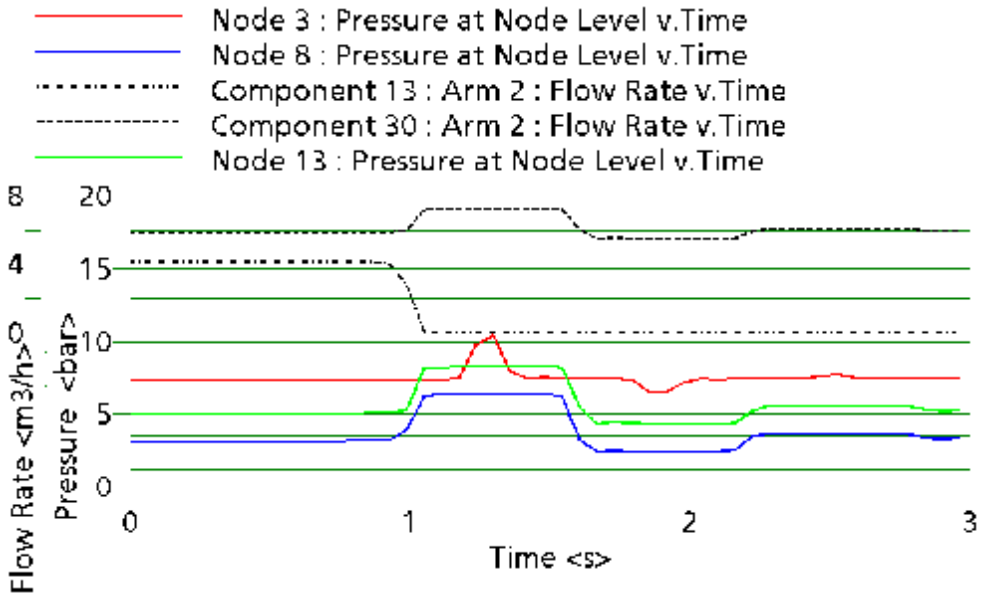

Abb. 7: Szenario A1b - Zeitliche Druck- und Durchflussverläufe Pumpe mit flacher Pumpenkennlinie

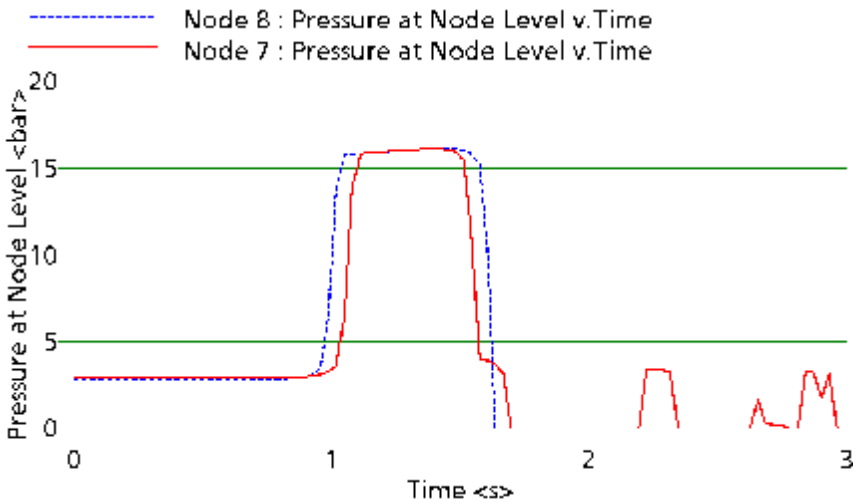

Abb. 8: Szenario A3 - Zeitliche Druckverläufe Pumpe mit flacher Pumpenkennlinie, Leitung DN50

2. Ergebnisse zu den Szenarien B (Pumpenausfall DMF)

Zum Szenario Pumpenausfall wurden unterschiedliche Ausfallzeiten (15 s bzw. 45 s) angenommen. Die Szenarien wurden über eine Gesamtzeit von 30 s (B1a) und 100 s (B1) gerechnet. Problematisch ist das teilweise Leerlaufen der Leitungen in den höher gelegenen Gebäudeteilen durch Verdampfung der Lösemittel (s. Abb. 9: maximales Dampfblasenvolumen am Knoten 7: ca. 30 l). Beim Wiederanfahren der Pumpe fördert diese gegen einen geringeren Druck (Dampfdruck von DMF: 0,01 bar) als bei vollständig gefüllter Leitung. Es kommt zu höheren Durchsätzen und zu entsprechend höheren Druckstößen (Knoten 7: bis zu 26 bar, s. Abb. 9). Um dies zu verhindern, sollten folgende Maßnahmen getroffen werden:

Bei Pumpenausfall schließt die Armatur V1 zeitgleich binnen ca. 2 s. Hierdurch wird ein Rückströmen in das Tanklager verhindert.

Vor dem Wiederanfahren ist die Handarmatur V3 zu schließen. Anschließend wird die Armatur V5 (bzw. V7) geöffnet, bis Stickstoff in die Leitung eintreten kann. Danach wird V3 geöffnet.

Alternativ zu 2. kann V1 als Durchflussregelarmatur ausgeführt werden, wobei ein maximaler Durchfluss (z.B. 7 m^3/h in der Leitung DN50; maximaler Druck:

16 bar) eingestellt wird.

Alternativ kann die Pumpe mit einem Drehzahlregler versehen werden, wobei ein maximaler Durchfluss (z.B. 7 m^3/h in der Leitung DN50, maximaler Druck: 16 bar) eingestellt werden kann. Wir empfehlen jedoch, den Maximaldurchfluss über eine Rampe (0 - 7 m^3/h in 60 s) einzustellen.

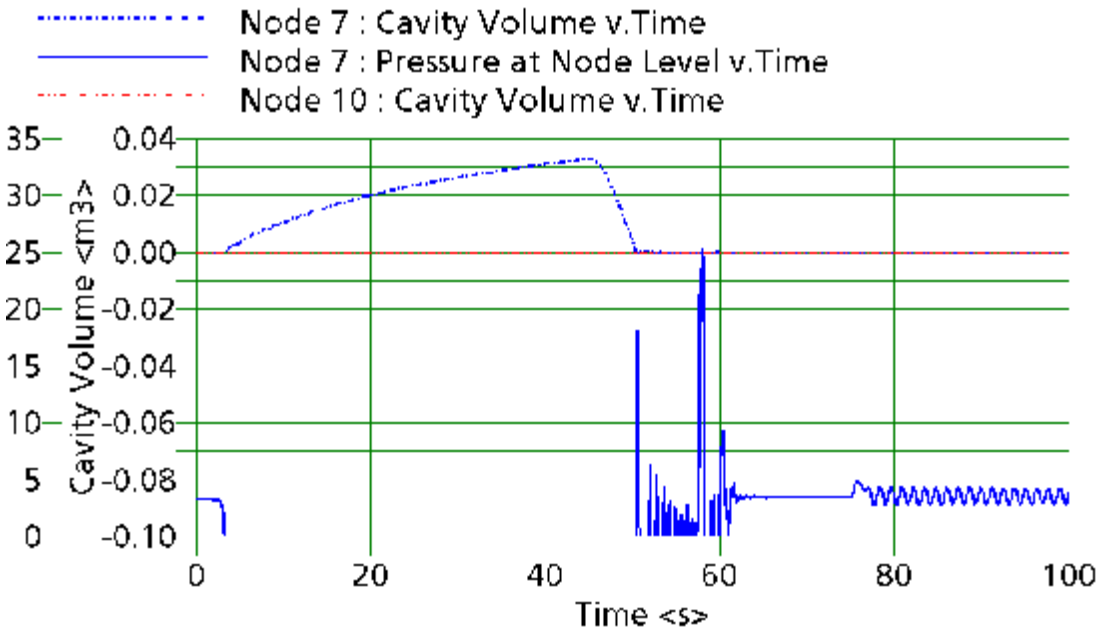

Abb. 9: Szenario B1 - Zeitliche Druck- und Dampfvolumenverläufe; Pumpe mit flacher Pumpenkennlinie, Leitung DN65

Diese Maßnahmen resultieren aus den nachfolgend näher erläuterten Simulationen. In Abb. 10 ist das Szenario Pumpenausfall anhand der beteiligten Armaturen dargestellt.

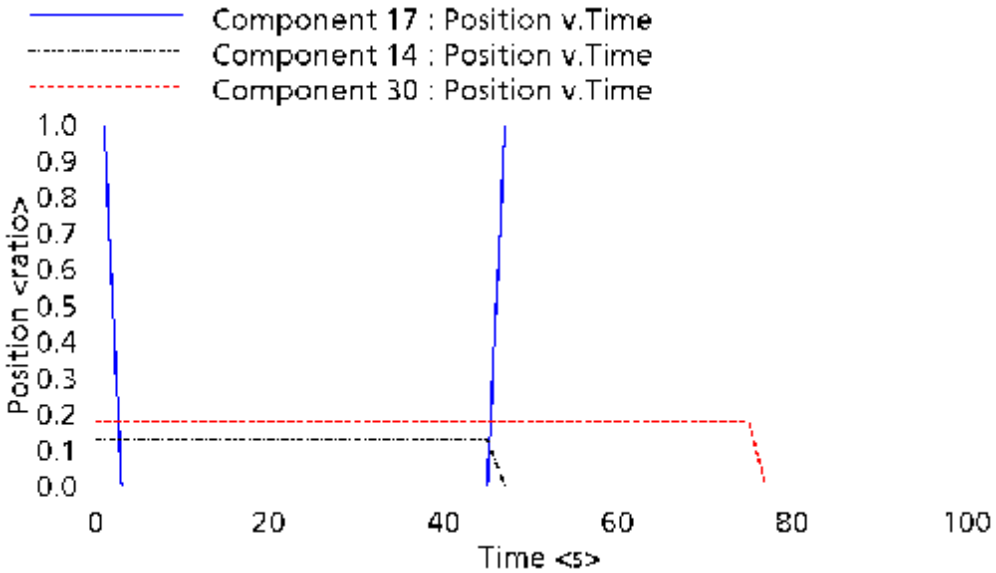

Abb. 10: Szenario B1 - Zeitliche Verläufe der Armaturenstellungen; Pumpe mit flacher Pumpenkennlinie, Leitung DN65

Mit dem Pumpenausfall bei t = 0,5 s schließt die Armatur V1 (Component 17, s. Abb. 10) innerhalb von 2 s. Die Armatur V5 (Component 14) schließe bei t = 45 s, weil kein Bedarf an Lösemittel vorhanden ist. Das gleiche passiere in Zweig 2 nach t = 75 s.

Dies führt beim Wiederanfahren der Pumpe auf die in Abb. 9 dargestellten zeitlichen Druckverläufe am Gebäudehochpunkt (Node 7).

Eine zweite Druckwelle tritt auf, wenn die am Knoten 9 gebildete Dampfblase wieder durch Pumpenförderung kollabiert. Dieser Vorgang ist in Abb. 11 dargestellt.

Man beachte, dass diese Kondensationsvorgänge erfolgen, obwohl der Durchfluss durch den Zweig 2 möglich ist (Armatur V7 noch geöffnet, vgl. Abb. 10, V7 - Component 30).

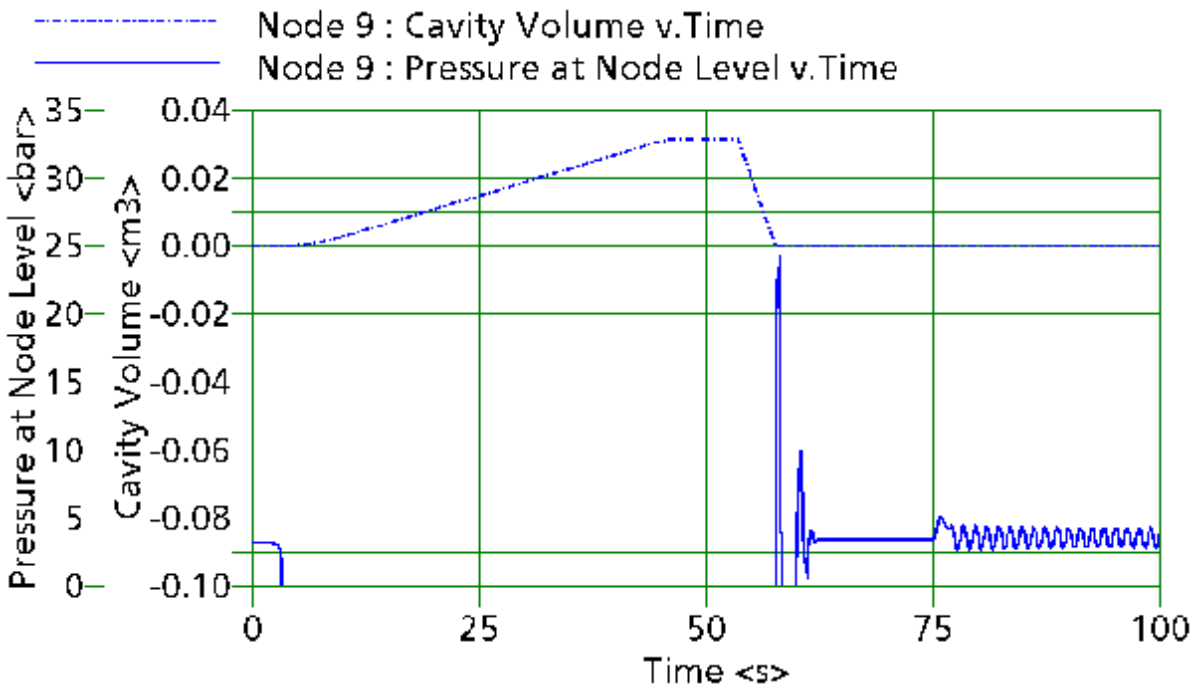

Abb. 11: Szenario B1 - Zeitliche Druck- und Dampfvolumenverläufe; Pumpe mit flacher Pumpenkennlinie, Leitung DN65

Der auftretende zeitliche Verlauf des Volumenstroms ist in Abb. 12 dargestellt. Man erkennt, dass beim Wiederanfahren der Pumpe der Volumenstrom kurzzeitig auf über 30 m^3/h ansteigt.

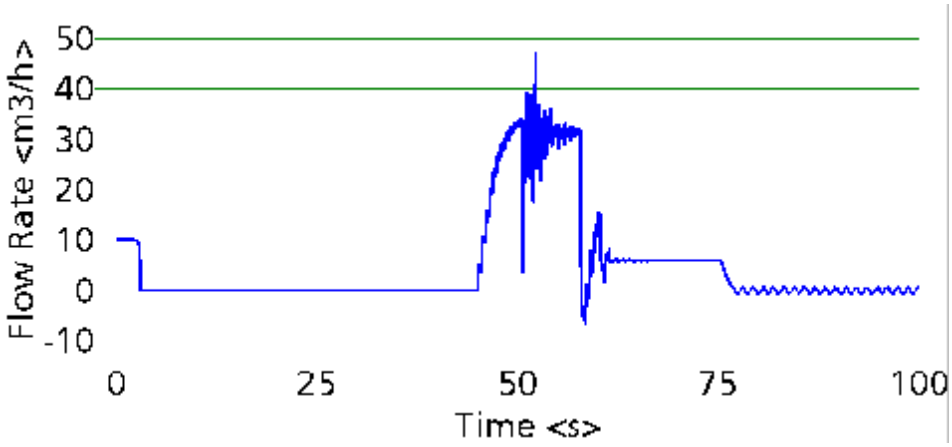

Abb. 12: Szenario B1 - Zeitliche Volumenstromverlauf an V1; Pumpe mit flacher Pumpenkennlinie, Leitung DN65

In Abb. 13 ist sind die Stellvorgänge zum Szenario B1a dargestellt. Hierbei wird eine Ausfallzeit von 14 s angenommen. Die Dosierarmaturen V5 (Component 14) und V7 (Component 30) bleiben in der jeweiligen stationären Dosierstellung.

Beim Anfahren der Pumpe entstehen die in Abb. 14 dargestellten zeitlichen Druckverläufe am Hochpunkt der Leitung (Node 7). Die 20 l große Dampfblase kollabiert nach etwa 23 s und es tritt ein Druckstoß in der Höhe von ca. 13 bar auf. Dieser könnte jedoch auch höher sein, falls die Regelarmaturen während der Pumpenausfallzeit weiter öffnen würden, um z.B. den abfallenden Durchsatz zu erhöhen.

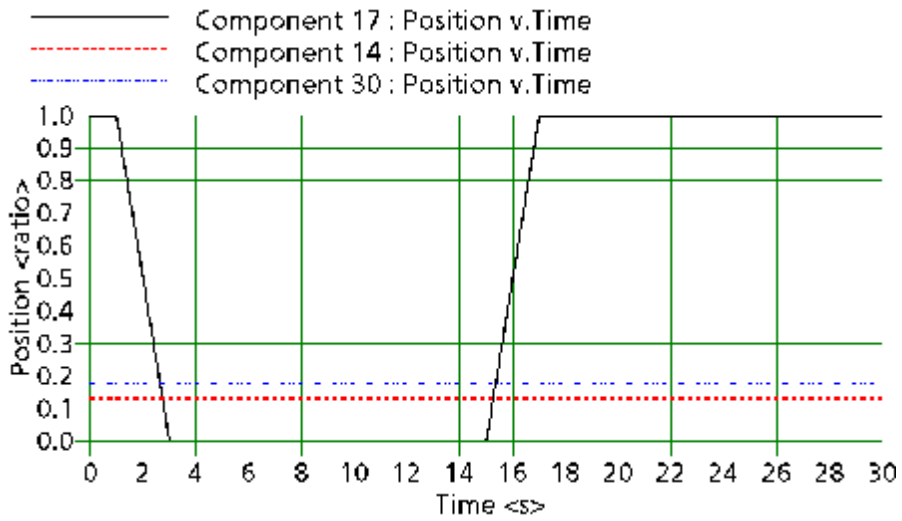

Abb. 13: Szenario B1a - Zeitliche Verläufe der Armaturenstellungen; Pumpe mit flacher Pumpenkennlinie, Leitung DN65

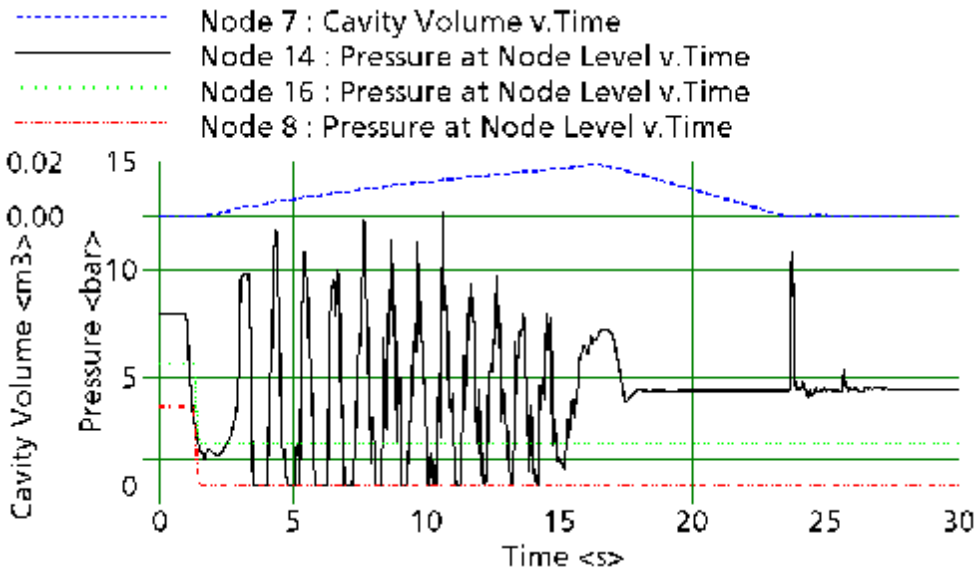

Abb. 14: Szenario B1a - Zeitliche Druck- und Dampfvolumenverläufe; Pumpe mit flacher Pumpenkennlinie, Leitung DN65

Für den Fall, dass eine Leitung der Nennweite DN50 gewählt wird, entstehen beim Durchsatz von 7 m^3/h durch den Zweig 1 die in Abb. 16 dargestellten Verläufe von Druck am Knoten 8 und Durchfluss an der Armatur V3 (Component 14). Bei diesem Szenario werden die in Abb. 15 dargestellten Armaturenstellvorgänge angenommen. Die Armatur V1 (Component 17) schließt bei

Pumpenausfall und wird beim Anfahren nach 45 s wieder geöffnet. V5 (Component 14) schließt nach 45 s. Die Armatur V6 (Component 29) ist während des gesamten Vorgangs vollständig geschlossen

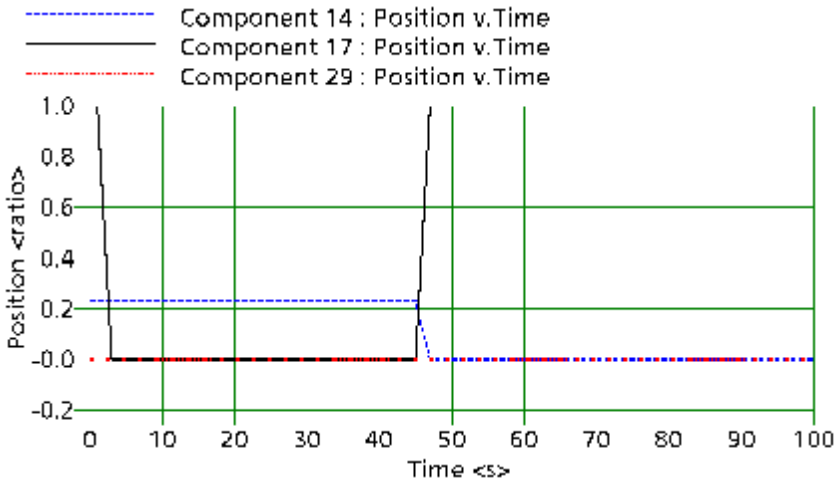

Abb. 15: Szenario B2 - Zeitliche Verläufe der Armaturenstellungen; Pumpe mit flacher Pumpenkennlinie, Leitung DN50

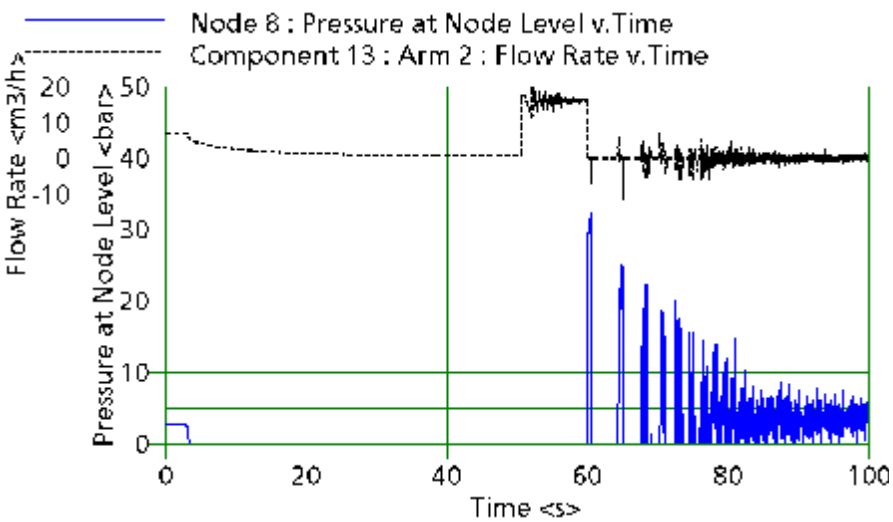

Abb. 16: Szenario B2 - Zeitliche Druck - und Durchflussverläufe; Pumpe mit flacher Pumpenkennlinie, Leitung DN50

Beim Wiederanfahren entsteht kurzzeitig ein Durchfluss von ca. 15 m^3/h durch die Armatur V3 (Component 13). Dadurch treten am Knoten 8 Druckspitzen bis ca. 35 bar auf.

Bei einem Wiederanfahren der Pumpe mit gesicherter Mengenbegrenzung auf die Nennmenge
(7 m^3/h) werden die Druckspitzen jedoch auf maximal 16 bar reduziert.

2. Ergebnisse zu den Szenarien C

Bei diesem Szenario schließt die Armatur V2. Die dabei entstehenden Druckstöße in der Lösemittelleitung DN65 sind in Abb. 17 dargestellt. Stromaufwärts der Armatur (Node 3) steigt der Druck auf ca. 18 bar an. Stromabwärts (Node 6) entstehen Dampfblasen, die bei Kondensation Druckstöße von etwa 18 bar verursachen.

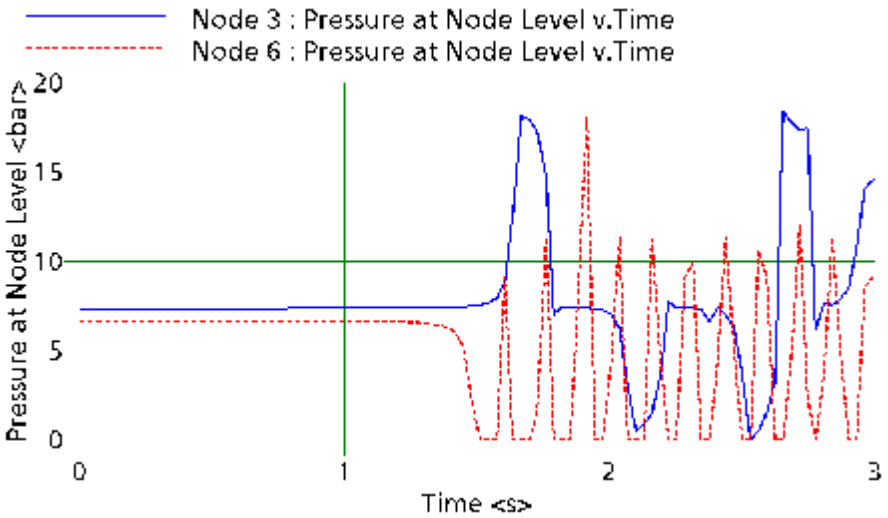

Abb. 17:
Szenario C1 - Zeitlicher Druckverlauf an V2; Pumpe mit flacher Pumpenkennlinie, Leitung DN65

4. Ergebnisse zu den Arbeiten D: NaOH- Lösung (50 Gew.-%)

In Abb. 18 ist die gemessene Schallgeschwindigkeit in NaOH-Lösung (50 Gew.-% ≈ 19 mol/l) bei unterschiedlichen Temperaturen dargestellt. Zusätzlich sind für kleinere Konzentrationen Literaturdaten eingetragen.

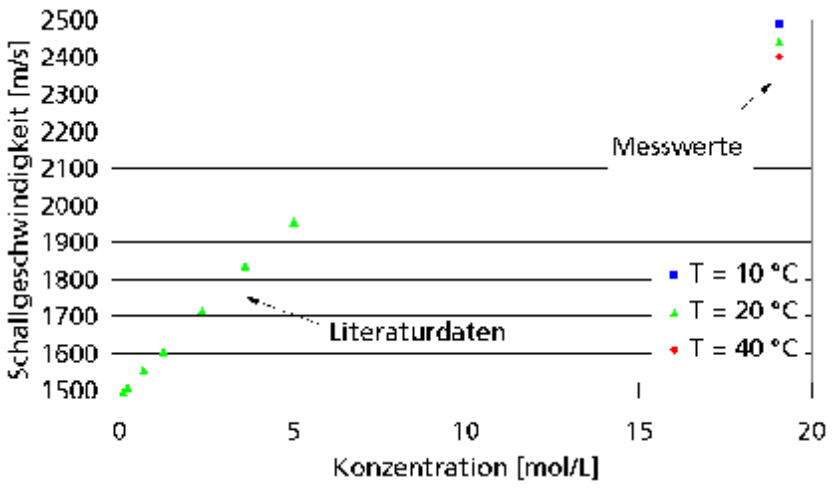

Abb. 18: Schallgeschwindigkeit von NaOH-Lösung in Abhängigkeit der Konzentration (gemessene Werte und Literaturdaten)

Bei Szenario D1 wird eine Volumenstrom von 3 m3/h NaOH-Lösung durch den Zweig 1 der Leitungsklasse DN65 gefördert. Beim Absperren durch V3 entstehen die in Abb. 19 dargestellten zeitlichen Druckverläufe.

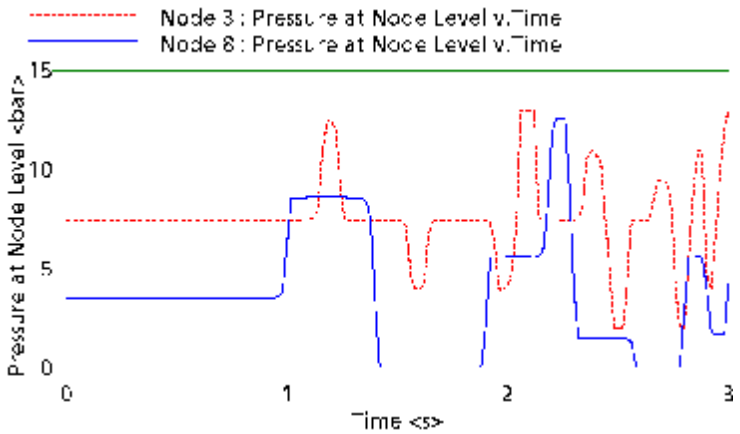

Abb. 19: Szenario D1 - Zeitliche Druckverläufe, Pumpe mit flacher Pumpenkennlinie, Leitung DN65

Bei Szenario D2 wird ein Volumensstrom von 2 m^3/h NaOH-Lösung durch den

Zweig 1 der Leitungsklasse DN50 gefördert. Beim Absperren durch V3 entstehen die in Abb. 19 dargestellten zeitlichen Druckverläufe mit Amplituden von maximal 16 bar.

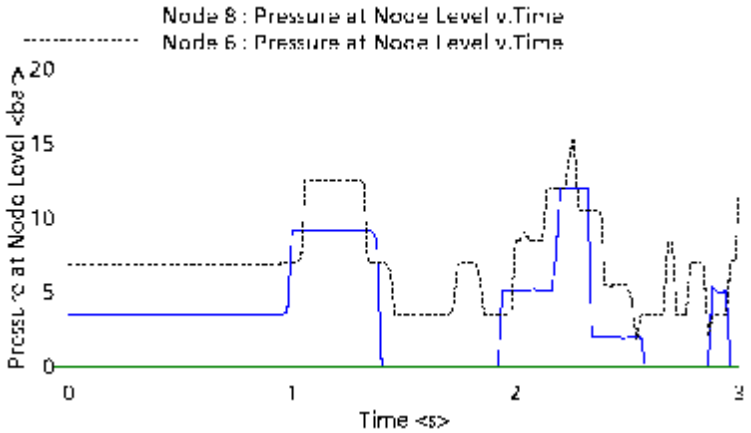

Abb. 20: Szenario D2 - Zeitliche Druckverläufe, Pumpe mit flacher Pumpenkennlinie, Leitung DN50

Bei Szenario D3 wird ein Pumpenausfall mit Wiederanfahren der Pumpe bei einem stationären Durchsatz von 3 m^3/h NaOH-Lösung simuliert. Die zeitlichen Druck- und Dampfvolumenverläufe sind in Abb. 21 dargestellt. Es werden Druckspitzen von 50 bar erreicht.

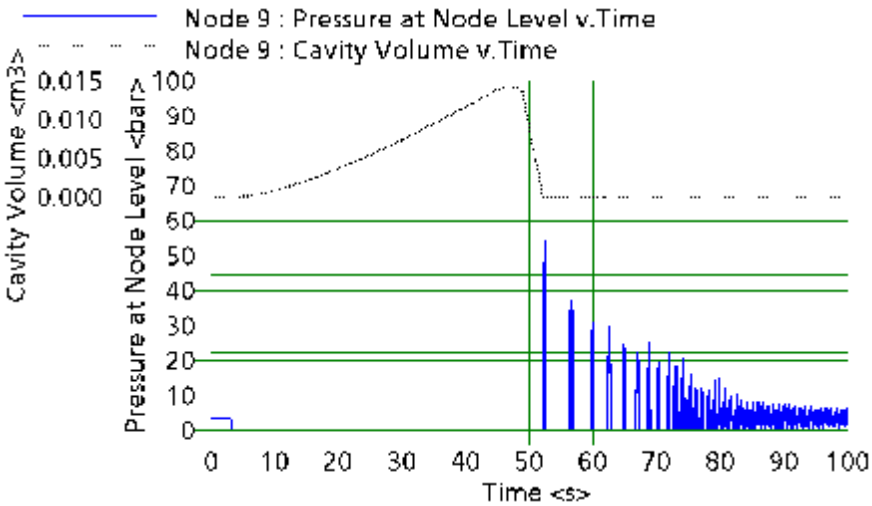

Abb. 21: Szenario D3 - Zeitliche Druck- und Dampfvolumenverläufe; Pumpe mit flacher Pumpenkennlinie, Leitung DN50

Wird an der Armatur V1 (Component 17, s. Abb. 22) eine *Volumenstromregelung* mit Begrenzung auf 2 m^3/h implementiert, und wird das Anfahren über eine Rampe (0 auf 1 m^3/h in 2s;
1 m^3/h auf 2 m^3/h in 40 s), können die Druckstöße beim Szenario Pumpenausfall auf etwa
2,5 bar reduziert werden (s. Abb.22).

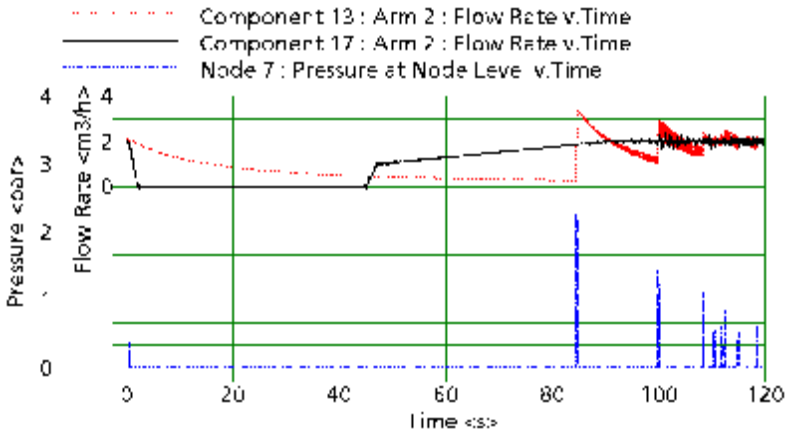

Abb. 22: Szenario D4 - Zeitliche Druck- und Durchflussverläufe; Pumpe mit flacher Pumpenkennlinie, Leitung DN50

Wird im Gebäude ein Pufferbehälter installiert (Szenario D5), so sollte die Befüllarmatur in der in Abb. 23 dargestellten Schließcharakteristik geschlossen werden. Hierdurch kann der Maximaldurchsatz auf 4 m^3/h erhöht werden.

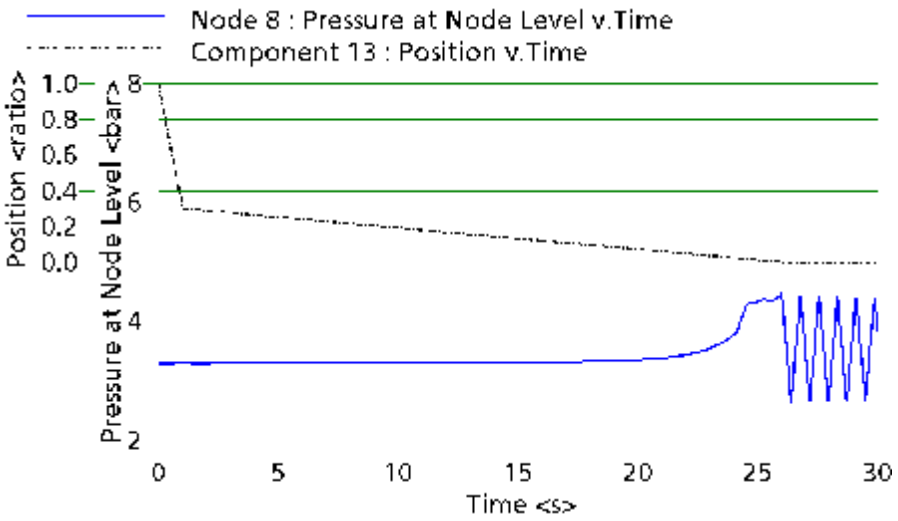

Abb. 23: Szenario D5 - Schließzeit des Dosierventils am Eintritt in den Pufferbehälter und daraus resultierender zeitlicher Druckverlauf am Knoten 8

In der Leitung DN40 vom Pufferbehälter zum Reaktionsbehälter treten beim schnellen Schließen der Armatur V5 beim stationären Durchsatz von 4 m^3/h die in Abb. 24 dargestellten Druckmaxima auf.

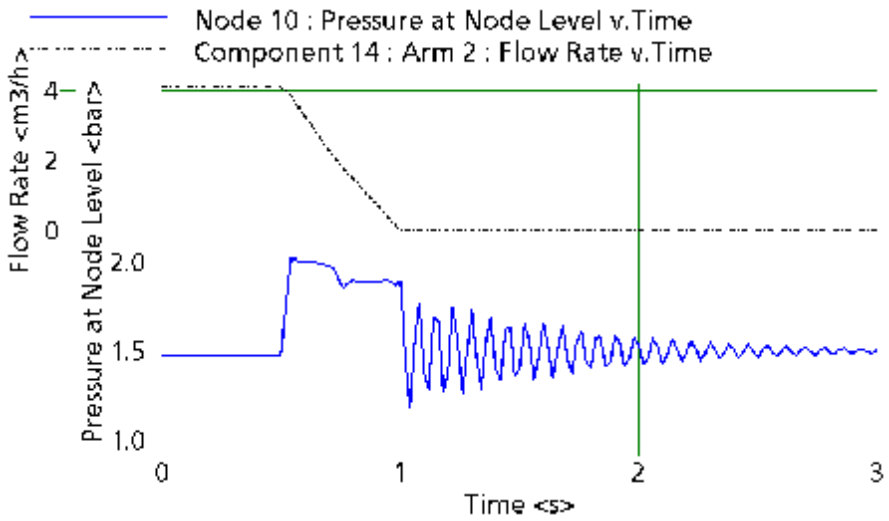

Abb. 24: Durchfluss und Druck stromaufwärts der Armatur V5 (Component 14) als Funktion der Zeit

5. Ergebnisse zu den Arbeiten E: HCl-Lösung (37 Gew.-%)

Im Labor wurde eine Schallgeschwindigkeit in HCl-Lösung (37 Gew.-%) von 1500 m/s gemessen.

Die folgenden Abb. 25 - 26 sind die Simulationsergebnisse für eine PTFE ausgekleidete Stahlleitung. Durch den Einsatz einer vakuumfesten GFK-Leitung (bis zum Dampfdruck von HCl) können bei gleichen Betriebsbedingungen Druckstöße von höchstens 10 bar entstehen, da die Schallgeschwindigkeit im Medium bei einem Material-E-Modul von 30.000 N/mm^2 auf 1000 m/s reduziert wird.

Bei Szenario E1 wird eine Volumenstrom von 3 m^3/h HCl-Lösung durch den Zweig 1 der Leitungsklasse DN50 gefördert. Beim Absperren durch V3 entstehen die in Abb. 25 dargestellten zeitlichen Druckverläufe.

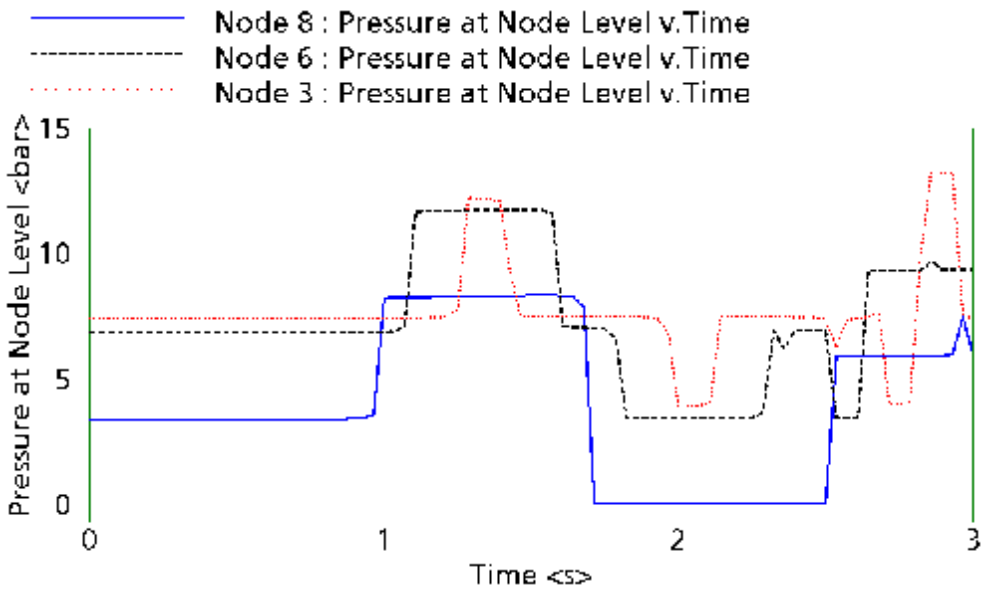

Abb. 25: Szenario E1 - Zeitliche Druckverläufe, Pumpe mit flacher Pumpenkennlinie, Leitung DN50

Bei Szenario E1a wird ein Volumenstrom von 2 m^3/h HCl-Lösung durch den Zweig 1 der Leitungsklasse DN50 gefördert. Beim Absperren durch V3 entstehen die in Abb. 26 dargestellten zeitlichen Druckverläufe. Der Maximaldruck beträgt hierbei 10 bar.

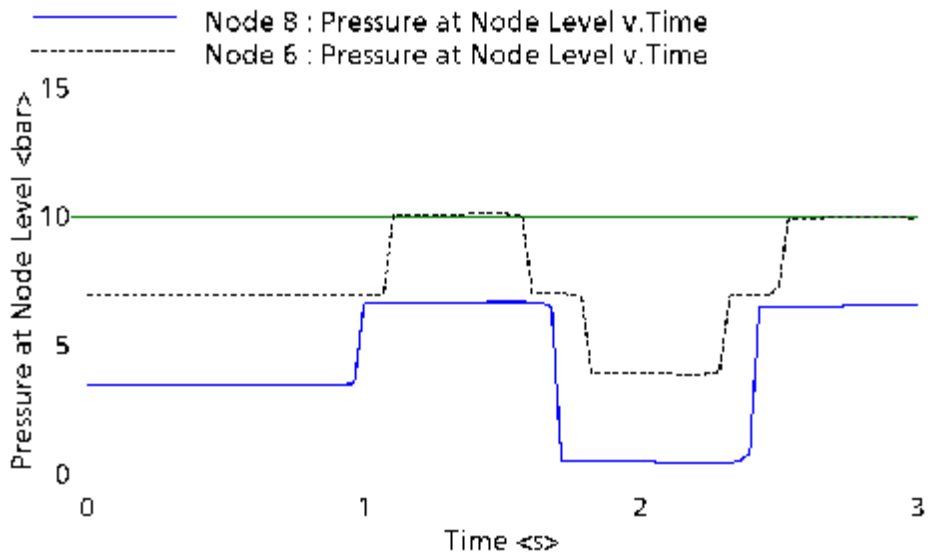

Abb. 26: Szenario E1a - Zeitliche Druckverläufe, Pumpe mit flacher Pumpenkennlinie, Leitung DN50

Beim Szenario E2 (Pumpenausfall) entstehen - wie bei allen anderen Szenarien ohne Volumenstromregelung - hohe Druckamplituden (s. Abb. 27).

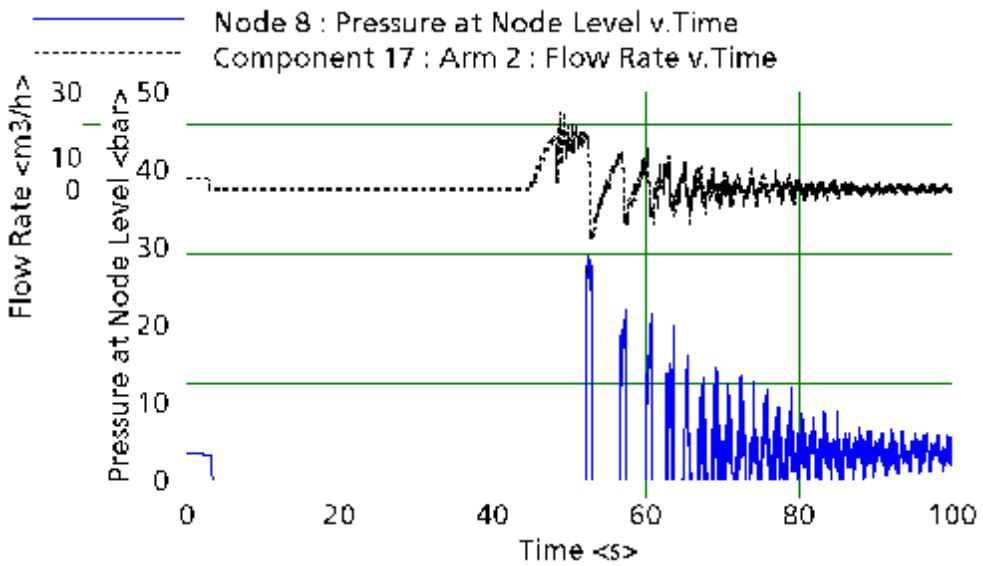

Abb. 27: Szenario E2 - Zeitliche Druck- und Durchflussverläufe; Pumpe mit flacher Pumpenkennlinie, Leitung DN50

Bei einem Wiederanfahren der Pumpe mit gesicherter Mengenbegrenzung auf die Nennmenge
(3 m^3/h) werden die Druckspitzen jedoch auf maximal 16 bar reduziert.