

Hrsg. Prof. Dr.-Ing. M. Böhle

SAM - Fortschrittsberichte

Band 18

Christian Geil

**Entwicklung einer Methode
zur hydraulischen,
betriebsdatenbasierenden
Modellierung von Vertikalbrunnen
in der Wassergewinnung**

**Entwicklung einer Methode zur hydraulischen,
betriebsdatenbasierenden Modellierung von
Vertikalbrunnen in der Wassergewinnung**

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)

genehmigte

DISSERTATION

von

Herrn

Dipl.-Ing. CHRISTIAN BRUNO GEIL

geb. in Grünstadt

Tag der mündlichen Prüfung:	07.02.2020
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. Tilmann Beck
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Roman Teutsch
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Martin Böhle Prof. Dr.-Ing. Dieter-Heinz Hellmann

SAM-Fortschrittsberichte

Band 18

Christian Geil

**Entwicklung einer Methode zur hydraulischen,
betriebsdatenbasierenden Modellierung von
Vertikalbrunnen in der Wassergewinnung**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7318-8

ISSN 2191-8031

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen der Technischen Universität Kaiserslautern.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Böhle, dem Leiter des Lehrstuhls für die Möglichkeit diese Arbeit anzufertigen und für die Unterstützung während meiner Zeit am Lehrstuhl.

Ebenfalls bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Dieter-Heinz Hellmann für seine Tätigkeit als zweiter Berichterstatter und bei Prof. Dr.-Ing. Roman Teutsch für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen danke ich für die gute Zusammenarbeit und ihre Hilfsbereitschaft.

Des Weiteren danke ich allen studentischen Hilfskräften sowie meinen Studien-, Bachelor- und Diplomarbeitern, die durch ihre tatkräftige Unterstützung ihren Beitrag zu der vorliegenden Arbeit geleistet haben.

Ganz besonders möchte ich meinen Eltern danken, welche mich in allen Lebenslagen begleitet haben. Auf ihre Unterstützung konnte ich immer zählen.

Nicht zuletzt danke ich meiner Lebensgefährtin Sandra für ihre Unterstützung und ihr Verständnis. In der Entstehungsphase dieser Arbeit musste sie den familiären Alltag häufig alleine bewältigen, während sie sich liebevoll um unsere Tochter Lena und unsere Zwillinge David und Björn gekümmert hat. In dieser Zeit hat mir meine Familie immer die Kraft und Zuversicht gegeben meine Arbeit vollenden zu können.

Kerzenheim, im Februar 2020

Christian Geil

Diese Arbeit widme ich
meiner Großmutter

Annette Hambel †

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XXIX
Kurzfassung	XXIII
Abstract	XXV
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Literaturübersicht	2
1.3 Ziel der Arbeit	6
2 Theoretische Grundlagen	7
2.1 Grundwasser	7
2.2 Eigenschaften von Grundwasserleitern	10
2.3 Zuströmung zu Brunnen	13
3 Gewinnungsgebiet Kaiserslautern-Ost	19
3.1 Übersicht	19
3.2 Förderstrang Saupferchtal	22
3.3 Förderstrang Lauterspring	23
3.4 Aufbau der Vertikalbrunnen	26
3.4.1 Prinzipieller Aufbau	26
3.4.2 Geologisches Profil und Hydrogeologie	27
3.4.3 Messstellen und Messdaten	29
4 Modellbildung	31
4.1 Ansatz und Modellaufteilung	31
4.2 Absenkmodell des Wasserspiegels	33
4.3 Druckverlustmodell	42
4.4 Berechnung des Brunnenbetriebs	49

5 Validierung	55
5.1 Vergleich mit Kalibrierdaten	55
5.2 Übertragbarkeit des Vertikalbrunnenmodells	60
5.2.1 Änderung des Analysezeitraums	60
5.2.2 Änderung der Pumpenkennlinie	62
5.2.3 Übertragbarkeit auf andere Brunnen	66
5.3 Fehlerdiskussion	72
5.3.1 Messunsicherheit	72
5.3.2 Weitere systematische Fehlerquellen	75
6 Gegenseitige Betriebsbeeinflussung	77
6.1 Einfluss auf Brunnen 17	79
6.2 Einfluss auf Brunnen F	82
7 Zusammenfassung	85
8 Ausblick	89
Literaturverzeichnis	91
Nomenklatur	97
A Anhang	103
A.1 Mathematische Funktionen	103
A.2 Technische Daten der Brunnen	104
A.3 Betriebsdaten der Brunnen	107
A.4 Druckverlustabschätzung für Brunnen D	108
A.5 Vertikalbrunnenmodell	117
A.5.1 Brunnen A	119
A.5.2 Brunnen B	120
A.5.3 Brunnen C	124
A.5.4 Brunnen D	128
A.5.5 Brunnen E	133
A.5.6 Brunnen F	138
A.5.7 Brunnen G	142
A.5.8 Brunnen H	146
A.5.9 Brunnen I	151
A.5.10 Brunnen 12a	156
A.5.11 Brunnen 17	160
A.6 Validierungsergebnisse	164

A.7 Messprogramm zur gegenseitigen Betriebsbeeinflussung	175
Betreute Arbeiten	177
Lebenslauf	179

Abbildungsverzeichnis

1.1	Veränderung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag in der Zukunft (2021 - 2050) im Vergleich zu heute (1971 - 2000), in Anlehnung an [8]	5
2.1	Die drei Arten von Grundwasserleitern: (a) Lockergestein (Porengrundwasserleiter), (b) Karstgestein und (c) Kluftgestein, in Anlehnung an [44]	8
2.2	Bilanzgrößen der Grundwasserneubildung: Wasserhaushalt mit Niederschlag, Abfluss und Verdunstung bei humiden Klima	9
2.3	Unterscheidung zwischen freiem Grundwasser (a) und gespanntem Grundwasser (b), in Anlehnung an [44]	12
2.4	Radialer Verlauf der Standrohrspiegelhöhe in der Nähe eines Vertikalbrunnens im stationären Betriebszustand, in Anlehnung an [44]	14
2.5	Schematischer Verlauf der Absenkung s während des Brunnenbetriebs und in der Regenerationsphase, in Anlehnung an [44]	18
3.1	Schematische Übersicht des Gewinnungsgebietes Kaiserslautern-Ost (Stand zum 31.12.2017)	19
3.2	Schematische Übersicht, Um- und Nachrüstung der Brunnen im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern-Ost (Stand zum 31.12.2017) [16]	21
3.3	Höhenverlauf der Rohrleitungssohle der Sammelleitung des Förderstrangs Saupferchtal	22
3.4	Höhenverlauf der Rohrleitungssohle der Sammelleitung des Förderstrangs Lauterspring	23
3.5	Durchschnittliche Quellschüttung der Lauterspring (Jahresmittel) und Jahresniederschlag für den Zeitraum 1955 bis 2017	24
3.6	Schüttungsverlauf der Lauterspring von Januar 2015 bis Dezember 2017	25
3.7	Prinzipieller Aufbau eines Vertikalbrunnens	26
3.8	Geologische Profile von Brunnen D (a) und Brunnen 17 (b)	28
4.1	Einfluss der Absenkung auf den Betriebspunkt der Pumpe	32
4.2	Schalthäufigkeit in Abhängigkeit vom Ausgangswasserspiegel $h_{WSP,0}$ (Betrieb von Brunnen D im Kalenderjahr 2015)	34

4.3	Betriebsbedingte Absenkung des Wasserspiegels im Brunnenschacht von Brunnen D exemplarisch für das Auswertungsintervall Nummer 7	36
4.4	Vergleich zwischen Regression und Messdaten der WSP-Absenkung von Brunnen D (Auswertungsintervall Nummer 7, $h_{\text{WSP},0,M} = 15,05 \text{ m}$)	37
4.5	Regressionskoeffizienten für das WSP-Absenkmodell von Brunnen D	39
4.6	Betriebsbedingte Absenkung und Regeneration des Wasserspiegels exemplarisch für einen Schaltzyklus von Brunnen D	42
4.7	Prinzip zur Bestimmung der Steigung der Anlagenkennlinie	44
4.8	Steigung der Anlagenkennlinie in Abhängigkeit von der Fördermenge und vom Wasserspiegel (Brunnen D, Kalenderjahr 2015)	45
4.9	Pumpenkennlinie von Brunnen D, Vergleich zwischen Herstellerangabe und Messung vom 26.11.2014	47
4.10	Steigung der Anlagenkennlinie in Abhängigkeit von der Fördermenge, berechnete Datenpunkte und Regression (Brunnen D, Kalenderjahr 2015)	48
4.11	Flussdiagramm des Gesamtberechnungsmodells	49
4.12	Simulationsergebnisse für Brunnen D bei unterschiedlichen Ausgangswasserspiegeln $h_{\text{WSP},0}$	54
5.1	Mittlere, betragsmäßige Abweichung der Fördermenge zwischen Simulation und PLS-Messung für die Kalibrierungsdaten (Jahr 2015) von Brunnen D	56
5.2	Fördermengenabweichung zwischen Simulation und Messung beim Anfahren der Pumpe, exemplarisch für Brunnen D ($h_{\text{WSP},0} = 14,8 \text{ m}$)	57
5.3	Mittlere, relative Abweichung der Fördermenge zwischen Simulation und PLS-Messung in Abhängigkeit von der Betriebszeit (Br. D, 2015)	58
5.4	Mittlere, relative Abweichung der Absenkung zwischen Simulation und PLS-Messung in Abhängigkeit von der Betriebszeit (Br. D, 2015)	59
5.5	Mittlere, betragsmäßige Abweichung der Fördermenge zwischen Simulation und PLS-Messung für die Betriebsdaten 2016 von Brunnen D	61
5.6	Pumpenkennlinie von Brunnen D, Vergleich zwischen Herstellerangabe und Messung vom 26.11.2014; Markierung des betriebsrelevanten Bereiches	62
5.7	Einfluss der Pumpenkennlinie (PKL) auf die berechnete AKL-Steigung von Brunnen D, Vergleich zwischen Herstellerangaben Messung	63
5.8	Vergleich der Simulationsergebnisse der beiden Vertikalbrunnenmodelle für Brunnen D.	65
5.9	Lage der Brunnen klassifiziert nach der Absenkung des Wasserspiegels im Betrieb	67
5.10	Absolute Fördermengenabweichung zwischen Simulation und PLS-Messung für die Brunnen des Gewinnungsgebietes Kaiserslautern-Ost	68

5.11 Absenkkurven von Brunnen A, exemplarisch für das Auswertungsintervall Nummer 7 ($h_{\text{WSP},0,M} = 14,88 \text{ m}$), Betriebsdaten von 2015	69
5.12 Pumpenkennlinie von Brunnen A, Vergleich Herstellerangabe und Messung	70
5.13 AKL-Steigung m und Druckverlustbeiwert $\zeta_{V,m}$ von Brunnen A für die Betriebsdaten von 2015, Berechnungsbasis PKL gemäß Herstellerangabe . .	71
5.14 Systematische Messunsicherheit der AKL-Steigung für die Brunnen des Ge- winnungsgebietes Kaiserslautern-Ost	74
5.15 Pumpenkennlinie von Brunnen D, Vergleich zwischen Herstellerangabe der neuen Pumpe (skaliert auf $f = 90 \text{ Hz}$) und Messung vom 19.01.2017	76
6.1 Fördermengenverläufe der Brunnen im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern- Ost am 08.08.2015 zwischen 10:30 und 17:00 Uhr, in Anlehnung an [16] . .	78
6.2 Detektierung der Betriebsbeeinflussung von Brunnen 17, räumliche Lage der innerhalb des Messprogramms berücksichtigten Brunnen	79
6.3 Fördermengenverläufe der Brunnen B, D, E, G, 12a und 17, Detektierung der Betriebsbeeinflussung von Brunnen 17, in Anlehnung an [16]	81
6.4 Detektierung der Betriebsbeeinflussung von Brunnen F, räumliche Lage der innerhalb des Messprogramms berücksichtigten Brunnen	82
6.5 Fördermengenverläufe der Brunnen A, C, D, E, F, G, und I, Detektierung der Betriebsbeeinflussung von Brunnen F, in Anlehnung an [45]	84
A.1 Häufigkeitsverteilung der Fördermenge Q von Brunnen D im Jahr 2015 . .	107
A.2 Aufteilung von Steigleitung und Brunnenkopf von Brunnen D in acht Sektionen zur Abschätzung der Druckverlustbeiwerte	108
A.3 Aufteilung des Druckverlustes von Rohrbögen (a), Widerstandsbeiwerte unmittelbar zusammengesetzter Rohrbögen (b), in Anlehnung an [60] . . .	110
A.4 Umlenkverlustanteil (a) und Änderungsfaktor Γ_{Re} (b) eines Rohrbogens, in Anlehnung an [60]	111
A.5 Vergleich Anlagenkennlinie und Betriebspunkt von Brunnen D, mit kom- plett geöffnetem Schieber und im regulären Betrieb	114
A.6 Brunnenkopfskizze mit Abmessungen von Brunnen D	116
A.7 Ablauf der Parameterbestimmung für das WSP-Absenkmodell	117
A.8 Gesamtansicht von Abbildung 4.8 aller Betriebsmessungen; Steigung der Anlagenkennlinie in Abhängigkeit von der Fördermenge (Br. D, 2015) . .	118
A.9 Häufigkeitsverteilung der basierend auf der AKL-Steigung m berechneten Druckverlustbeiwerte $\zeta_{V,m}$ (Brunnen D, Kalenderjahr 2015)	118
A.10 Betrieb von Brunnen A im Kalenderjahr 2015, Schalthäufigkeit in Abhän- gigkeit vom Ausgangswasserspiegel	119
A.11 Absenkkurven von Brunnen B (Betriebsdaten von 2015)	120

A.12 Absenkung von Brunnen B im Verhältnis zur Fördermenge (Betriebsdaten von 2015)	120
A.13 Vergleich zwischen Regression und Messdaten der WSP-Absenkung von Brunnen B (Betriebsdaten von 2015)	121
A.14 AKL-Steigung m und Druckverlustbeiwert $\zeta_{V,m}$ von Brunnen B	122
A.15 AKL-Steigung für Brunnen B, Regression auf Datenbasis 2015	122
A.16 Simulationsergebnisse für Brunnen B bei unterschiedlichem Ausgangswasserspiegel $h_{\text{WSP},0}$	123
A.17 Absenkkurven von Brunnen C (Betriebsdaten von 2015)	124
A.18 Absenkung von Brunnen C im Verhältnis zur Fördermenge (Betriebsdaten von 2015)	124
A.19 Vergleich zwischen Regression und Messdaten der WSP-Absenkung von Brunnen C (Betriebsdaten von 2015)	125
A.20 AKL-Steigung m und Druckverlustbeiwert $\zeta_{V,m}$ von Brunnen C	126
A.21 AKL-Steigung für Brunnen C, Regression auf Datenbasis 2015	126
A.22 Simulationsergebnisse für Brunnen C bei unterschiedlichem Ausgangswasserspiegel $h_{\text{WSP},0}$	127
A.23 Betrieb von Brunnen I im Kalenderjahr 2015, Schalthäufigkeit in Abhängigkeit vom Ausgangswasserspiegel	128
A.24 Absenkkurven von Brunnen D, exemplarisch für das Auswertungsintervall Nummer 7 ($h_{\text{WSP},0,M} = 15,05 \text{ m}$)	128
A.25 Absenkung von Brunnen D im Verhältnis zur Fördermenge, exemplarisch für das Auswertungsintervall Nummer 7 ($h_{\text{WSP},0,M} = 15,05 \text{ m}$)	129
A.26 Vergleich zwischen Regression und Messdaten der WSP-Absenkung von Brunnen D (Auswertungsintervall Nummer 7, $h_{\text{WSP},0,M} = 15,05 \text{ m}$)	129
A.27 Regressionskoeffizient für das WSP-Absenkmmodell von Brunnen D	130
A.28 AKL-Steigung m und Druckverlustbeiwert $\zeta_{V,m}$ von Brunnen D	131
A.29 AKL-Steigung für Brunnen D, Regression auf Datenbasis 2015	131
A.30 Simulationsergebnisse für Brunnen D bei unterschiedlichem Ausgangswasserspiegel $h_{\text{WSP},0}$	132
A.31 Betrieb von Brunnen E im Kalenderjahr 2015, Schalthäufigkeit in Abhängigkeit vom Ausgangswasserspiegel	133
A.32 Absenkkurven von Brunnen E, exemplarisch für das Auswertungsintervall Nummer 10 ($h_{\text{WSP},0,M} = 26,63 \text{ m}$)	133
A.33 Absenkung von Brunnen E im Verhältnis zur Fördermenge, exemplarisch für das Auswertungsintervall Nummer 10 ($h_{\text{WSP},0,M} = 26,63 \text{ m}$)	134
A.34 Vergleich zwischen Regression und Messdaten der WSP-Absenkung von Brunnen E (Auswertungsintervall Nummer 10, $h_{\text{WSP},0,M} = 26,63 \text{ m}$)	134

A.35 Regressionskoeffizient für das WSP-Absenkmodell von Brunnen E	135
A.36 AKL-Steigung m und Druckverlustbeiwert $\zeta_{V,m}$ von Brunnen E	136
A.37 AKL-Steigung für Brunnen E, Regression auf Datenbasis 2015	136
A.38 Simulationsergebnisse für Brunnen E bei unterschiedlichem Ausgangswasserspiegel $h_{\text{WSP},0}$	137
A.39 Absenkkurven von Brunnen F (Betriebsdaten von 2015)	138
A.40 Absenkung von Brunnen F im Verhältnis zur Fördermenge (Betriebsdaten von 2015)	138
A.41 Vergleich zwischen Regression und Messdaten der WSP-Absenkung von Brunnen F (Betriebsdaten von 2015)	139
A.42 AKL-Steigung m und Druckverlustbeiwert $\zeta_{V,m}$ von Brunnen F	140
A.43 AKL-Steigung für Brunnen F, Regression auf Datenbasis 2015	140
A.44 Simulationsergebnisse für Brunnen F bei unterschiedlichem Ausgangswasserspiegel $h_{\text{WSP},0}$	141
A.45 Absenkkurven von Brunnen G (Betriebsdaten von 2015)	142
A.46 Absenkung von Brunnen G im Verhältnis zur Fördermenge (Betriebsdaten von 2015)	142
A.47 Vergleich zwischen Regression und Messdaten der WSP-Absenkung von Brunnen G (Betriebsdaten von 2015)	143
A.48 AKL-Steigung m und Druckverlustbeiwert $\zeta_{V,m}$ von Brunnen G	144
A.49 AKL-Steigung für Brunnen G, Regression auf Datenbasis 2015	144
A.50 Simulationsergebnisse für Brunnen G bei unterschiedlichem Ausgangswasserspiegel $h_{\text{WSP},0}$	145
A.51 Betrieb von Brunnen H im Kalenderjahr 2015, Schalthäufigkeit in Abhängigkeit vom Ausgangswasserspiegel	146
A.52 Absenkkurven von Brunnen H, exemplarisch für das Auswertungsintervall Nummer 5 ($h_{\text{WSP},0,M} = 17,32 \text{ m}$)	146
A.53 Absenkung von Brunnen H im Verhältnis zur Fördermenge, exemplarisch für das Auswertungsintervall Nummer 5 ($h_{\text{WSP},0,M} = 17,32 \text{ m}$)	147
A.54 Vergleich zwischen Regression und Messdaten der WSP-Absenkung von Brunnen H (Auswertungsintervall Nummer 5, $h_{\text{WSP},0,M} = 17,32 \text{ m}$)	147
A.55 Regressionskoeffizient für das WSP-Absenkmodell von Brunnen H	148
A.56 AKL-Steigung m und Druckverlustbeiwert $\zeta_{V,m}$ von Brunnen H	149
A.57 AKL-Steigung für Brunnen H, Regression auf Datenbasis 2015	149
A.58 Simulationsergebnisse für Brunnen H bei unterschiedlichem Ausgangswasserspiegel $h_{\text{WSP},0}$	150
A.59 Betrieb von Brunnen I im Kalenderjahr 2015, Schalthäufigkeit in Abhängigkeit vom Ausgangswasserspiegel	151

A.60 Absenkkurven von Brunnen I, exemplarisch für das Auswertungsintervall Nummer 6 ($h_{\text{WSP},0,M} = 14,32 \text{ m}$)	151
A.61 Absenkung von Brunnen I im Verhältnis zur Fördermenge, exemplarisch für das Auswertungsintervall Nummer 6 ($h_{\text{WSP},0,M} = 14,32 \text{ m}$)	152
A.62 Vergleich zwischen Regression und Messdaten der WSP-Absenkung von Brunnen I (Auswertungsintervall Nummer 6, $h_{\text{WSP},0,M} = 14,32 \text{ m}$)	152
A.63 Regressionskoeffizient für das WSP-Absenkmmodell von Brunnen I	153
A.64 AKL-Steigung m und Druckverlustbeiwert $\zeta_{V,m}$ von Brunnen I	154
A.65 AKL-Steigung für Brunnen I, Regression auf Datenbasis 2015	154
A.66 Simulationsergebnisse für Brunnen I bei unterschiedlichem Ausgangswas- serspiegel $h_{\text{WSP},0}$	155
A.67 Absenkkurven von Brunnen 12a (Betriebsdaten von 2015)	156
A.68 Absenkung von Brunnen 12a im Verhältnis zur Fördermenge (Betriebs- daten von 2015)	156
A.69 Vergleich zwischen Regression und Messdaten der WSP-Absenkung von Brunnen 12a (Betriebsdaten von 2015)	157
A.70 AKL-Steigung m und Druckverlustbeiwert $\zeta_{V,m}$ von Brunnen 12a	158
A.71 AKL-Steigung für Brunnen 12a, Regression auf Datenbasis 2015	158
A.72 Simulationsergebnisse für Brunnen 12a bei unterschiedlichem Ausgangs- wasserspiegel $h_{\text{WSP},0}$	159
A.73 Absenkkurven von Brunnen 17 (Betriebsdaten von 2015)	160
A.74 Absenkung von Brunnen 17 im Verhältnis zur Fördermenge (Betriebsdaten von 2015)	160
A.75 Vergleich zwischen Regression und Messdaten der WSP-Absenkung von Brunnen 17 (Betriebsdaten von 2015)	161
A.76 AKL-Steigung m und Druckverlustbeiwert $\zeta_{V,m}$ von Brunnen 17	162
A.77 AKL-Steigung für Brunnen 17, Regression auf Datenbasis 2015	162
A.78 Simulationsergebnisse für Brunnen 17 bei unterschiedlichem Ausgangswas- serspiegel $h_{\text{WSP},0}$	163
A.79 Exemplarischer Vergleich zwischen gemessener und simulierter Absenkung. Betrieb von Brunnen D im Kalenderjahr 2015	164
A.80 Exemplarischer Vergleich zwischen gemessener und simulierter Fördermen- ge. Betrieb von Brunnen D im Kalenderjahr 2015	164
A.81 Mittlere, absolute Abweichung der Fördermenge zwischen Simulation und PLS-Messung für Brunnen B, Detailbereich bis 14% Abweichung	165
A.82 Mittlere, relative Abweichung der Fördermenge zwischen Simulation und PLS-Messung in Abhängigkeit von der Betriebszeit für Brunnen B	165

A.83 Mittlere, absolute Abweichung der Fördermenge zwischen Simulation und PLS-Messung für Brunnen C, Detailbereich bis 6 % Abweichung	166
A.84 Mittlere, relative Abweichung der Fördermenge zwischen Simulation und PLS-Messung in Abhängigkeit von der Betriebszeit für Brunnen C	166
A.85 Mittlere, absolute Abweichung der Fördermenge zwischen Simulation und PLS-Messung für Brunnen D, Detailbereich bis 14 % Abweichung	167
A.86 Mittlere, relative Abweichung der Fördermenge zwischen Simulation und PLS-Messung in Abhängigkeit von der Betriebszeit für Brunnen D	167
A.87 Mittlere, absolute Abweichung der Fördermenge zwischen Simulation und PLS-Messung für Brunnen E, Detailbereich bis 10 % Abweichung	168
A.88 Mittlere, relative Abweichung der Fördermenge zwischen Simulation und PLS-Messung in Abhängigkeit von der Betriebszeit für Brunnen E	168
A.89 Mittlere, absolute Abweichung der Fördermenge zwischen Simulation und PLS-Messung für Brunnen F, Detailbereich bis 20 % Abweichung	169
A.90 Mittlere, relative Abweichung der Fördermenge zwischen Simulation und PLS-Messung in Abhängigkeit von der Betriebszeit für Brunnen F	169
A.91 Mittlere, absolute Abweichung der Fördermenge zwischen Simulation und PLS-Messung für Brunnen G, Detailbereich bis 12 % Abweichung	170
A.92 Mittlere, relative Abweichung der Fördermenge zwischen Simulation und PLS-Messung in Abhängigkeit von der Betriebszeit für Brunnen G	170
A.93 Mittlere, absolute Abweichung der Fördermenge zwischen Simulation und PLS-Messung für Brunnen H, Detailbereich bis 6 % Abweichung	171
A.94 Mittlere, relative Abweichung der Fördermenge zwischen Simulation und PLS-Messung in Abhängigkeit von der Betriebszeit für Brunnen H	171
A.95 Mittlere, absolute Abweichung der Fördermenge zwischen Simulation und PLS-Messung für Brunnen I, Detailbereich bis 14 % Abweichung	172
A.96 Mittlere, relative Abweichung der Fördermenge zwischen Simulation und PLS-Messung in Abhängigkeit von der Betriebszeit für Brunnen I	172
A.97 Mittlere, absolute Abweichung der Fördermenge zwischen Simulation und PLS-Messung für Brunnen 12a, Detailbereich bis 30 % Abweichung	173
A.98 Mittlere, relative Abweichung der Fördermenge zwischen Simulation und PLS-Messung in Abhängigkeit von der Betriebszeit für Brunnen 12a	173
A.99 Mittlere, absolute Abweichung der Fördermenge zwischen Simulation und PLS-Messung für Brunnen 17, Detailbereich bis 35 % Abweichung	174
A.100 Mittlere, relative Abweichung der Fördermenge zwischen Simulation und PLS-Messung in Abhängigkeit von der Betriebszeit für Brunnen 17	174

Tabellenverzeichnis

2.1	Orientierungswerte für spezifische Durchlässigkeit k_0 und Durchlässigkeit k_f verschiedener Bodenarten [44]	10
2.2	Orientierungswerte für Durchlässigkeiten (k_f -Werte) von Festgesteinen [44]	11
3.1	Aufteilung der Rohwassermenge im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern-Ost	20
4.1	Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaß der Auswertungsintervalle (Brunnen D, Regression des Quotienten s/Q)	38
4.2	Linear angepasste Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaß der Auswertungsintervalle (Brunnen D, Regression des Quotienten s/Q)	40
4.3	Modellparameter für das WSP-Absenkmodell von Brunnen D	41
4.4	Abgeschätzte Druckverlustbeiwerte ζ_V für Steigleitung und Brunnenkopf von Brunnen D	46
5.1	Koeffizienten und Bestimmtheitsmaß der Regression der AKL-Steigung m für Brunnen D	64
5.2	Übersicht über das betriebsbedingte WSP-Absenkverhalten der Brunnen im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern-Ost (Betriebsdaten 2015)	66
5.3	Messabweichung für die im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern-Ost verwendeten Messinstrumente, gemäß den Herstellerangaben [5, 6, 7, 59]	73
A.1	Daten zum Austausch der Brunnenpumpen im Zeitraum 2016/17 [16, 45]	104
A.2	Brunnendaten der Förderstränge Saupferchtal und Lauterspring (Stand zum 31.12.2017)	105
A.3	Im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern-Ost verbaute Mess- und Regelungstechnik (Stand zum 31.12.2017)	106
A.4	Durchschnittliche Schaltzeit der Brunnen im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern-Ost	107
A.5	Diffusor mit stetiger Querschnittserweiterung, Verlustkennwert κ in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel α_D [65]	113
A.6	Datenauszug der Feldmessungen am Brunnen D vom 26.11.2014	113

A.7	Koeffizienten und Bestimmtheitsmaß der Regression des Quotienten s/Q gemäß Gleichung (4.1) für Brunnen B	121
A.8	Druckverlustmodell für Brunnen B, Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaß gemäß Gleichung (4.13), Datenbasis 2015	122
A.9	Koeffizienten und Bestimmtheitsmaß der Regression des Quotienten s/Q gemäß Gleichung (4.1) für Brunnen C	125
A.10	Druckverlustmodell für Brunnen C, Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaß gemäß Gleichung (4.13), Datenbasis 2015	126
A.11	Linear angepasste Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaß der Auswertungsintervalle (Regression s/Q für Brunnen D, 2015)	130
A.12	Allgemeine Regressionskoeffizienten gemäß Gleichung (4.5) für das WSP-Absenkmmodell von Brunnen D (Datenbasis 2015).	130
A.13	Druckverlustmodell für Brunnen D, Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaß gemäß Gleichung (4.13), Datenbasis 2015	131
A.14	Linear angepasste Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaß der Auswertungsintervalle (Regression s/Q für Brunnen E, 2015)	135
A.15	Allgemeine Regressionskoeffizienten gemäß Gleichung (4.5) für das WSP-Absenkmmodell von Brunnen E (Datenbasis 2015).	135
A.16	Druckverlustmodell für Brunnen E, Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaß gemäß Gleichung (4.13), Datenbasis 2015	136
A.17	Koeffizienten und Bestimmtheitsmaß der Regression des Quotienten s/Q gemäß Gleichung (4.1) für Brunnen F	139
A.18	Druckverlustmodell für Brunnen F, Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaß gemäß Gleichung (4.13), Datenbasis 2015	140
A.19	Koeffizienten und Bestimmtheitsmaß der Regression des Quotienten s/Q gemäß Gleichung (4.1) für Brunnen G	143
A.20	Druckverlustmodell für Brunnen G, Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaß gemäß Gleichung (4.13), Datenbasis 2015	144
A.21	Linear angepasste Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaß der Auswertungsintervalle (Regression s/Q für Brunnen H, 2015)	148
A.22	Allgemeine Regressionskoeffizienten gemäß Gleichung (4.5) für das WSP-Absenkmmodell von Brunnen H (Datenbasis 2015).	148
A.23	Druckverlustmodell für Brunnen H, Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaß gemäß Gleichung (4.13), Datenbasis 2015	149
A.24	Linear angepasste Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaß der Auswertungsintervalle (Regression s/Q für Brunnen I, 2015)	153
A.25	Allgemeine Regressionskoeffizienten gemäß Gleichung (4.5) für das WSP-Absenkmmodell von Brunnen I (Datenbasis 2015).	153

A.26 Druckverlustmodell für Brunnen I, Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaß gemäß Gleichung (4.13), Datenbasis 2015	154
A.27 Koeffizienten und Bestimmtheitsmaß der Regression des Quotienten s/Q gemäß Gleichung (4.1) für Brunnen 12a	157
A.28 Druckverlustmodell für Brunnen 12a, Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaß gemäß Gleichung (4.13), Datenbasis 2015	158
A.29 Koeffizienten und Bestimmtheitsmaß der Regression des Quotienten s/Q gemäß Gleichung (4.1) für Brunnen 17	161
A.30 Druckverlustmodell für Brunnen 17, Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaß gemäß Gleichung (4.13), Datenbasis 2015	162
A.31 Messprogramm zur Detektierung der Betriebsbeeinflussung von Brunnen 17, in Anlehnung an [45]	175
A.32 Messprogramm zur Detektierung der Betriebsbeeinflussung von Brunnen F, in Anlehnung an [45]	176

Kurzfassung

In der Bundesrepublik Deutschland wird ein Großteil des Grundwassers durch Vertikalbrunnen gefördert. Um den Brunnenbetrieb hinsichtlich energetischer und betriebstechnischer Aspekte zu optimieren oder eine auf das Betriebs- bzw. Absenkverhalten des Brunnens angepasste Pumpenneuauslegung zu realisieren, werden spezielle Betriebsmodelle benötigt. Innerhalb dieser Arbeit wird eine Methode zur hydraulischen Modellierung von Vertikalbrunnen vorgestellt. Die Methode basiert dabei auf Messgrößen bzw. Betriebsdaten, die i. d. R. vom Prozessleitsystem des Wasserversorgers aufgezeichnet werden.

Anwendung findet die entwickelte Methode bei der Betriebsmodellierung der Vertikalbrunnen im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern-Ost der SWK Stadtwerke Kaiserslautern Versorgungs-AG. Im Rahmen des Verbundprojektes H₂Opt wurden über einen Zeitraum von drei Jahren kontinuierlich Betriebsdaten der elf aktiven Brunnen des Gewinnungsgebietes gesammelt. Basierend auf diesen Betriebsdaten wird die Methode zur hydraulischen Modellierung entwickelt und getestet.

Die innerhalb dieser Arbeit vorgestellte Modellierungsmethode für Vertikalbrunnen ist in zwei Teilmodelle gegliedert. Ein Teilmodell beschreibt die betriebsbedingte Absenkung des Wasserspiegels im Brunnenschacht. Diese Absenkung ist abhängig von der Betriebszeit des Brunnens, von der Fördermenge und vom Ausgangswasserspiegel, welcher unmittelbar vor dem Betrieb der Pumpe gemessen wird. Das zweite Teilmodell beschreibt die Steigung der Anlagenkennlinie, wodurch die Druckverluste vom Brunnenschacht bis zum Brunnenkopf berücksichtigt werden. Mit Hilfe von Analyseprogrammen werden die brunnenpezifischen Modellparameter beider Teilmodelle ermittelt. Die Kalibrierung der Modellparameter erfolgt dabei basierend auf den Betriebsdaten des Kalenderjahres 2015. Durch die Kombination beider Teilmodelle kann die Anlagenkennlinie eines Vertikalbrunnens in Abhängigkeit von der Betriebsdauer und des Ausgangswasserspiegels bestimmt und somit der Betrieb der Brunnenpumpe simuliert werden. Zur Validierung wurde der Brunnenbetrieb der Jahre 2015 und 2016 gemäß dem Vertikalbrunnenmodell simuliert und mit den vom Prozessleitsystem aufgenommenen Messdaten verglichen. Diese Gegenüberstellung belegt die Anwendbarkeit der Modellierungsmethode auf die Vertikalbrunnen.

Abstract

Approximately two-thirds of the drinking water in Germany comes from wells and springs. A majority of this groundwater is pumped by vertical wells. In order to improve water procurement with regard to energetic and technical aspects, or to realize a well-adapted new pump selection, operating models are required. Within this work a method is developed for the hydraulic modelling of vertical wells. This method is based on operating data which is generally recorded by the process control system of the water supplier.

The developed method is applied in the operational modelling of vertical wells in the water procurement area East Kaiserslautern. This procurement area is part of the SWK Stadtwerke Kaiserslautern Versorgungs-AG supply facility and includes eleven operating wells and one spring. Within the scope of the project H₂Opt, operating data of the vertical wells were continuously collected over a period of three years. Based on these operating data, a method for the hydraulic modelling of vertical wells will be developed and tested.

The modeling method presented in this thesis is divided into two submodels. The first submodel describes the operational drawdown of the water level in the well. The lowering of the water level depends on the operating time, the flow rate and the initial water level, which is measured immediately before the pump is switched on. The second submodel describes the gradient of the system characteristic curve, taking into account the pressure losses from the well shaft to the well head. With the help of analysis programs, the well-specific model parameters of both submodels are calculated. The calibration of the model parameters is based on the operating data of the year 2015. By combining both submodels, the system characteristic curve of a vertical well can be determined depending on operating time and initial water level. In this way, the operation of the vertical well pump can be simulated depending on these two variables. For validation, the well operation of the years 2015 and 2016 was simulated with the vertical well model and compared with the measured data recorded by the process control system. This comparison demonstrates the applicability of this modelling method for vertical wells.