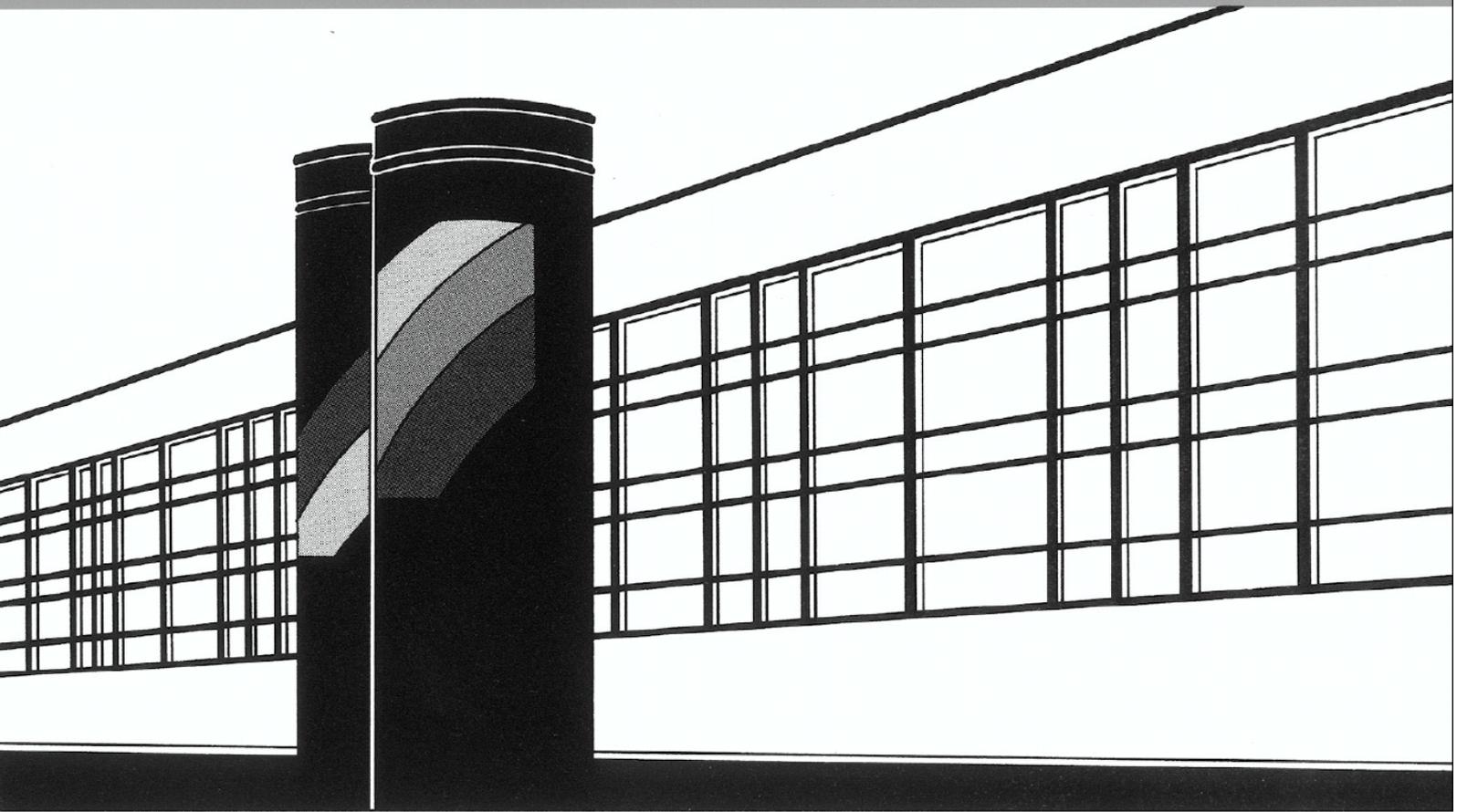


Universität Stuttgart



Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung

Mitteilungen



Heft 262 Tobias Gebler

Statistische Auswertung von simulierten
Talsperrenüberwachungsdaten zur
Identifikation von Schadensprozessen an
Gewichtsstaumauern

**Statistische Auswertung von simulierten
Talsperrenüberwachungsdaten zur Identifikation von
Schadensprozessen an Gewichtsstaumauern**

von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der
Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Tobias Gebler
aus Bad Säckingen

Hauptberichterin: Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht

Mitberichter: Prof. Dr. techn. Gerald Zenz

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Oktober 2018

Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung
der Universität Stuttgart
2018

Heft 262 **Statistische Auswertung von
simulierten
Talsperrenüberwachungs-
daten zur Identifikation von
Schadensprozessen an
Gewichtsstaumauern**

von
Dr.-Ing.
Tobias Gebler

**D93 Statistische Auswertung von simulierten
Talsperrenüberwachungsdaten zur Identifikation von
Schadensprozessen an Gewichtsstaumauern**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Gebler, Tobias:
Statistische Auswertung von simulierten Talsperrenüberwachungsdaten zur
Identifikation von Schadensprozessen an Gewichtsstaumauern, Universität
Stuttgart. - Stuttgart: Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung,
2018

(Mitteilungen Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität
Stuttgart: H. 262)

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2018
ISBN 978-3-942036-66-5

NE: Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung <Stuttgart>: Mitteilungen

Gegen Vervielfältigung und Übersetzung bestehen keine Einwände, es wird lediglich um Quellenangabe gebeten.

Herausgegeben 2018 vom Eigenverlag des Instituts für Wasser- und Umweltsystemmodellierung

Druck: DCC Kästl e.K., Ostfildern

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all jenen bedanken, die mich fachlich und moralisch unterstützt und somit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Ein paar Personen darf ich dabei besonders hervorheben.

Mein Dank gilt zuerst meiner Hauptberichterin Frau Professor Dr.-Ing. Silke Wieprecht für die Anregungen sowie die fachliche Betreuung. Durch die Möglichkeiten, mich intensiv mit vertieften Sicherheitsüberprüfungen von Talsperren auseinanderzusetzen, konnte ich mir die Grundlagen für diese Arbeit erarbeiten.

Für das Interesse an dieser Arbeit und die Bereitschaft zu fachlichen Diskussionen danke ich meinem Mitberichter Professor Dr. techn. Gerald Zenz, ebenso Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Manfred Bischoff für die spontane Bereitschaft zur Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Besonders bedanke ich mich bei Dr.-Ing. Jörg Franke für die vielen Ratschläge, die aufmunternden Worte und wertvollen fachlichen Anmerkungen die sehr zum Erfolg der Arbeit beigetragen haben. Vielen Dank auch allen ehemaligen Kollegen am Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft für die sehr schöne gemeinsame Zeit und das angenehme Arbeitsklima.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Talsperrenbetreibern, die mir Ihre Messdaten für die statistischen Auswertungen zur Verfügung gestellt haben.

Bedanken möchte ich mich auch bei den Verantwortlichen der Schluchseewerk AG für die an mich übertragenen spannenden Projekte im Bereich Talsperrensanierung und Talsperrenüberwachung. Somit konnte ich meine theoretischen Kenntnisse durch Erfahrungen aus der Praxis ergänzen.

Mein Dank gilt auch Familie Schneider für die Durchsicht des englischen Abstracts.

Nicht zuletzt bedanke ich mich herzlich bei meiner Familie und insbesondere bei meinem Vater für die sorgfältige Durchsicht meiner Arbeit sowie bei meiner Frau Thi Thi für die viele Zeit die sie investiert hat, um mir die Freiräume zur Erstellung dieser Arbeit zu ermöglichen.

Bad Säckingen, im Oktober 2018

Tobias Gebler

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Kurzfassung	xv
Abstract	xvii
1 Einführung	1
2 Statistische Grundlagen	5
3 Schadensereignisse bei Gewichtsstau- mauern	31
4 Idealisiertes Referenzbauwerk	45
5 Betreiberumfrage zu Talsperrenüberwachungsdaten von Gewichtsstau- mauern	65
6 Finite-Elemente-Modellierung der idealisierten Mauer	77
7 Bayessche Netze zur Interpretation von Talsperrenüberwachungsdaten	115
8 Auswertung der Bayesschen Netze	127
9 Fazit	141
Literaturverzeichnis	145
A Verteilungsfunktionen	155
B Beispiele für Bayessche Netze	157
C Ursachen historischer Schadensereignisse von Gewichtsstau- mauern	167
D Fragebogen zur Betreiberumfrage Talsperrenüberwachungsdaten von Gewichtsstau- mauern	171
E Statistische Auswertung der simulierten Überwachungsdaten	183
F Generierte Talsperrenmessdaten der geschädigten Mauer	187

G	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafeln für das Bayessche Netz zur Interpretation von Talsperrenüberwachungsdaten	193
H	Diagramme der Auswertung der Bayesschen Netze	231

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Die Funktionen von Talsperren	1
Abb. 1.2	Zerstörte Bouzey Talsperre im Jahr 1895 (Roch, 2015)	2
Abb. 2.1	Flussdiagramm zur Durchführung einer multiplen linearen Regressionsanalyse in Anlehnung an Backhaus u. a. (2011)	6
Abb. 2.2	Punktwolken zur Überprüfung der Modellprämissen der Regressionsanalyse	10
Abb. 2.3	Venn-Diagramme zur Darstellung des Zusammenhangs der Varianz dreier Variablen	11
Abb. 2.4	Exemplarische Darstellung eines weißen Rauschens, eines AR(2)-, MA(2)- und ARMA(2,2)-Prozesses	16
Abb. 2.5	Flussdiagramm zur Durchführung der Zeitreihenanalyse	18
Abb. 2.6	Venn-Diagramme zur Veranschaulichung des Additionsansatzes nach Sachs (1971)	24
Abb. 2.7	Beispielnetz (Ertel, 2009)	26
Abb. 3.1	Globale Versagensmechanismen bei Gewichtsstaumauern	33
Abb. 3.2	Anzeichen vor dem Eintritt der historischen Versagensfälle von Gewichtsstaumauern (Datengrundlage: Douglas u. a. (1998))	35
Abb. 3.3	Verteilung der Wasserspiegellagen während der Versagensereignissen von Gewichtsstaumauern (Datengrundlage: Douglas u. a. (1998))	36
Abb. 3.4	Prozentuale Häufigkeit der den Bauwerkskomponenten der Gewichtsstaumauern zugeordneten Schädigungen	37
Abb. 3.5	Prozentuale Häufigkeit geeigneter Untersuchungsmaßnahmen zur Identifizierung von Talsperrenschädigungen	38
Abb. 3.6	Auswahl möglicher Schadensfälle bei Gewichtsstaumauern	40
Abb. 4.1	Räumliche Lage der 82 deutschen Gewichtsstaumauern (mit $H > 15$ m) und ausgewählte Wetterstationen des DWD	46
Abb. 4.2	Jahr der Inbetriebnahme der 82 deutschen Gewichtsstaumauern (mit $H > 15$ m)	47
Abb. 4.3	Idealisiertes Referenzbauwerk: Abmessungen der Mauer (links), Lage der Überwachungseinrichtungen (rechts)	49
Abb. 4.4	Materialbereiche im Berechnungsmodell der idealisierten Mauer	51
Abb. 4.5	Spannungs-Dehnungsbeziehung des Sperrenbetons im Druck- und Zugbereich	53
Abb. 4.6	Gesteinsarten im Gründungsbereich der Gewichtsstaumauern	55
Abb. 4.7	Mohr-coulombsches Bruchkriterium für den Felsuntergrund	57
Abb. 4.8	Gefügemodell des Felsuntergrunds der idealisierten Gewichtsstaumauer in Anlehnung an Wittke (1984)	58

Abb. 5.1	Messprogramm der an der Umfrage beteiligten Gewichtsstaumauern	68
Abb. 5.2	Median und Standardabweichung des Sickerwasserabflusses der an der Umfrage beteiligten Gewichtsstaumauern	69
Abb. 5.3	Quantilabstand der Gewichtslotbewegung der an der Umfrage beteiligten Gewichtsstaumauern	70
Abb. 5.4	Potenzialabbau an der Mauersohle der an der Umfrage beteiligten Gewichtsstaumauern (Maximalwerte)	71
Abb. 5.5	Güte der Regressionsmodelle für die Überwachungsdaten aus der Umfrage	73
Abb. 5.6	Darstellung der Varianzanteile der Überwachungsdaten aus der Umfrage für die jeweiligen Messgeräte	74
Abb. 6.1	Flussdiagramm zur Durchführung einer Sickerströmungsberechnung unter Berücksichtigung der Sickerlinie	82
Abb. 6.2	Flussdiagramm zur Durchführung einer gekoppelten Sickerströmungsberechnung und strukturmechanischen Berechnung zur Berücksichtigung der klaffenden Fuge	86
Abb. 6.3	Abmessungen des Berechnungsmodells	87
Abb. 6.4	Diskretisierung der Mauer und des Untergrundes	89
Abb. 6.5	Generierte repräsentative Zeitreihen für die Stauhöhe und die Lufttemperatur	90
Abb. 6.6	Jahreszeitlich tiefenabhängige Temperaturschichtung in einer Talsperre . .	92
Abb. 6.7	Idealisierter Ansatz zur Festlegung der tiefenabhängigen Wassertemperatur	92
Abb. 6.8	Simulationsablauf der instationären Berechnung der Mauer unter normalen Bedingungen zur Validierung des FE-Modells	94
Abb. 6.9	Flussdiagramm zur Ermittlung der erosionsgefährdeten Bereiche im Untergrund	100
Abb. 6.10	Erosionsgefährdeter Untergrundbereich der Gewichtsstaumauer ohne Untergrunddrainage	100
Abb. 6.11	Erosionsgefährdete Untergrundbereiche der Gewichtsstaumauer mit Untergrunddrainage	101
Abb. 6.12	Simulationsablauf der stationären Berechnung zu Ermittlung der Talsperrenmessdaten des geschädigten Referenzbauwerks	104
Abb. 6.13	Simulationsablauf der stationären Berechnung zur Ermittlung der kritischen Überstauhöhe des geschädigten Referenzbauwerks	108
Abb. 6.14	Darstellung der Bewegung der Mauer ohne Untergrunddrainage für verschiedene Belastungszustände (a: Stauziel, b: Kronenstau, c: 2,0 m überstaute Krone, d: 4,6 m überstaute Krone)	109
Abb. 6.15	Darstellung der plastischen Dehnung infolge der Zugbeanspruchung für verschiedene Belastungszustände der Mauer ohne Untergrunddrainage (a: Stauziel, b: Kronenstau, c: 2,0 m überstaute Krone, d: 4,6 m überstaute Krone)	110
Abb. 6.16	Kritische Überstauhöhe des geschädigten Referenzbauwerks ohne Untergrunddrainage	111
Abb. 6.17	Kritische Überstauhöhe des geschädigten Referenzbauwerks mit Untergrunddrainage	111
Abb. 7.1	Bayessches Netz zur Interpretation von Überwachungsdaten von Gewichtsstaumauern ohne Untergrunddrainage	117

Abb. 7.2	Bayessches Netz zur Interpretation von Überwachungsdaten von Gewichtsstau- mauern mit Untergrunddrainage	118
Abb. 7.3	Netzausschnitte für die Nützlichkeitsknoten <i>Ergebnis Kein Schaden</i> (links) und <i>Ergebnis Kritische Höhe</i> (rechts)	126
Abb. 8.1	Netzauswertung einer einzelnen Sickerwassermessung der Mauer ohne Un- tergrunddrainage	128
Abb. 8.2	Netzauswertung einer einzelnen Sickerwassermessung der Mauer mit Un- tergrunddrainage	129
Abb. 8.3	Netzauswertung von unterschiedlich langen Zeitreihen täglicher Sickerwas- sermesswerte der Mauer ohne Untergrunddrainage	131
Abb. 8.4	Netzauswertung von unterschiedlich langen Zeitreihen täglicher Sickerwas- sermesswerte der Mauer mit Untergrunddrainage	133
Abb. 8.5	Netzauswertung von Sickerwassermessdaten eines Jahres mit unterschied- lichen Messintervallen der Mauer ohne Untergrunddrainage	134
Abb. 8.6	Netzauswertung von Sickerwassermessdaten eines Jahres mit unterschied- lichen Messintervallen der Mauer mit Untergrunddrainage	135
Abb. 8.7	Netzauswertung von täglichen Sickerwassermessdaten eines Jahres in Be- zug auf mögliche Talsperrenschädigungen der Mauer ohne Untergrund- drainage	137
Abb. 8.8	Netzauswertung von täglichen Sickerwassermessdaten eines Jahres in Be- zug auf mögliche Talsperrenschädigungen der Mauer mit Untergrunddrai- nage	138
Abb. A.1	Dichtefunktion der Normalverteilung und Sonderfall Standardnormalver- teilung mit $\mu = 0$ und $\sigma = 1$	155
Abb. A.2	Dichtefunktion der t Location-Scale Verteilung und Sonderfall Standard- normalverteilung mit $\mu = 0$, $\sigma = 1$ und $\nu = \infty$	156
Abb. B.1	Beispiel Fabrik: Bayessches Netz und Wahrscheinlichkeitstabellen	157
Abb. B.2	Beispiel Fabrik Fall 1: Ergebnis Netzberechnung	158
Abb. B.3	Beispiel Fabrik Fall 2: Ergebnis Netzberechnung mit Vorinformation „Fabrik betreibt nur Maschine 3“	159
Abb. B.4	Beispiel Fabrik Fall 3: Ergebnis Netzberechnung mit Vorinformation „Pro- dukt defekt“	160
Abb. B.5	Beispiel Alarm: Bayessches Netz	161
Abb. B.6	Beispiel Alarm: Wahrscheinlichkeitstabellen	162
Abb. B.7	Beispiel Alarm: Ergebnis Netzberechnung	164
Abb. B.8	Beispiel Alarm Fall 1: Ergebnis Netzberechnung mit Vorinformation „Ein- bruch hat stattgefunden“	165
Abb. B.9	Beispiel Alarm Fall 2: Ergebnis Netzberechnung mit Vorinformation „Alarm wurde ausgelöst“	166
Abb. B.10	Beispiel Alarm Fall 3: Ergebnis Netzberechnung mit Vorinformation „Ein- bruch hat stattgefunden und Alarm wurde ausgelöst“	166
Abb. D.1	Erläuterungen zum Erhebungsbogen Seite 1	172
Abb. D.2	Erläuterungen zum Erhebungsbogen Seite 2	173
Abb. D.3	Tabellenblatt 1: Kontaktdaten und Angaben zur Talsperre	175

Abb. D.4	Tabellenblatt 2: Wasserstand	176
Abb. D.5	Tabellenblatt 3: Temperatur	177
Abb. D.6	Tabellenblatt 4: Sickerwasserabfluss	178
Abb. D.7	Tabellenblatt 5: Gewichtslot	179
Abb. D.8	Tabellenblatt 6: Schwimmlot	180
Abb. D.9	Tabellenblatt 7: Sohlpiezometer 1	181
Abb. E.1	Median und Standardabweichung des Sickerwasserabflusses der idealiserten Mauer im Vergleich zu den an der Umfrage beteiligten Gewichtsstau- mauern	183
Abb. E.2	Quantilabstand $Q_{0,975}$ bis $Q_{0,025}$ der Gewichtslotbewegung der idealisierten Mauer im Vergleich zu den an der Umfrage beteiligten Gewichtsstau- mauern	184
Abb. E.3	Potenzialabbau an der Mauersohle der idealisierten Mauer im Vergleich zu den an der Umfrage beteiligten Gewichtsstau- mauern (Höchstwerte $Q_{0,975}$)	184
Abb. E.4	Güte der Regressionsmodelle für die simulierten Überwachungsdaten der idealisierten Mauer mit Untergrund- drainage	185
Abb. E.5	Güte der Regressionsmodelle für die simulierten Überwachungsdaten der idealisierten Mauer ohne Untergrund- drainage	185
Abb. E.6	Darstellung der Varianzanteile der simulierten Überwachungsdaten der idealisierten Mauer mit Untergrund- drainage	186
Abb. E.7	Darstellung der Varianzanteile der simulierten Überwachungsdaten der idealisierten Mauer ohne Untergrund- drainage	186
Abb. F.1	Sickerwasserabfluss des geschädigten Referenzbauwerks ohne Untergrund- drainage	187
Abb. F.2	Gewichtslotbewegung des geschädigten Referenzbauwerks ohne Unter- grunddrainage (je kleiner der Wert, desto stärker bewegt sich die Korne gegenüber der Aufstandsfläche in Richtung Wasserseite)	187
Abb. F.3	Schwimmlotbewegung des geschädigten Referenzbauwerks ohne Unter- grunddrainage (je kleiner der Wert, desto stärker bewegt sich die Auf- standsfläche gegenüber dem Felsuntergrund in Richtung Wasserseite)	188
Abb. F.4	Druckhöhe am Piezometer 1 des geschädigten Referenzbauwerks ohne Un- tergrunddrainage	188
Abb. F.5	Druckhöhe am Piezometer 2 des geschädigten Referenzbauwerks ohne Un- tergrunddrainage	189
Abb. F.6	Druckhöhe am Piezometer 3 des geschädigten Referenzbauwerks ohne Un- tergrunddrainage	189
Abb. F.7	Sickerwasserabfluss des geschädigten Referenzbauwerks mit Untergrund- drainage	190
Abb. F.8	Gewichtslotbewegung des geschädigten Referenzbauwerks mit Unter- grunddrainage (je kleiner der Wert, desto stärker bewegt sich die Korne gegenüber der Aufstandsfläche in Richtung Wasserseite)	190
Abb. F.9	Schwimmlotbewegung des geschädigten Referenzbauwerks mit Unter- grunddrainage (je kleiner der Wert, desto stärker bewegt sich die Auf- standsfläche gegenüber dem Felsuntergrund in Richtung Wasserseite)	191
Abb. F.10	Druckhöhe am Piezometer 1 des geschädigten Referenzbauwerks mit Un- tergrunddrainage	191

Abb. F.11	Druckhöhe am Piezometer 2 des geschädigten Referenzbauwerks mit Untergrunddrainage	192
Abb. F.12	Druckhöhe am Piezometer 3 des geschädigten Referenzbauwerks mit Untergrunddrainage	192
Abb. H.1	Netzauswertung einer einzelnen Gewichtslotmessung der Mauer ohne Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Krone gegenüber der Maueraufstandsfläche in Richtung Wasserseite.	231
Abb. H.2	Netzauswertung einer einzelnen Schwimmlotmessung der Mauer ohne Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Maueraufstandsfläche gegenüber dem Felsuntergrund in Richtung Wasserseite.	232
Abb. H.3	Netzauswertung einer Einzelmessung des Piezometers 1 der Mauer ohne Untergrunddrainage	232
Abb. H.4	Netzauswertung einer Einzelmessung des Piezometers 2 der Mauer ohne Untergrunddrainage	233
Abb. H.5	Netzauswertung einer Einzelmessung des Piezometers 3 der Mauer ohne Untergrunddrainage	233
Abb. H.6	Netzauswertung einer einzelnen Gewichtslotmessung der Mauer mit Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Krone gegenüber der Maueraufstandsfläche in Richtung Wasserseite.	234
Abb. H.7	Netzauswertung einer einzelnen Schwimmlotmessung der Mauer mit Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Maueraufstandsfläche gegenüber dem Felsuntergrund in Richtung Wasserseite.	234
Abb. H.8	Netzauswertung einer Einzelmessung des Piezometers 1 der Mauer mit Untergrunddrainage	235
Abb. H.9	Netzauswertung einer Einzelmessung des Piezometers 2 der Mauer mit Untergrunddrainage	235
Abb. H.10	Netzauswertung einer Einzelmessung des Piezometers 3 der Mauer mit Untergrunddrainage	236
Abb. H.11	Netzauswertung von unterschiedlich langen Zeitreihen täglicher Messwerte des Gewichtslotes der Mauer ohne Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Krone gegenüber der Maueraufstandsfläche in Richtung Wasserseite.	237
Abb. H.12	Netzauswertung von unterschiedlich langen Zeitreihen täglicher Messwerte des Schwimmlotes der Mauer ohne Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Maueraufstandsfläche gegenüber dem Felsuntergrund in Richtung Wasserseite.	238
Abb. H.13	Netzauswertung von unterschiedlich langen Zeitreihen täglicher Messwerte des Piezometers 1 der Mauer ohne Untergrunddrainage	238
Abb. H.14	Netzauswertung von unterschiedlich langen Zeitreihen täglicher Messwerte des Piezometers 2 der Mauer ohne Untergrunddrainage	239
Abb. H.15	Netzauswertung von unterschiedlich langen Zeitreihen täglicher Messwerte des Piezometers 3 der Mauer ohne Untergrunddrainage	239

Abb. H.16	Netzauswertung von unterschiedlich langen Zeitreihen täglicher Messwerte des Gewichtslotes der Mauer mit Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Krone gegenüber der Maueraufstandsfläche in Richtung Wasserseite.	240
Abb. H.17	Netzauswertung von unterschiedlich langen Zeitreihen täglicher Messwerte des Schwimmlotes der Mauer mit Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Maueraufstandsfläche gegenüber dem Felsuntergrund in Richtung Wasserseite.	240
Abb. H.18	Netzauswertung von unterschiedlich langen Zeitreihen täglicher Messwerte des Piezometers 1 der Mauer mit Untergrunddrainage	241
Abb. H.19	Netzauswertung von unterschiedlich langen Zeitreihen täglicher Messwerte des Piezometers 2 der Mauer mit Untergrunddrainage	241
Abb. H.20	Netzauswertung von unterschiedlich langen Zeitreihen täglicher Messwerte des Piezometers 3 der Mauer mit Untergrunddrainage	242
Abb. H.21	Netzauswertung von Gewichtslotmessdaten eines Jahres mit unterschiedlichen Messintervallen der Mauer ohne Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Krone gegenüber der Maueraufstandsfläche in Richtung Wasserseite.	243
Abb. H.22	Netzauswertung von Schwimmlotmessdaten eines Jahres mit unterschiedlichen Messintervallen der Mauer ohne Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Maueraufstandsfläche gegenüber dem Felsuntergrund in Richtung Wasserseite.	244
Abb. H.23	Netzauswertung von Messdaten des Piezometers 1 eines Jahres mit unterschiedlichen Messintervallen der Mauer ohne Untergrunddrainage	244
Abb. H.24	Netzauswertung von Messdaten des Piezometers 2 eines Jahres mit unterschiedlichen Messintervallen der Mauer ohne Untergrunddrainage	245
Abb. H.25	Netzauswertung von Messdaten des Piezometers 3 eines Jahres mit unterschiedlichen Messintervallen der Mauer ohne Untergrunddrainage	245
Abb. H.26	Netzauswertung von Gewichtslotmessdaten eines Jahres mit unterschiedlichen Messintervallen der Mauer mit Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Krone gegenüber der Maueraufstandsfläche in Richtung Wasserseite.	246
Abb. H.27	Netzauswertung von Schwimmlotmessdaten eines Jahres mit unterschiedlichen Messintervallen der Mauer mit Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Maueraufstandsfläche gegenüber dem Felsuntergrund in Richtung Wasserseite.	246
Abb. H.28	Netzauswertung von Messdaten des Piezometers 1 eines Jahres mit unterschiedlichen Messintervallen der Mauer mit Untergrunddrainage	247
Abb. H.29	Netzauswertung von Messdaten des Piezometers 2 eines Jahres mit unterschiedlichen Messintervallen der Mauer mit Untergrunddrainage	247
Abb. H.30	Netzauswertung von Messdaten des Piezometers 3 eines Jahres mit unterschiedlichen Messintervallen der Mauer mit Untergrunddrainage	248
Abb. H.31	Netzauswertung von täglichen Gewichtslotmessdaten eines Jahres in Bezug auf mögliche Talsperrenschädigungen der Mauer ohne Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Krone gegenüber der Maueraufstandsfläche in Richtung Wasserseite. . . .	249

Abb. H.32	Netzauswertung von täglichen Schwimmlotmessdaten eines Jahres in Bezug auf mögliche Talsperrenschädigungen der Mauer ohne Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Maueraufstandsfläche gegenüber dem Felsuntergrund in Richtung Wasserseite.	250
Abb. H.33	Netzauswertung von täglichen Messdaten des Piezometers 1 eines Jahres in Bezug auf mögliche Talsperrenschädigungen der Mauer ohne Untergrunddrainage	250
Abb. H.34	Netzauswertung von täglichen Messdaten des Piezometers 2 eines Jahres in Bezug auf mögliche Talsperrenschädigungen der Mauer ohne Untergrunddrainage	251
Abb. H.35	Netzauswertung von täglichen Messdaten des Piezometers 3 eines Jahres in Bezug auf mögliche Talsperrenschädigungen der Mauer ohne Untergrunddrainage	251
Abb. H.36	Netzauswertung von täglichen Gewichtslotmessdaten eines Jahres in Bezug auf mögliche Talsperrenschädigungen der Mauer mit Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Krone gegenüber der Maueraufstandsfläche in Richtung Wasserseite. . . .	252
Abb. H.37	Netzauswertung von täglichen Schwimmlotmessdaten eines Jahres in Bezug auf mögliche Talsperrenschädigungen der Mauer mit Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Maueraufstandsfläche gegenüber dem Felsuntergrund in Richtung Wasserseite.	252
Abb. H.38	Netzauswertung von täglichen Messdaten des Piezometers 1 eines Jahres in Bezug auf mögliche Talsperrenschädigungen der Mauer mit Untergrunddrainage	253
Abb. H.39	Netzauswertung von täglichen Messdaten des Piezometers 2 eines Jahres in Bezug auf mögliche Talsperrenschädigungen der Mauer mit Untergrunddrainage	253
Abb. H.40	Netzauswertung von täglichen Messdaten des Piezometers 3 eines Jahres in Bezug auf mögliche Talsperrenschädigungen der Mauer mit Untergrunddrainage	254

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Anzahl historischer Schadensereignisse bei Gewichtsstaumauern nach Douglas u. a. (1998)	34
Tab. 3.2	Auftretenswahrscheinlichkeit ausgewählter Talsperrenschädigungen nach Douglas u. a. (1998)	39
Tab. 3.3	Schädliche Treibreaktionen im Mörtel oder Beton	41
Tab. 4.1	Statistische Auswertung des deutschen Talsperrenbestands hinsichtlich der Mauerabmessungen	48
Tab. 4.2	Empfehlungen zur Messhäufigkeit und zur maximal zulässigen Messunsicherheit nach DWA-M 514 (2011) und STK (2005a)	63
Tab. 5.1	Ermittelte Standardunsicherheiten aus der Residuenanalyse der Überwachungsdaten	75
Tab. 5.2	Ermittelte Autoregressionsparameter aus der Residuenanalyse der Überwachungsdaten	75
Tab. 6.1	Kriterien zur Anpassung der Materialdurchlässigkeit des FE-Modells beim Auftreten einer klaffenden Fuge	85
Tab. 6.2	Variierte Materialparameter des geschädigten Kernbetons	97
Tab. 6.3	Variierte Materialparameter der geschädigten Vorsatzschale	97
Tab. 6.4	Variierte Randbedingung für die Sickerströmungsberechnung zur Simulation der Schäden an den Mauerdrainagen	98
Tab. 6.5	Materialparameter und Kluftabmessungen für die Berechnung des Schadenszenarios Erosion im Untergrund	99
Tab. 6.6	Variierte Materialparameter des geschädigten Felsuntergrundes im Bereich des Mauerfußes bzw. im Umgebungsbereich der Drainagen	101
Tab. 6.7	Variierte Materialparameter des geschädigten Felsuntergrundes im Bereich unterhalb des Dichtungsschleiers	101
Tab. 6.8	Variierte Materialparameter des geschädigten Dichtungsschleiers	102
Tab. 6.9	Variierte Randbedingung für die Sickerströmungsberechnung zur Simulation der Schäden an den Sohl drainagen	102
Tab. 7.1	Auftretenswahrscheinlichkeit der im Netz für Gewichtsstaumauern ohne Untergrunddrainagen berücksichtigten Talsperrenschädigungen in Anlehnung an Douglas u. a. (1998)	120
Tab. 7.2	Auftretenswahrscheinlichkeit der im Netz für Gewichtsstaumauern mit Untergrunddrainagen berücksichtigten Talsperrenschädigungen in Anlehnung an Douglas u. a. (1998)	121

Tab. 7.3	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Nützlichkeitsknoten <i>Ergebnis Kein Schaden</i> für Mauern ohne Untergrunddrainagen	126
Tab. 7.4	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Nützlichkeitsknoten <i>Ergebnis Kritische Höhe</i> für Mauern ohne Untergrunddrainagen	126
Tab. 8.1	Standardunsicherheiten des Stichprobenmittelwertes $u(y)$ täglicher Messdaten in Abhängigkeit der Zeitreihenlänge	131
Tab. 8.2	Standardunsicherheiten des Stichprobenmittelwertes $u(y)$ von Messdaten eines Jahres mit unterschiedlichen Messintervallen	134
Tab. 9.1	Empfohlene Überwachungsintervalle für verschiedene Messgrößen auf Basis der Berechnungsergebnisse des Bayesschen Netzes im Vergleich zu den Empfehlungen nach DWA-M 514 (2011)	144
Tab. C.1	Ursachen historischer Schadensereignisse von Gewichtsstaumauern nach Douglas u. a. (1998)	168
Tab. G.1	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Zustand der Talsperre</i>	193
Tab. G.2	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>kein Schaden</i>	193
Tab. G.3	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Schaden Mauerker</i> n	194
Tab. G.4	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Schaden Vorsatzschale</i>	194
Tab. G.5	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Schaden Mauerdrainagen</i>	195
Tab. G.6	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Schaden Untergrund</i>	195
Tab. G.7	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Schaden Dichtungsschleier</i>	196
Tab. G.8	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Kritische Höhe</i>	197
Tab. G.9	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Sickerwasser</i>	198
Tab. G.10	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Gewichtslot</i>	199
Tab. G.11	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Schwimmlot</i>	200
Tab. G.12	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Piezometer 1</i>	201
Tab. G.13	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Piezometer 2</i>	202
Tab. G.14	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Piezometer 3</i>	203
Tab. G.15	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Messwert Sickerwasser</i>	204
Tab. G.16	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Messwert Gewichtslot</i>	205
Tab. G.17	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Messwert Schwimmlot</i>	206
Tab. G.18	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Messwert Piezometer 1</i>	207
Tab. G.19	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Messwert Piezometer 2</i>	208
Tab. G.20	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Messwert Piezometer 3</i>	209
Tab. G.21	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Zustand der Talsperre</i>	210
Tab. G.22	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>kein Schaden</i>	210
Tab. G.23	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Schaden Mauerker</i> n	211
Tab. G.24	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Schaden Vorsatzschale</i>	212
Tab. G.25	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Schaden Mauerdrainagen</i>	213
Tab. G.26	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Schaden Untergrund</i>	214
Tab. G.27	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Schaden Dichtungsschleier</i>	215
Tab. G.28	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Schaden Untergrunddrainagen</i>	216
Tab. G.29	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Kritische Höhe</i>	217
Tab. G.30	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Sickerwasser</i>	218

Tab. G.31	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Gewichtslot</i>	219
Tab. G.32	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Schwimmlot</i>	220
Tab. G.33	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Piezometer 1</i>	221
Tab. G.34	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Piezometer 2</i>	222
Tab. G.35	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Piezometer 3</i>	223
Tab. G.36	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Messwert Sickerwasser</i> .	224
Tab. G.37	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Messwert Gewichtslot</i> .	225
Tab. G.38	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Messwert Schwimmlot</i> .	226
Tab. G.39	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Messwert Piezometer 1</i> .	227
Tab. G.40	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Messwert Piezometer 2</i> .	228
Tab. G.41	Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten <i>Messwert Piezometer 3</i> .	229

Kurzfassung

An Talsperren werden auf Grund ihrer bedeutenden Aufgaben einerseits und wegen ihres hohen Gefährdungspotentials für Unterlieger andererseits höchste Anforderungen hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit gestellt. Die Anlagenbetreiber haben für den ordnungsgemäßen Zustand ihrer Bestandsbauwerke Sorge zu tragen. Für die Zustandsbewertung sind zum einen Messeinrichtungen erforderlich, die die maßgeblichen Einwirkungen auf die Mauer, wie beispielsweise den Wasserstand und Umgebungstemperatur, erfassen. Zum anderen ist eine geeignete Instrumentierung einzurichten, die die Bauwerksreaktion (Deformation, Dehnung, Durchsickerung, etc.) aufzeigt. Durch eine angemessene messtechnische Überwachung und Messdatenauswertung in Verbindung mit regelmäßigen visuellen Inspektionen und Funktionskontrollen der sicherheitsrelevanten Betriebseinrichtungen muss ein außergewöhnliches Verhalten der Anlage frühzeitig festgestellt werden. Ziel ist es, durch bauliche oder betriebliche Maßnahmen, die Funktionstüchtigkeit der Talsperre zu gewährleisten, um ein Versagensereignis sicher zu verhindern.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den über 80 in Deutschland errichteten großen Gewichtsstaumauern, die im Durchschnitt bereits ein Alter über 90 Jahren aufweisen und deren Sicherheit und Zuverlässigkeit noch viele weitere Jahrzehnte zu garantieren ist. Die wesentliche Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht darin, eine Hilfestellung zu liefern, um an Hand der zur Verfügung stehenden langjährigen Messreihen aus der Talsperrenüberwachung ein außergewöhnliches Bauwerksverhalten feststellen zu können. Darüber hinaus soll eine Bewertungsmöglichkeit des aktuellen Bauwerkszustandes hinsichtlich des Sicherheitsniveaus erstellt werden.

Einführend werden die Grundlagen der in dieser Arbeit angewendeten statistischen Verfahren erläutert. Dies sind die Regressionsanalyse, die Varianzzerlegung, die Zeitreihenanalyse, die Fortpflanzung von Unsicherheiten und die Wahrscheinlichkeitsrechnung mit Bayesschen Netzen.

Im nächsten Schritt werden weltweit aufgetretene historische Schadensereignisse von Gewichtsstaumauern ausgewertet, um die hierfür hauptursächlichen Schadensbilder zu identifizieren und deren Auftretenswahrscheinlichkeit zu ermitteln.

Da in der Regel keine langjährigen Messdatenreihen der in der Vergangenheit versagten Talsperren verfügbar sind, die die Ableitung von allgemeingültigen Handlungsempfehlungen ermöglichen würden, werden in dieser Arbeit künstliche Talsperrenmessdaten mit Hilfe von numerischen Simulationen generiert. Dafür wird ein idealisiertes Referenzbauwerk mit typischen Abmessungen, Bauwerkskomponenten, Materialkennwerten und Überwachungseinrichtungen konzipiert, das die in Deutschland existierenden Gewichtsstaumauern repräsentiert.

Während im Modell der Mauer jedoch lediglich die beiden wesentlichen Einwirkungen - Wasserlast und Umgebungstemperatur - abgebildet werden, treten in Realität weitere Einflüsse auf, die sich wiederum auf die zu beobachtenden Messgrößen auswirken und somit zu einer wesentlich breiteren Streuung der Daten führen. Im Zuge einer durchgeführten Umfrage wurden von diversen Betreibern Messdaten zu insgesamt 16 Gewichtsstaumauern zur Verfügung gestellt, die einer umfangreichen statistischen Auswertung unterzogen wurden. Somit lässt sich der nicht durch diese beiden Einwirkungen erklärbare mittlere Varianzanteil der Reaktionsgrößen (Sickerwasser, Gewichts- und Schwimmotbewegung sowie Sohldrücke) quantifizieren. Darüber hinaus liefert die Messdatenauswertung weitere Randbedingungen für die in

den nächsten Schritten durchgeführten Analysen.

Einen wesentlichen Teil der Arbeit stellt die Finite-Elemente-Modellierung der idealisierten Mauer dar. Da sich das Sickerwasserströmungsverhalten und somit die Berechnungsergebnisse von Mauern mit und ohne Sohldrainagen grundlegend voneinander unterscheiden, werden beide Ausführungsvarianten getrennt voneinander betrachtet. Nach einer kurzen Erläuterung der in den unterschiedlichen Simulationsschritten Verwendung findenden Berechnungsansätze, wird der Aufbau des Finite-Elemente-Modells dargestellt. Die Validierung des Modells erfolgt über eine instationäre Simulation der Mauer unter normalen betrieblichen Randbedingungen. Die generierten Messdaten werden mit realen Messdaten aus der Betreiberumfrage verglichen. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine Verifizierung der Eignung des Modells und darüber hinaus können auch dessen Grenzen aufgezeigt werden.

Im nächsten Schritt wird das Modell herangezogen, um die sechs zuvor beschriebenen maßgeblichen Schadensszenarien in jeweils vier unterschiedlich starken Ausprägungen zu simulieren, um für diese Mauerzustände künstliche Talsperrenmessdaten zu generieren. Somit wird ein Zusammenhang zwischen den Messdaten und den diese beeinflussenden potentiellen Schadensfällen hergestellt.

Ein weiterer Aspekt dieser Arbeit ist die Ermittlung des Einflusses der jeweiligen Schäden auf das Sicherheitsniveau der Gewichtsstaumauer. Als Bewertungskriterium wird die kritische Überstauhöhe eingeführt. Diese wird als Differenz zwischen der Wasserspiegellage, bei deren Überschreitung ein Versagen der Mauer im numerischen Modell eintritt, und der Lage der Mauerkrone definiert. Die Berechnungsergebnisse der unterschiedlichen Szenarien werden anschaulich in Form von Balkendiagrammen aufbereitet.

Den zentralen Kern der Arbeit bilden die Bayesschen Netze, die auf den wesentlichen Ergebnissen der vorangegangenen Abschnitte basieren. Sie stellen den Zusammenhang zwischen den potentiellen Schadensbildern der Mauer und deren Eintrittswahrscheinlichkeit, dem daraus resultierenden Sicherheitsniveau und den Messwerten her. Vorweg wird die Struktur der Netze mit den zugehörigen Knoten erläutert und die Belegung der zugehörigen bedingten Wahrscheinlichkeitstabellen beschrieben.

Unter Anwendung der Netzberechnung werden Diagramme generiert, die den Mauerzustand beziehungsweise das Sicherheitsniveau der Talsperre in Abhängigkeit der Messwerte aufzeigen. Daraus lassen sich Schlussfolgerungen über die Relevanz der jeweiligen Messeinrichtungen ziehen, sowie Empfehlungen zu sinnvollen Überwachungsintervallen ableiten. Vervollständigt wird die Auswertung durch Darstellungen, die in Abhängigkeit der beobachteten Messwertbetrags aufzeigen, welcher Schadenstyp mit welcher Wahrscheinlichkeit vorliegen könnte.

Abstract

The important functions of a dam on the one hand and the high risk potential for the downstream population on the other hand place great demands on the safety requirements with regard to the reliability of these structures. Operators must ensure that the dams are in good condition and any non-standard behaviour must be detected in good time by carrying out regular visual inspections in combination with an appropriate technical monitoring system. The aim is to guarantee the reliability of the dams with structural or operational measures to reliably prevent incidents from occurring.

This thesis focuses on the more than 80 large gravity dams in Germany, which have an average age of 90 years. Their safety and reliability must be guaranteed for many decades to come. The main objective of this thesis is to provide assistance in detecting non-standard dam behaviour on the basis of the available long-term measurement data gathered from monitoring the dams. In addition, the possibility to carry out an evaluation of the current safety level of the dam should be enabled.

Different statistical methods are adopted in this work. There is a brief introductory explanation of regression analysis, variance decomposition, time series analysis, the propagation of uncertainty and the calculation of probabilities with Bayesian networks.

In the next step historic incidents, which occurred at gravity dams across the world, are evaluated to identify the most frequent kind of damage and the associated probability of occurrence.

As a rule, there are no long-term measurement data series available for historic dam failures to develop generally recommended courses of action. For this reason, synthetic dam measurement data is generated by means of numerical simulation. Thus, an idealised reference dam with typical dimensions, building components, material properties and measuring devices is conceptualised, which is representative for existing gravity dams in Germany.

While the model of the dam only takes the major static influences - water load and ambient temperature - into consideration, in reality there are other factors which influence the observed measured variables and in turn lead to a much wider variation of the data. In the course of a survey carried out by the author, operating companies provided measurement data for a total of 16 gravity dams. These were subjected to an extensive statistic evaluation. Thus the mean variance component of the measured variables of the dam reaction parameters (seepage, direct and inverted pendulum movement as well as uplift pressure) can be quantified. In addition the measurement data evaluation creates further boundary conditions for the analysis in the next steps.

An essential part of the work is the finite-element modelling of the idealised dam. The seepage flow in dams with and without foundation drains is fundamentally different and consequently the calculation results as well. Therefore both variants are analysed separately. After a brief illustration of the applied calculation approaches for the different simulation steps, the structure of the finite-element model is introduced. The model validation is carried out with a transient simulation of the intact dam under common operational boundary conditions. The generated measurement data are compared to the real data from the operators' survey to verify suitability of the model and demonstrate its limitations.

In the next step the model is used to execute simulations of the six major cases of damage

previously described, in four different degrees respectively to generate synthetic measurement data for these dam conditions. Consequently, connections are made between the potential damage and the resultant effects to the measurement data.

Another aspect of the work is to determine the influence of damage to the safety level of the gravity dam. The critical overflow height is introduced as evaluation criteria. This value is defined as the difference between the water level when a dam failure occurs in the numerical model and the position of the dam crest. The calculation results of the various scenarios are illustrated graphically in form of bar charts.

Bayesian networks, which are based on the key results of the previous sections, form the central core of the work. They provide the connection between the potential damage and the occurrence, the resulting level of safety and the measurement data. Beforehand the structures of the networks with the related nodes are explained and the conditional probability tables are described.

Diagrams are created using the calculation results of the network, which illustrate the condition of the dam or rather the safety level depending on the measurement values. Hence, conclusions can be drawn about the relevance of measurement devices and recommendations can be given regarding reasonable monitoring intervals. The evaluation is completed by figures which, depending on the observed measured value, illustrate the type and probability of damage.

1 Einführung

Gemäß DIN 4048 Teil 1 (1987) bestehen Stauanlagen aus einem Staubecken und einem zugehörigen Absperrbauwerk, das die gespeicherten Wassermassen zurückhält. Wird ein Gewässerquerschnitt eingestaut, so handelt es sich um eine Staustufe bzw. Flussperre. Wird ein Talquerschnitt abgesperrt, so wird die Anlage als Talsperre bezeichnet.

Talsperren werden errichtet, um das natürliche Abflussregime eines Gewässers entsprechend dem vorgesehen Verwendungszweck der Anlage zu optimieren. Da die wertvolle Ressource Wasser in vielen Bereichen unseres Lebens eine wesentliche Rolle spielt, sind auch die Funktionen von Talsperren sehr vielseitig. In Abb. 1.1 sind wesentliche Aufgaben von Talsperren zusammengestellt.

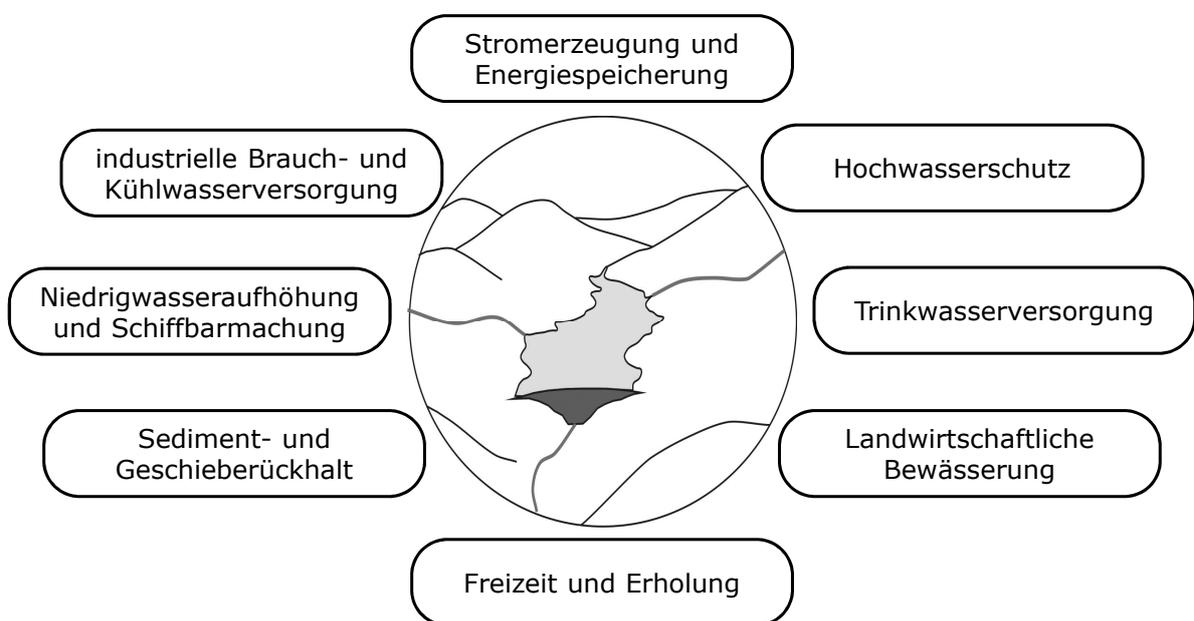


Abb. 1.1: Die Funktionen von Talsperren

Mit einer Anlage werden dabei ein oder mehrere dieser, teilweise auch konkurrierenden Zwecke erfüllt. So ist vom Betreiber festzulegen, welcher Anteil des Stauraumvolumens für welche Zwecke vorgehalten wird. Neben dem Talsperrenbetreiber stellen oftmals weitere Parteien Wünsche an die Betriebsweise der Talsperre. Beispielsweise favorisieren Angler und Sportbootnutzer einen maximalen Wasserstand, Badegäste bevorzugen ein leicht reduziertes Stauziel um einen ausreichenden Uferbereich als Liegewiese zur Verfügung zu haben und Anwohner des Gewässers unterhalb der Talsperre bevorzugen unter Umständen ein möglichst leeres Speicherbecken, damit ein hoher Hochwasserschutzgrad vorliegt.

Während man in Deutschland insbesondere das Ziel verfolgt, die Nutzung bestehender Anlagen hinsichtlich unterschiedlichster ökonomischer, gesellschaftlicher und ökologischer Interessen zu optimieren, ist insbesondere in Entwicklungsländern der Bau von Talsperren die Grundvoraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung. Das rasante Bevölkerungswachstum, verbunden mit den immer weiter steigenden Ansprüchen an den Lebensstandard, setzen voraus, dass die begrenzten und ungleich verteilten natürlichen Ressourcen Trinkwasser, Nahrung

und Energie in ausreichendem Maß zur Verfügung stehen. Ein nachhaltiges Wassermanagement verbunden mit dem effizienten Einsatz bestehender Anlagen und dem Ausbau neuer Wassersysteme ist dafür zwingend erforderlich (ICOLD u. a., 2012).

Trotz der großen Vorzüge von Talsperren darf nicht darüber hinweg gesehen werden, dass diese Bauwerke durchaus ein Gefährdungspotenzial aufweisen. Als Beispiel soll hier das Versagen der Bouzey-Talsperre näher betrachtet werden.

Im Jahr 1880 wurde die rund 20 m hohe und 500 m lange Bruchsteingewichtsstaumauer errichtet, um Wasser für den Vogesen-Kanal in Frankreich vorzuhalten. Die Mauer war auf geklüftetem und porösem Fels (Bundsandstein) gegründet und wasserseitig mit einer 6 - 10 m tiefen Dichtwand ausgeführt (ICOLD, 1983). Bereits während des Ersteinbaus traten ab einem Wasserstand von 9,5 m unterhalb des Stauziels luftseitig der Sperre Hangquellen mit einer Schüttung von 50 l/s auf.

Im Jahr 1884 wurde erstmals das Stauniveau von 2,7 m unterhalb des Stauziels erreicht. Die schlechten Untergrundverhältnisse führten zu einer starken Zunahme der Auftriebskräfte im Bereich der Aufstandsfläche. Folglich glitt plötzlich ein 135 m langer Bereich der Mauer bis zu 34 cm talabwärts. Diese Mauerdeformation führte zu starker Rissbildung insbesondere im wasserseitigen Anschlussbereich an die Untergründdichtung und einer Zunahme des Sickerwasseranfalls auf 230 l/s. Vier Jahre später wurde das Becken entleert, um wasserseitig eine vorgelagerte Lehmdichtung anzubringen und um den luftseitigen AufstandsBereich mit einem vorgemauerten massiven Keil zu verstärken.



Abb. 1.2: Zerstörte Bouzey Talsperre im Jahr 1895 (Roch, 2015)

Rund sechs Jahre nach Abschluss der Sanierung füllte ein Hochwasser 1895 die Talsperre erstmals bis zum Stauziel und führte zu einem Anstieg des Porenwasserdrucks im schlanken Kernbereich der Mauer. Als Folge kippte ein 10,5 m hoher und 170 m langer Bereich ab und wurde weggespült (vgl. Abb. 1.2). Die dadurch ausgelöste Flutwelle kostete etwa 150 Menschen das Leben (Saxena und Sharma, 2005). Die Schadensursache war eine Kombi-

nation aus der unzureichenden wasserseitigen Dichtung, der zu schmalen Dimensionierung des Mauerquerschnittes und der zur damaligen Zeit schlechten Qualität des verwendeten Bindemittels.

Nach der Katastrophe wurde die zerstörte Mauer wieder bis auf das ursprüngliche Kronenniveau aufgebaut. Im Jahr 2003 konnte diese Mauer einem Erdbeben widerstehen, von kleineren Schäden abgesehen, so dass diese bis heute weiterhin in Betrieb ist.

Auf Grund des Gefährdungspotenzials von Talsperren werden hohe Sicherheitsanforderungen an diese Bauwerke gestellt. In Deutschland gilt als gemeinsame Grundlage für die Planung, den Bau, den Betrieb und die Überwachung von Stauanlagen die DIN 19700-10 (2004). Die Zuverlässigkeitsanforderung von Talsperren werden in der DIN 19700-11 (2004) näher spezifiziert. In diesem technischen Regelwerk sind die Erfahrungen aus dem jahrzehntelangen Betrieb von Talsperren zusammengestellt und es wird regelmäßig durch neue nationale und internationale Erkenntnisse zur Verbesserung der Sicherheitsstandards aktualisiert. In Anlehnung an Melbinger (2005) sind folgende drei Grundsätze für die Talsperrensicherheit von elementarer Bedeutung:

- Der Entwurf und die Bauausführung gemäß den allgemein anerkannten Regeln der Technik.
- Die Sicherheitsüberwachung der Stauanlage, um ein außergewöhnliches Bauwerksverhalten frühzeitig zu erkennen.
- Die Implementierung eines Krisenmanagementsystems, um zielgerichtet Maßnahmen zur Minimierung des Restrisikos für die betroffene Bevölkerung zu ergreifen.

Die wesentliche Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist, den zweiten genannten Aspekt - eine außergewöhnliches Bauwerksverhalten anhand einer zielgerichteten Messdatenauswertung festzustellen - eingehend zu behandeln.

In der Praxis erfolgt die Sicherheitsüberwachung von Talsperren entsprechend den Vorgaben der DIN 19700-11 (2004) in drei Stufen. Zum einen werden durch das Betriebspersonal regelmäßige visuelle und messtechnische Kontrollen der Talsperre durchgeführt und somit die Bauwerksreaktion unter den tatsächlich auftretenden Einwirkungen und Betriebszuständen registriert und dokumentiert. Die dabei gewonnenen Messergebnisse werden zeitnah ausgewertet, um das Verhalten des Bauwerks beurteilen zu können. Zum anderen werden die Ergebnisse jährlich in Sicherheitsberichten zusammengetragen und durch einen Sicherheitsingenieur der aktuelle Sicherheitszustand der Anlage bewertet. Als dritte Stufe erfolgt in längeren Abständen, ca. alle 15 Jahre, eine ausführliche Datenanalyse im Zuge einer Vertieften Überprüfung der Talsperre, meist durch externe Experten.

Wie bereits dargelegt, werden an Talsperren hohe Sicherheitsanforderungen gestellt, so dass Außerbetriebnahmen oder gar Versagensfälle äußerst selten auftreten. Dies bedeutet allerdings auch, dass auf Grund der geringen Anzahl dokumentierter, historischer Ereignisse nur wenige Erfahrungen vorliegen. Insbesondere fehlen detaillierte Informationen darüber, inwiefern sich Talsperrenversagensfälle durch auffällige Überwachungsdaten vorzeitig angekündigt hätten. Eine Kenntnis darüber, in welchem Bereich sich Messgrößen bei kritischen Schadensfällen bewegen würden, ist für die Interpretation von Talsperrenmessdaten jedoch sehr hilfreich.

In dieser Arbeit werden daher Talsperrenmessdaten mit Hilfe von numerischen Simulationen künstlich generiert. Dafür wird ein FE-Modell einer idealisierten Gewichtsstaumauer er-

stellt, die für Deutschland typische Abmessungen und bauliche Einrichtungen aufweist und entsprechend den nationalen Empfehlungen messtechnisch ausgestattet ist. Der Vorteil einer Computerberechnung liegt darin, dass sich neben außergewöhnlichen Betriebszuständen auch unterschiedliche Schadensszenarien unter zuvor klar definierten Verhältnissen simulieren lassen. So werden unterschiedliche Schäden an baulichen Einrichtungen, wie beispielsweise Drainagen und Dichtungen im Modell generiert, um die Sicherheitsrelevanz bzw. Bedeutung dieser Einrichtungen beurteilen zu können. Die Bewertung, wie gravierend sich eine solche Schädigung auf das Sicherheitsniveau auswirkt, erfolgt durch Ermittlung eines fiktiven kritischen Hochwasserstandes, bei welchem die Mauer versagt.

Während im Modell lediglich die Wasserlast und die Temperatureinwirkung auf die Mauer und somit auf die Messgrößen Berücksichtigung finden, treten bei realen Messdaten eine Vielzahl weiterer Einflüsse auf, die zu einer wesentlich breiteren Streuung der Daten führen. Diese Komponente wird anhand der statistischen Auswertung von Messdaten 16 deutscher Gewichtsstaumauern abgeleitet.

Abschließend fließen sämtliche Informationen aus der FE-Modellierung und der statistischen Auswertung der Überwachungsdaten in Bayessche Netze ein. Bei einem Bayesschen Netz handelt es sich um ein auf Wahrscheinlichkeitsberechnungen basierendes graphisches Modell, um an Hand von Vorinformationen Schlussfolgerungen ableiten zu können. Im vorliegenden Fall wird es eingesetzt, um aus Informationen aus der Talsperrenüberwachung, wie beispielsweise das Auftreten von erhöhten Sickerwasserabflüssen in der Mauer, Aussagen zu treffen, wie sich dadurch das Sicherheitsniveau des Bauwerkes verändert. Darüber hinaus lassen sich Rückschlüsse ziehen, auf welche Bauwerksschäden die vorliegenden Messwerte hindeuten.

Der methodische Ansatz dieser Arbeit und deren Ergebnisse sollen daher Fachleuten bei Fragen im Zusammenhang der Sicherheit von Gewichtsstaumauern oder bei der Festlegung eines sinnvollen Überwachungsumfangs eine Hilfestellung bieten. Das Bayessche Netz unterstützt die auf Messwerten basierende Entscheidungsfindung, ob es erforderlich und verhältnismäßig ist, tiefer gehende Untersuchungen anzustellen oder ob eine Betriebseinschränkung der Talsperre erforderlich ist.

2 Statistische Grundlagen

Einführend werden die theoretischen Grundlagen der statistischen Verfahren, die in den anschließenden Kapiteln aufgegriffen werden, in knapper Form erläutert.

2.1 Regressionsanalyse

Regressionsanalysen werden zum einen in Kapitel 5 zur statistischen Auswertung der Überwachungsdaten aus der Betreiberumfrage eingesetzt und zum anderen in Kapitel 6 angewendet, um für das FE-Modell künstliche Messdaten zu generieren.

Ziel der multiplen linearen Regressionsanalyse ist die Herleitung eines mathematischen Zusammenhangs zwischen einer beobachteten Zielgröße Y und diversen erklärenden Variablen X_j . Dabei werden gemäß Gleichung 2.1 die einzelnen Einflussgrößen jeweils mit einem Regressionskoeffizienten b_i multipliziert und aufsummiert (Backhaus u. a., 2011).

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + \dots + b_j \cdot X_j + \dots + b_J \cdot X_J \quad (2.1)$$

mit:

Y	Beobachtete Zielgröße
\hat{Y}	Berechnete Zielgröße
b_0	Konstantes Glied der Regressionsfunktion
b_j	Regressionskoeffizient
X_j	Variable
J	Gesamtanzahl der Variablen

Ein effizientes Regressionsmodell zeichnet sich dadurch aus, dass die Regressionsgleichung nur signifikante Variablen beinhaltet. Um dies zu gewährleisten, wird die multiple lineare Regressionsanalyse in mehreren Schritten durchgeführt, die sich dem in Abb. 2.1 dargestellten Flussdiagramm entnehmen lassen und im Folgenden näher beschrieben sind.

2.1.1 Modellformulierung

Im ersten Schritt wird unter fachlichen Gesichtspunkten untersucht, welche Eingangsgrößen die Zielgröße beeinflussen. Bei der Analyse von Talsperrenüberwachungsdaten sind üblicherweise Messdaten, die die Bauwerksreaktion aufzeichnen, Zielgrößen Y . Dagegen sind die Messgrößen, die die Einwirkungen auf die Talsperre charakterisieren, erklärende Variablen X_j . Bei der Messdatenanalyse von Talsperren kommen nach Franke u. a. (2007) als typische erklärende Variablen beispielsweise der Wasserstand im Speicher und im Unterwasser, die mittlere Lufttemperatur vergangener Tage oder der Niederschlag in Frage.

Nach der Auswahl potenziell geeigneter Messgrößen ist des Weiteren von Interesse, welche Art von Zusammenhang zwischen Ziel- und Einflussgröße besteht. Unter Umständen ist die Einflussgröße vorab zu transformieren, damit die lineare Form von Gleichung 2.1 erzielbar ist. Beispielsweise ist für die Ermittlung der Kronenverschiebung infolge des Wasserdrucks bei elastischer Fußeinspannung nach Herzog (1998) der Wasserstand H als Polynom 5. Grades mit den Termen H^2 , H^3 , H^4 und H^5 zu berücksichtigen.

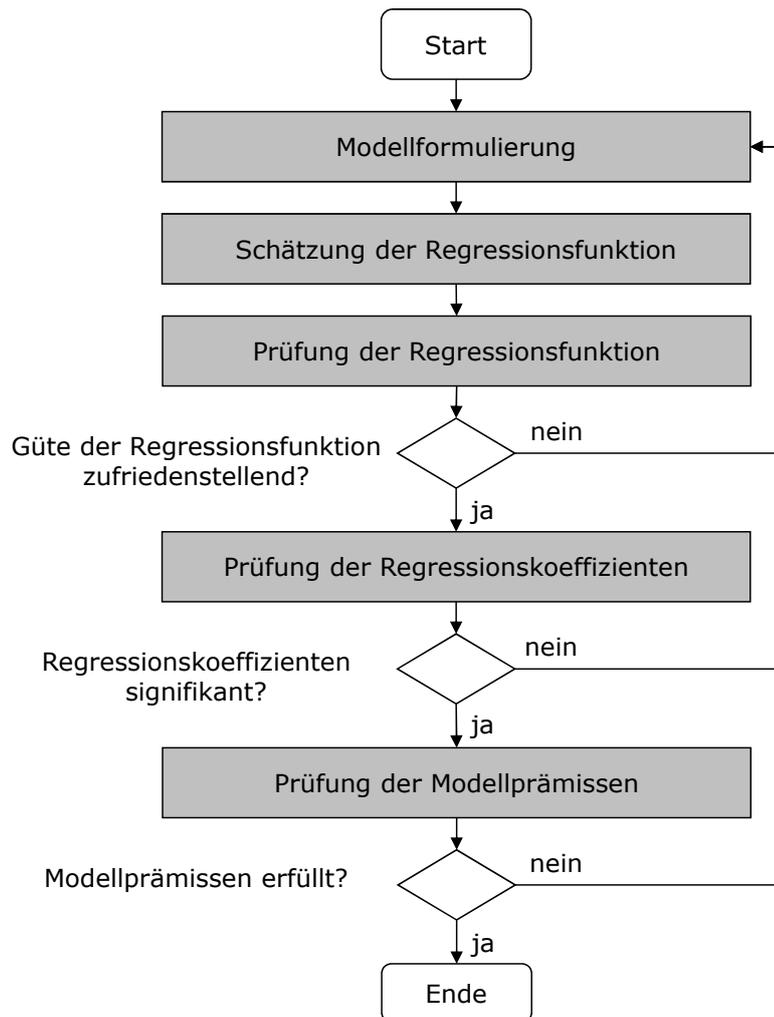


Abb. 2.1: Flussdiagramm zur Durchführung einer multiplen linearen Regressionsanalyse in Anlehnung an Backhaus u. a. (2011)

Grundsätzlich sind bei der Regressionsanalyse zwei unterschiedliche Herangehensweisen möglich. Bei der sogenannten Rückwärtsregression wird zunächst ein Regressionsmodell mit sämtlichen potenziellen Einflussgrößen aufgestellt. Anschließend wird untersucht, ob sich das Modell durch Entfernung von nicht signifikanten Variablen vereinfachen lässt. Bei der Vorwärtsregression wird dagegen der umgekehrte Weg gewählt und zunächst ein Regressionsmodell mit einer einzigen Einflussgröße gebildet. Im Anschluss wird das Modell Schritt für Schritt um eine weitere Variable erweitert. Mit dem in den folgenden Abschnitten näher erläuterten F-Test und t-Test wird dabei jeweils überprüft, ob diese zusätzliche Variable signifikant zur Verbesserung der Modellgüte beiträgt. Anderenfalls bleibt diese Variable unberücksichtigt.

2.1.2 Schätzung der Regressionsfunktion

Die Differenz zwischen der beobachteten Zielgröße Y_k und der berechneten Größe \hat{Y}_k wird als Residuum e_k bezeichnet. Damit die berechnete Größe möglichst genau den Wert der

beobachteten Größe Y erreicht, werden die Parameter b_j der Gleichung 2.1 mit einem Optimierungsalgorithmus so angepasst, dass der Unterschied zwischen Y und \hat{Y} minimal wird. Ein gängiges Verfahren ist die sogenannte Methode der kleinsten Quadrate, bei welcher die Summe der quadrierten Residuen minimiert wird (Chatterjee und Price, 1995).

$$\sum_{k=1}^K e_k^2 = \min! \quad \text{mit } e_k = Y_k - \hat{Y}_k \quad (2.2)$$

e_k Residue der k-ten Beobachtung
 K Gesamtanzahl der Beobachtungen

2.1.3 Prüfung der Regressionsfunktion und der Regressionskoeffizienten

Nachdem die Regressionsfunktion mit ihren Koeffizienten bestimmt ist, erfolgt im nächsten Schritt eine Analyse der Modellgüte. Dabei wird sowohl die Eignung der ermittelten Regressionsfunktion als Ganzes, als auch die der einzelnen Regressionskoeffizienten b_i überprüft.

Bestimmtheitsmaß

Das Bestimmtheitsmaß R^2 liefert eine Aussage, wie gut das Regressionsmodell an die empirischen Daten angepasst ist. Der Wert dieser Größe liegt zwischen 0 und 1. Beträgt $R^2 = 1$, kann die Zielgröße durch das Regressionsmodell exakt beschrieben werden. Folglich ist die Güte des Regressionsmodells um so geringer, je kleiner das Bestimmtheitsmaß ist. Das Bestimmtheitsmaß berechnet sich nach Hartung u. a. (2005) aus dem Verhältnis der mit dem Regressionsmodell berechneten erklärten Streuung zur beobachteten Gesamtstreuung.

$$R^2 = \frac{\text{Varianz der berechneten Werte}}{\text{Varianz der beobachteten Werte}} = \frac{\sum_{k=1}^K (\hat{Y}_k - \bar{Y})^2}{\sum_{k=1}^K (Y_k - \bar{Y})^2} \quad (2.3)$$

Ein Nachteil der Anwendung des Bestimmtheitsmaßes zur Bewertung der Regressionsgleichung besteht darin, dass das Bestimmtheitsmaß nicht kleiner wird, auch wenn eine irrelevante Variable mit einem Regressionskoeffizienten nahe Null in das Modell aufgenommen wird. Durch Hinzunahme solcher Variablen wird das Modell nicht nur unnötig umfangreich, sondern dies kann sich auch nachteilig auf die Prognosefähigkeit des Modells auswirken. Für den Fall, dass im Vergleich zur Anzahl K der Beobachtungen die Anzahl der berücksichtigten Variablen J relativ hoch ist, bildet das korrigierte Bestimmtheitsmaß R_{korr}^2 eine geeignete Alternative (Backhaus u. a., 2011).

$$R_{korr}^2 = R^2 - \frac{J \cdot (1 - R^2)}{K - J - 1} \quad (2.4)$$

Standardfehler der Schätzung

Der Standardschätzfehler s liefert die mittlere Abweichung von den beobachteten Werten zu den berechneten Werten und trägt somit die Einheit der jeweiligen Messgröße (Backhaus u. a., 2011). Je kleiner der Standardfehler ist, desto besser ist das gewählte Regressionsmodell.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K e_k^2}{(K - J - 1)}} \quad (2.5)$$

Wurzel aus dem gemittelten Fehlerquadrat

Alternativ zum Standardfehler wird häufig als globales Gütemaß der „Root-Mean-Square Error“ (RMSE) herangezogen (Hyndman und Koehler, 2006). Wie beim Standardschätzfehler ist bei der Anwendung dieser Größe zu beachten, dass diese gegenüber Ausreißern wenig robust ist.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K e_k^2} \quad (2.6)$$

F-Test der Regressionsfunktion

Liegt ein signifikanter Zusammenhang zwischen der beobachteten Größe Y und des erstellten Regressionsmodells vor, so müssen die Koeffizienten der Funktion b_i ungleich Null sein. Für den statistischen Test wird die Gegenthese dieser Aussage formuliert. Somit lautet die Nullhypothese H_0 :

$$H_0 : b_1 = \dots = b_J = 0 \quad (2.7)$$

Zur Prüfung dieser Hypothese wird nach Chatterjee und Price (1995) unter Berücksichtigung der Anzahl der Beobachtungen K und der Variablen J ein empirischer F-Wert berechnet F_{emp} :

$$F_{emp} = \frac{R^2/J}{(1 - R^2)/(K - J - 1)} \quad (2.8)$$

Ist dieser Wert nahe Null, so scheint die Nullhypothese zuzutreffen. Überschreitet dieser Wert einen von der Anzahl der Freiheitsgrade ($K-J-1$) und dem Signifikanzniveau abhängigen tabellierten Grenzwert, so ist die Nullhypothese abzulehnen und es ist von einem sinnvoll gewählten linearen Zusammenhang zwischen den Beobachtungen und der Zielgröße auszugehen. Die Werte der F-Tabellen sind üblicherweise bereits in den statistischen Auswertungsprogrammen implementiert, können aber auch der Literatur, wie beispielsweise bei Vogel (1983) entnommen werden.

t-Test der Regressionskoeffizienten

Sprechen die oben genannten Größen für die Anwendbarkeit des Regressionsmodells, ist darüber hinaus die Eignung der einzelnen Koeffizienten b_j zu kontrollieren. Während beim F-Test lediglich überprüft wird, ob sich irgendein Koeffizient der Gleichung signifikant von Null unterscheidet, wird bei der t-Statistik jeder Regressionskoeffizient einzeln überprüft. Dabei lautet die Nullhypothese:

$$H_0 : b_j = 0 \quad (2.9)$$

Zur Prüfung dieser Hypothese wird nach Hedderich und Sachs (2012) folgender empirische t-Wert t_{emp} berechnet:

$$t_{emp} = \frac{b_j}{s_{b_j}} \quad (2.10)$$

mit:

b_j Regressionskoeffizient
 s_{b_j} Standardfehler des Regressionskoeffizient b_j

Der tabellarisierte Vergleichswert des zweiseitigen t-Tests ist von der Anzahl der Freiheitsgrade und der Vertrauenswahrscheinlichkeit abhängig. Gilt $t_{emp} > t_{tab}$, so wird die Nullhypothese verworfen und die Variable X_j trägt signifikant zur Verbesserung des Regressionsmodells bei.

2.1.4 Prüfung der Modellprämissen

Die oben beschriebene Kleinstquadrat-Methode sowie die Testverfahren für die Regressionsfunktion dürfen nach Backhaus u. a. (2011) nur unter folgenden Annahmen vorbehaltlos angewendet werden:

- Das Regressionsmodell muss richtig definiert sein, so dass die Linearität gewährleistet ist, die relevanten erklärenden Variablen einbezogen sind und die Anzahl der zu schätzenden Parameter J kleiner als K ist.
- Die Residuen haben den Erwartungswert 0.
- Es darf keine Korrelation zwischen den Residuen und den Variablen bestehen.
- Die Residuen haben eine konstante Varianz (keine Heteroskedastizität).
- Die Residuen besitzen keine Autokorrelation.
- Die Residuen sind normalverteilt.
- Die Variablen sind untereinander linear unabhängig (keine Multikollinearität).

Eine einfache Möglichkeit die Modellprämissen zu überprüfen, ist die Betrachtung von Streudiagrammen (engl. Scatter plot). Als Wertepaare sind die Zielgröße Y , die Variablen X_i , die Residuen e und die Zeit t zu wählen. Lässt sich, wie in Abb. 2.2 ersichtlich, eine Struktur in den Punktwolken erkennen, so sind die oben genannten Modellannahmen in der Regel nicht erfüllt. Darüber hinaus lassen sich die Modellprämissen, wie in Backhaus u. a. (2011) erläutert, durch statistische Testverfahren überprüfen.

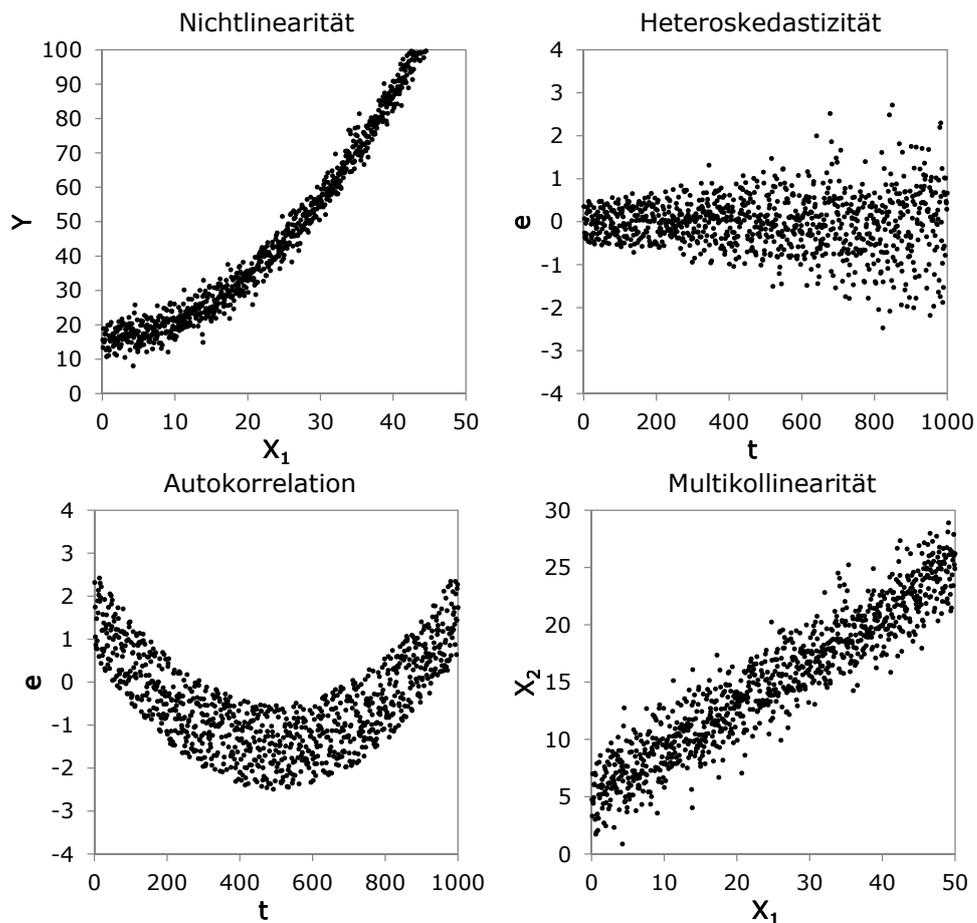


Abb. 2.2: Punktwolken zur Überprüfung der Modellprämissen der Regressionsanalyse

2.1.5 Durchführung der Regressionsanalyse

In dieser Arbeit werden bei der Regressionsanalyse der Talsperrenüberwachungsdaten in Kapitel 5 zur Beschreibung einer Zielgröße die beiden Variablen der Wasserstand H und die Temperatur T herangezogen. Diese Größen stellen die maßgeblichen Einwirkungen auf das Bauwerk dar (vgl. Abschnitt 5.3.3) und werden im Rahmen einer üblichen Talsperrenüberwachung bei den meisten Sperren erhoben (vgl. Abschnitt 5.3.1). Andere Messgrößen, wie beispielsweise der Niederschlag oder Bergwasserströmungen, spielen dagegen meist eine etwas untergeordnetere Rolle und werden hier vernachlässigt, um das Modell so einfach wie möglich halten zu können.

Des Weiteren erfolgt bei der Modellformulierung keine Variablentransformation. Da die meisten Talsperren im Regelbetrieb - und dieser wird hier näher betrachtet - in Bezug auf ihre Mauerhöhe nur in einer geringen Bandbreite bewirtschaftet werden, ist ein Ansatz ohne Potenzierung des Wasserstandes vertretbar. Somit lässt sich Gleichung 2.1 wie folgt umformen:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 \cdot H + b_2 \cdot T \quad (2.11)$$

Hinsichtlich der für die Regressionsanalyse geltenden Modellprämissen ist zu berücksichti-

gen, dass bei Jahresspeichern eine geringe Korrelation zwischen dem Wasserstand und der Temperatur vorliegt. Allerdings wirkt sich diese Multikollinearität bis zu einem gewissen Grad nicht störend auf die Schätzung des Regressionsmodells aus (Backhaus u. a., 2011).

Zudem weisen die Talsperrenüberwachungsdaten insbesondere bei kleinen Messintervallen eine hohe Autokorrelation auf. Die Kleinstquadratmethode zur Schätzung der Regressionsfunktion liefert zwar weiterhin erwartungstreue Ergebnisse, allerdings können die Standardfehler der Regressionskoeffizienten s_{bj} deutlich unterschätzt werden (Chatterjee und Price, 1995). Dies schränkt die Anwendbarkeit der üblichen Signifikanztests (z. B. t-Test) deutlich ein. Für die Regressionsanalyse der Talsperrenüberwachungsdaten wird daher in dieser Arbeit auf die Anwendung der Vorwärts- oder Rückwärtsregression verzichtet. Folglich werden im Regressionsmodell nach Gleichung 2.11 immer beide Wirkgrößen Wasserstand und Temperatur berücksichtigt.

2.2 Varianzzerlegung

Die Varianzzerlegung beruht auf der Regressionsanalyse und wird ebenfalls zur Charakterisierung der realen und künstlich generierten Überwachungsdaten aus den Kapiteln 5 bzw. 6 eingesetzt.

Die Varianz ist ein Maß für die Streuung der Variablen um ihren Mittelwert (Hedderich und Sachs, 2012). Wie bereits bei der Regressionsanalyse erläutert, kann eine Zielgröße Y von mehreren Einflussgrößen X_i abhängig sein. Folglich wird auch die Varianz der Zielgröße s_Y^2 durch die Streuung der Einflussgrößen $s_{x_i}^2$ beeinflusst. Mittels Varianzzerlegung lässt sich anschaulich erläutern, in welcher Verbindung die einzelnen Variablen zueinander stehen.

Die folgende Ausführung beschränkt sich auf den Zusammenhang einer Zielgröße Y mit zwei Einflussgrößen X_1 und X_2 . Dabei korrelieren X_1 und X_2 miteinander. Die in Abb. 2.3 dargestellten Venn-Diagramme veranschaulichen zwei mögliche Fälle.

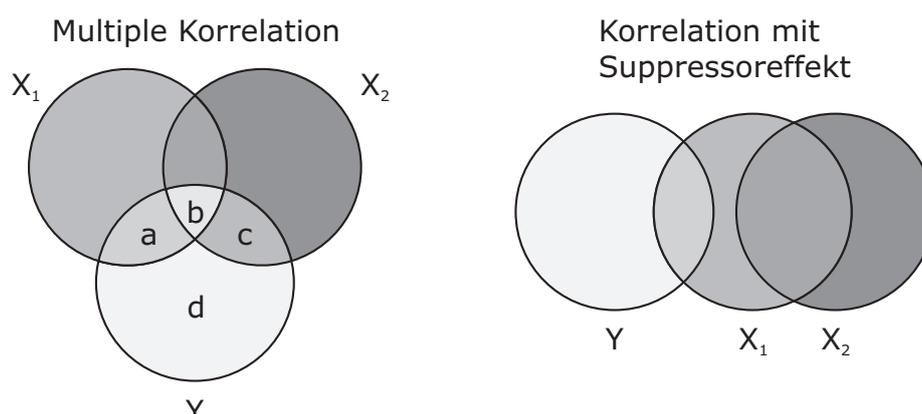


Abb. 2.3: Venn-Diagramme zur Darstellung des Zusammenhangs der Varianz dreier Variablen

Zunächst wird auf den linken Fall von Abb. 2.3 eingegangen. Hier korrelieren alle drei Größen miteinander. Die Varianz einer jeden Variablen ist als Kreis dargestellt. Dabei werden

z-standardisierte Variablen zugrunde gelegt, so dass der Flächeninhalt sämtlicher Kreise 1 beträgt. Die einzelnen Kreisabschnitte und Überlappungsbereiche werden im Folgenden kurz erläutert.

Der Fläche a+b ist der Überlappungsbereich der beiden Kreise von den Größen X_1 und Y . Dieser Teil der Varianz von Y lässt sich allein durch die Varianz der Größe X_1 beschreiben. Die Berechnung erfolgt durch Quadrierung des Pearson'schen Korrelationskoeffizient r_{x_1y} , der die Stärke des linearen Zusammenhangs zweier Variablen ausdrückt (Böcker, 2005).

$$\text{Fläche } (a + b) \Rightarrow r_{x_1y}^2 = \frac{(\sum (x_1 - \bar{x}_1)(y - \bar{y}))^2}{\sum (x_1 - \bar{x}_1)^2 \sum (y - \bar{y})^2} \quad (2.12)$$

Der Bereich c kennzeichnet den Anteil der Varianz von Y , der zusätzlich durch die Variable X_2 erklärt wird. Dieser trägt die Bezeichnung: quadrierte Semipartialkorrelation $r_{y(x_2.x_1)}^2$. Berechnet wird dieser durch eine Korrelation zwischen X_2 und Y nachdem zuvor X_1 aus X_2 heraus partialisiert wurde. Die explizite Formel lautet nach Bühner und Ziegler (2009):

$$\text{Fläche } (c) \Rightarrow r_{y(x_2.x_1)}^2 = \left(\frac{r_{x_2y} - r_{x_1x_2} \cdot r_{x_1y}}{\sqrt{1 - r_{x_1x_2}^2}} \right)^2 \quad (2.13)$$

Der gesamte Bereich a+b+c stellt den Teil der Varianz von Y dar, der auf die Abhängigkeit zu beiden Einflussgrößen X_1 und X_2 zurückzuführen ist. Dieser berechnet sich aus dem quadrierten multiplen Korrelationskoeffizienten $R_{y.x_1x_2}^2$. Diese Größe wird auch als multiples Bestimmtheitsmaß bezeichnet, (Gl. 2.14).

$$\text{Fläche } (a + b + c) \Rightarrow R_{y.x_1x_2}^2 = \frac{r_{x_1y}^2 + r_{x_2y}^2 - 2 \cdot r_{x_1x_2} \cdot r_{x_1y} \cdot r_{x_2y}}{1 - r_{x_1x_2}^2} \quad (2.14)$$

Die Fläche d aus Abb. 2.3 links repräsentiert den Teil der Varianz von Y , der sich weder durch die Einflussgröße X_1 noch durch X_2 erklären lässt. Berechnet wird dieser Anteil durch Subtraktion des multiplen Korrelationskoeffizienten $R_{y.x_1x_2}^2$ von 1, (Gl. 2.15).

$$\text{Fläche } (d) \Rightarrow 1 - R_{y.x_1x_2}^2 \quad (2.15)$$

Der Bereich b errechnet sich aus der Subtraktion der beiden quadrierten Semipartialkorrelationen $r_{y(x_1.x_2)}^2$ und $r_{y(x_2.x_1)}^2$ von den quadrierten multiplen Korrelationskoeffizienten $R_{y.x_1x_2}^2$, (Gl. 2.16).

$$\text{Fläche } (b) \Rightarrow R_{y.x_1x_2}^2 - (r_{y(x_1.x_2)}^2 + r_{y(x_2.x_1)}^2) \quad (2.16)$$

Sofern das Ergebnis positiv ist, stellt dieser Bereich die Varianz von Y dar, die durch beide Variablen geschätzt wird. Ist das Ergebnis negativ, tritt der sogenannte Suppressionseffekt

auf. Dann darf die Fläche nicht als Varianz interpretiert werden, da Varianzen nicht negativ sein können.

Der Suppressionseffekt lässt sich anhand Abb. 2.3 rechts wie folgt erklären. Die Variable X_1 korreliert sowohl mit der Zielgröße Y als auch mit einer weiteren Variablen X_2 , wohingegen Y und X_2 unkorreliert sind. Bei der Berechnung der Semipartialkorrelation $r_{y(x_1.x_2)}^2$ wird durch die Auspartialisierung von X_2 aus X_1 die für die Erklärung der Zielvariablen Y irrelevanten Varianzanteile von X_1 unterdrückt. Für diesen Sonderfall ist die Semipartialkorrelation $r_{y(x_1.x_2)}^2$ größer als die einfache Pearson'sche Korrelation $r_{x_1y}^2$ aus Gleichung 2.12.

2.3 Zeitreihenanalyse

Gegenstand der Zeitreihenanalyse ist die Untersuchung einer Reihe von Messdaten, die zu aufeinanderfolgenden Zeitpunkten erhoben wurden. Bei der Talsperrenüberwachung handelt es sich dabei in der Regel um physikalische Messgrößen, die demzufolge eine kontinuierliche, metrische Merkmalsausprägung aufweisen.

Eine Darstellung der Messdaten über die Zeit erlaubt eine erste qualitative Beurteilung von Zeitreihen und sollte daher immer den ersten Schritt bei der Analyse bilden (Schlittgen, 2001). Dabei lassen sich relativ einfach Strukturen und Regelmäßigkeiten der Messdaten wie Ausreißer, Datenlücken, Trends, Varianzinstationaritäten oder saisonale Schwankungen erkennen.

Für eine quantitative Bewertung der Struktur der Ganglinien oder für eine Generierung von künstlichen Zeitreihen mit vordefinierten Merkmalen ist eine mathematisch-statistische Zeitreihenanalyse erforderlich. So werden im Abschnitt 6.2.3 aus realen Messdaten die für die instationäre FE-Berechnung erforderlichen repräsentativen Randbedingungen für die Speicherbewirtschaftung und die Temperatureinwirkung erzeugt.

2.3.1 Komponenten einer Zeitreihe

Nach Billeter und Vlach (1981) wird bei der Analyse von Zeitreihen von der Modellvorstellung ausgegangen, dass sich der Messwert einer Zeitreihe $X(t)$ aus folgenden Komponenten additiv zusammensetzt:

$$X(t) = X_{Trend}(t) + X_{Periode}(t) + X_{Rest}(t) \quad (2.17)$$

Die **Trendkomponente** $X_{Trend}(t)$ beschreibt die langfristige Entwicklung des durchschnittlichen Niveaus der Messgrößen. Ein Beispiel für eine langsame, unperiodische zeitliche Veränderung ist der Klimawandel (Streit, 2007). Im Gegensatz zu ökonomischen Zeitreihen ist bei der Analyse von Talsperrenüberwachungsdaten eine sogenannte Konjunkturkomponente, die mehrjährige Schwankungen berücksichtigt, nicht erforderlich (Maniak, 2010). Die sogenannte glatte Komponente beschränkt sich daher lediglich auf den Trend.

Regelmäßig wiederkehrende Veränderungen werden durch die **Periodische Komponente** $X_{Periode}(t)$ ausgedrückt, die wie der Trend eine deterministische Komponente darstellt. Diese resultiert aus dem Tages- und Jahresgang von klimatischen Größen, wie der Temperatur und

dem Niederschlag oder kann auch durch die Bewirtschaftungskonzepte der Talsperre geprägt sein.

Wird von den Messwerten die deterministische Komponente abgezogen, so bleibt als Residuum eine **Restkomponente** $X_{Rest}(t)$ übrig, die auch als stochastische Komponente bezeichnet wird und zufällige Störfaktoren der Zeitreihe abbildet. Sind die Residuen in einer gewissen Weise von den vorausgegangenen Werten beeinflusst, so ist der autokorrelative Teilprozess zu berücksichtigen (Streit, 2007). Nach Subtraktion dieses Teilprozesses bleibt als Rest eine willkürliche Reihung von unabhängigen Zufallszahlen übrig, die einer bestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilung zugrunde liegen.

Im Folgenden werden Methoden aufgeführt, die für die Bestimmung der Zeitreihenkomponenten nach Gleichung 2.17 herangezogen werden können. Dabei werden diejenigen Verfahren ausführlicher behandelt, die in dieser Arbeit Anwendung finden.

2.3.2 Statistische Grundlagen zur Zeitreihenanalyse

Bevor die Vorgehensweise zur Bestimmung der Zeitreihenkomponenten näher beschrieben wird, werden in knapper Form die zugehörigen Grundlagen erläutert.

Autokorrelationsfunktion ACF

Bei der Autokorrelation wird untersucht, inwiefern die Messwerte einer Zeitreihe von vorangegangenen Messwerten abhängig sind. Dabei wird die Korrelation der Zeitreihe mit der, um eine bestimmte Anzahl von Messwerten verschobenen Zeitreihe gebildet. Die Anzahl der Zeitabschnitte um die die Zeitreihe verschoben wird, wird als Lag bezeichnet. Die Autokorrelationsfunktion (ACF) liefert dabei Autokorrelationskoeffizienten für nacheinander folgende Lags. Nach Maniak (2010) berechnet sich der Autokorrelationskoeffizient $r_{z_i z_{i-k}}$ einer Größe x_i und einem Lag von k wie folgt:

$$r_{z_i z_{i-k}} = \frac{s_{z_i z_{i-k}}}{s_{z_i} s_{z_{i-k}}} = \frac{\sum_{i=k+1}^N (z_i - \bar{z}_i)(z_{i-k} - \bar{z}_{i-k})}{\sqrt{\sum_{i=k+1}^N (z_i - \bar{z}_i)^2 \sum_{i=k+1}^N (z_{i-k} - \bar{z}_{i-k})^2}} \quad \text{mit : } -1 < r_{z_i z_{i-k}} < +1 \quad (2.18)$$

mit:

$s_{z_i z_{i+k}}$	Kovarianz der Größe z_i und der um k Zeiteinheiten verschobenen Größe z_{i-k}
s_{z_i}	Standardabweichung von z_i
\bar{z}_i	Mittelwert von z_i

Partielle-Autokorrelationsfunktion PACF

Bei der Berechnung der Autokorrelation zwischen der Zeitreihe z_t und der um k Lags verschobenen Zeitreihe z_{t-k} ist nicht bekannt, inwiefern die dazwischen liegenden Zeitpunkte den Zusammenhang beeinflussen. Durch Anwendung der Partiellen-Autokorrelationsfunktion

(PACF) werden die Einflüsse der dazwischen liegenden Messwerte eliminiert. Der Wert für den Lag k der Partialautokorrelationsfunktion ϕ_{kk} kann, wie in Box u. a. (2008) näher beschrieben, durch eine multiple Regression errechnet werden. Dabei wird eine Regressionsgleichung mit k Summanden aufgestellt:

$$z_t = b_1 \cdot z_{t-1} + b_2 \cdot z_{t-2} + \dots + b_k \cdot z_{t-k} \quad (2.19)$$

mit:

b_i	Regressionskoeffizienten
z_{t-i}	Um i Lags verschobene Zeitreihe z_t

Die Regressionskoeffizienten dieser Gleichung lassen sich, wie in Abschnitt 2.1 erläutert, durch die kleinste Fehlerquadratmethode bestimmen. Der gesuchte Partialautokorrelationswert ϕ_{kk} entspricht dabei dem berechneten Koeffizient b_k .

Weißes Rauschen

Für den Sonderfall, dass die stochastische Restkomponente keine Autokorrelation aufweist, lässt sich diese mit einem reinen weißen Rauschen beschreiben.

Bei der Zeitreihenanalyse wird weißes Rauschen (white noise) als ein Prozess bezeichnet, der sich aus unkorrelierten Zufallszahlen zusammensetzt, die einen Erwartungswert von Null und eine zeitstabile Varianz aufweisen (Leiner, 1991). Häufig wird dabei von einer Normalverteilung ausgegangen (vgl. Anhang A.1). Das weiße Rauschen $a(t)$ ist Bestandteil der im Folgenden näher erläuterten ARIMA-Prozesse. Wie aus Abb. 2.4 hervorgeht, weist sowohl die AFC als auch die PACF für sämtliche Lags größer als eins, den Wert Null auf.

Für den Regelfall, einer autokorrelierten Restkomponente, muss die Beziehung der jeweiligen Werte zu den vorangegangenen Werten Berücksichtigung finden. Dabei werden die im folgenden näher beschriebenen Prozesse unterschieden. Eine Darstellung der ACF und PACF dieser Prozesse ist Abb. 2.4 zu entnehmen.

Autoregressiver Prozess (AR-Prozess)

Beim AR(p)-Prozess wird die aktuelle Größe z_t aus den Größen der vorangegangenen Zeitschritte berechnet. Die Ordnung p gibt dabei an, wie viele vorherige Zeitschritte in die Berechnung einbezogen werden. Der autoregressive Prozess 2. Ordnung AR(2) wird nach Box u. a. (2008) wie folgt definiert:

$$z_t = \phi_1 z_{t-1} + \phi_2 z_{t-2} + a_t \quad (2.20)$$

mit:

z_t	Aktuelle Größe
z_{t-1}	Um einen Zeitschritt zurückliegende Größe (Lag = 1)
ϕ_i	Gewichtungsfaktor
a_t	Zufallseinfluss (weißes Rauschen)

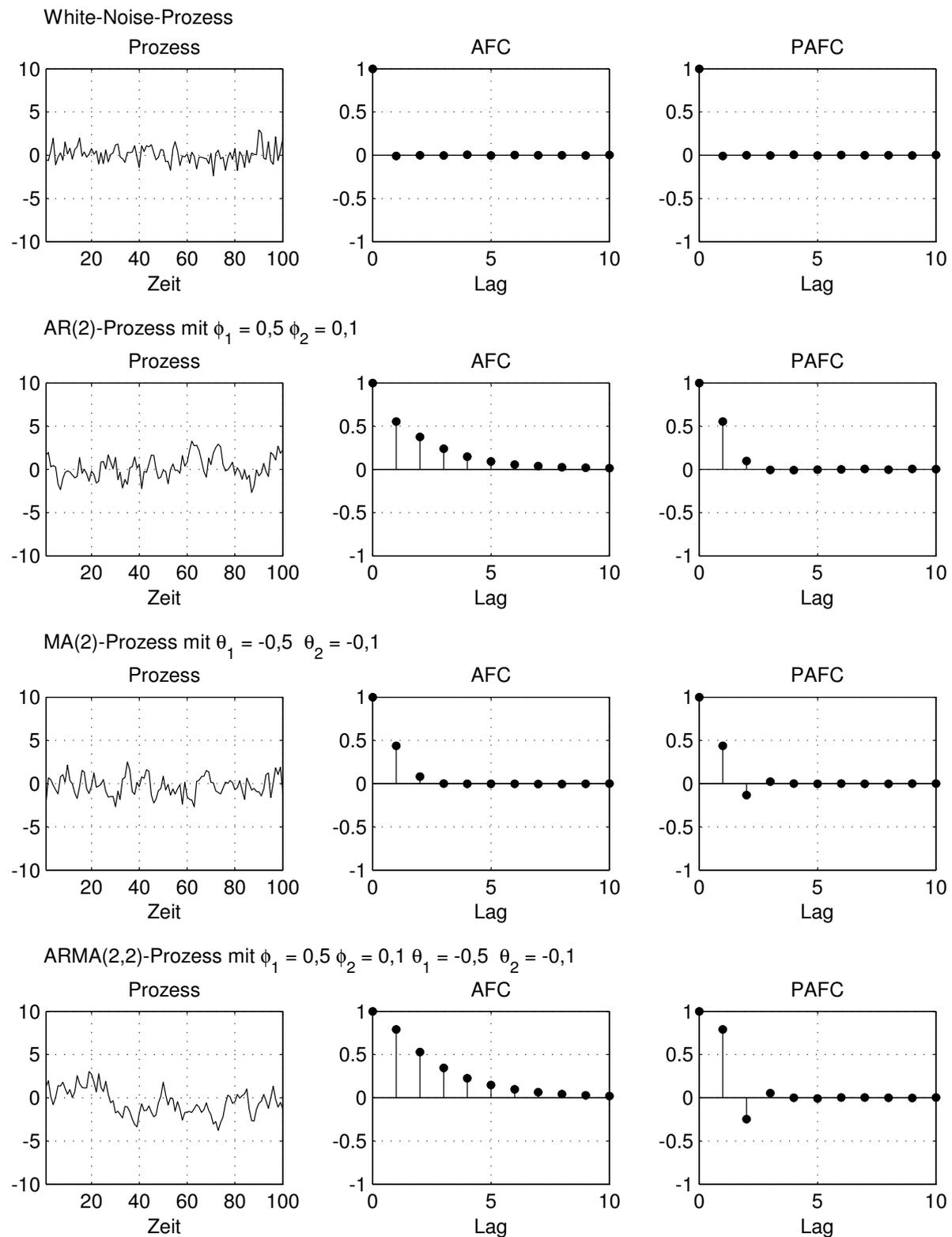


Abb. 2.4: Exemplarische Darstellung eines weißen Rauschens, eines AR(2)-, MA(2)- und ARMA(2,2)-Prozesses

Moving-Average-Prozess (MA-Prozess)

Beim MA(q)-Prozess werden zur Berechnung des aktuellen Prozesses die Zufallseinflüsse vorangegangener Prozesse gewichtet und dem aktuellen Zufallseinfluss hinzu addiert. Der Moving-Average-Prozess der 2. Ordnung MA(2) wird nach Box u. a. (2008) durch folgende Gleichung charakterisiert:

$$z_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} \quad (2.21)$$

mit:

z_t	Aktuelle Größe
a_t	Zufallseinfluss (weißes Rauschen)
a_{t-1}	Zufallseinfluss der um einen Zeitschritt zurückliegenden Größe
θ_i	Gewichtungsfaktor

Autoregressiver Moving-Average-Prozess (ARMA-Prozess)

Der ARMA(p,q)-Prozess beinhaltet sowohl zurückliegende Prozesse gemäß dem AR-Prozess, als auch zurückliegende Zufallseinflüsse gemäß dem MA-Prozess. Somit wird beispielsweise ein ARMA(2,2)-Prozess wie folgt beschrieben:

$$z_t = \phi_1 z_{t-1} + \phi_2 z_{t-2} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} \quad (2.22)$$

Autoregressiver Integrierter Moving-Average-Prozess (ARIMA-Prozess)

Lässt sich ein instationärer Prozess über d -malige Differenzbildung in einen stationären ARMA(p,q)-Prozess überführen, dann handelt es sich nach Schlittgen (2001) um einen ARIMA(p,d,q)-Prozess.

Für die in dieser Arbeit zu behandelnden Prozesse wird Varianzstationarität vorausgesetzt, so dass vollständige ARIMA-Modelle nicht weiter betrachtet werden.

2.3.3 Vorgehensweise bei der univariaten Zeitreihenanalyse

Voraussetzung für die univariate Zeitreihenanalyse mit ARMA-Modellen ist, dass ein stationärer Prozess vorliegt. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zufallsvariablen und deren zugehörige Parameter müssen demnach unabhängig von der Zeit sein (Billeter und Vlach, 1981). Falls eine Instationarität der Varianz vorliegt, kann, wie in Schlittgen (2001) erläutert, eine Stabilisierung mittels Box-Cox-Transformation erfolgen.

In Abb. 2.5 ist ein Flussdiagramm zur Durchführung der Zeitreihenanalyse dargestellt. Wie im Folgenden näher erläutert, werden im ersten Schritt die deterministischen und anschließend die stochastischen Komponenten der Zeitreihe ermittelt.

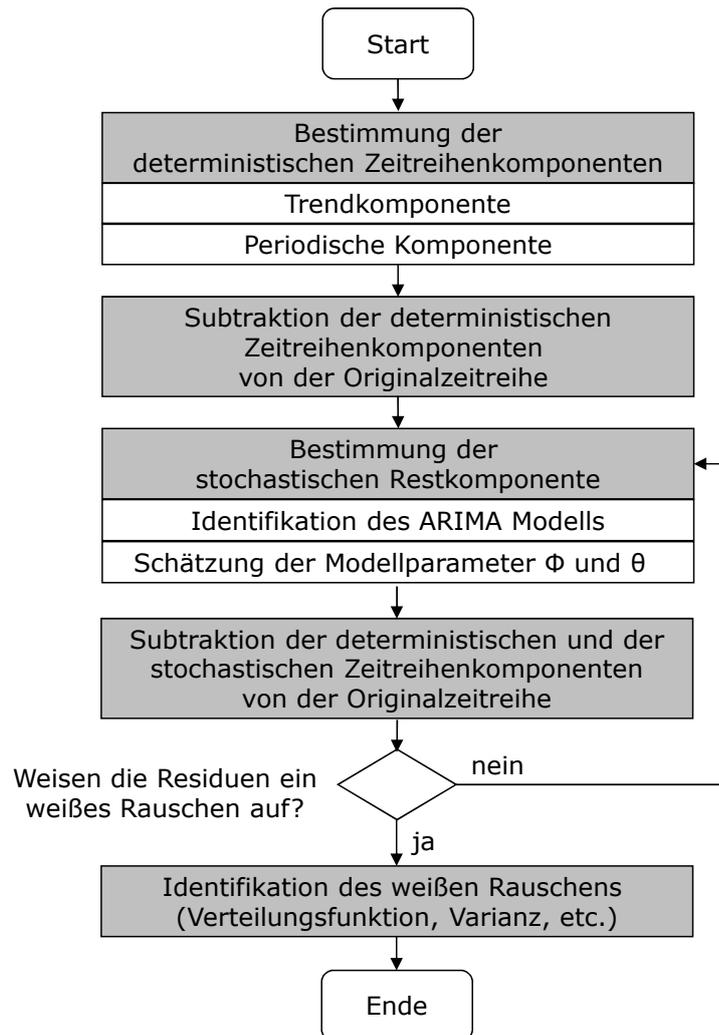


Abb. 2.5: Flussdiagramm zur Durchführung der Zeitreihenanalyse

2.3.4 Bestimmung der deterministischen Zeitreihenkomponenten

Trendkomponente

Zur mathematischen Beschreibung der langfristigen Entwicklungstendenz einer Zeitreihe können sich unterschiedliche funktionale Zusammenhänge als geeignet erweisen. Leiner (1991) geht dabei näher auf lineare Trendfunktionen, Polynome höherer Grade, Exponentialfunktionen, logistische Funktionen und Gompertzkurven ein.

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Trendermittlung durch Anwendung einer linearen Regression der Zeitreihe mit einer aufsteigenden Zahlenreihe. Die Parameter der linearen Trendfunktion werden dabei mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate geschätzt (vgl. Abschnitt 2.1).

Periodische Komponente

Die Periodizität der zyklischen Messwertschwankungen richtet sich nach physikalischen Gesichtspunkten. Beispiele dafür sind der Tag-Nacht-Wechsel der Lufttemperatur, eine Nutzung der Sperre als Wochenspeicher oder der Jahresgang der Wassertemperatur. In Hartung u. a. (2005) sind verschiedene Methoden und Glättungsverfahren, wie die Bildung gleitender Durchschnitte, die Differenzenmethode oder lineare Filter beschrieben, die eine Schätzung der periodischen Komponente ermöglichen.

Die in dieser Arbeit angewendete Methode zur Bestimmung der periodischen Komponente beruht auf einer Schätzung der Parameter einer trigonometrischen Funktion mittels der Methode kleinster Fehlerquadrate. Dabei wird die allgemeine Sinusfunktion herangezogen.

$$f(t) = a \cdot \sin[b \cdot (t + c)] + d \quad (2.23)$$

Da der Trend als eigenständige Komponente berücksichtigt wird, schwankt die Funktion um den Wert Null. Somit gilt $d = 0$. Darüber hinaus wird im Folgenden lediglich die Jahresperiode berücksichtigt, da als kleinstes Zeitintervall Tageswerte untersucht werden und wöchentliche Schwankungen bei der Analyse von Überwachungsdaten lediglich eine untergeordnete Rolle spielen. Somit reduziert sich die allgemeine Sinusgleichung wie folgt:

$$f(t) = a \cdot \sin[2\pi/365 \cdot (t + c)] \quad (2.24)$$

Dabei wird durch den Parameter a die Amplitude festgelegt und der Parameter c bewirkt eine Verschiebung der Funktion auf der Zeitachse.

2.3.5 Bestimmung der stochastischen Restkomponente

Der Ablauf der weiteren univariaten Zeitreihenanalyse gliedert sich nach Schmitz (1989) in drei Teile:

1. Identifikation des ARIMA Modells

In einem ersten Schritt ist die (p,d,q) -Ordnung des ARIMA-Modells zu bestimmen. Dafür kann, wie in Schmitz (1989) näher beschrieben, eine Auswertung von ACF und PACF Plotts oder von Indikatortabellen erfolgen. Alternativ können auch unterschiedliche Modelle aufgestellt werden und im Anschluss das am besten geeignete Modell durch Überprüfung verschiedenster Modellgütekriterien identifiziert werden. Dafür eignen sich unter anderem auch das Bestimmtheitsmaß (Gl. 2.3) und der RMSE (Gl. 2.6).

2. Schätzung der Modellparameter

Nachdem die Gleichung zur Beschreibung des Prozesses festgelegt ist, werden die zugehörigen Modellparameter ϕ und θ bestimmt. Dafür kann die Methode der kleinsten Quadrate oder das Maximum-Likelihood-Verfahren herangezogen werden.

3. Diagnose

Wird das generierte ARIMA-Modells von der empirischen Zeitreihe subtrahiert, sollten die Residuen ein weißes Rauschen aufweisen. Andernfalls kann die Anwendung eines anderen ARIMA-Modell erforderlich sein und die Schritte 1 bis 3 sind zu wiederholen.

2.4 Fortpflanzung von Unsicherheiten

Die Fortpflanzung von Unsicherheiten wird in Kapitel 7 bei der Erstellung des Bayesschen Netzes berücksichtigt, um die Messgenauigkeit und auch die Messhäufigkeit der jeweiligen Talsperrenmesseinrichtungen in die abschließende Interpretation der Talsperrenüberwachungsdaten einbeziehen zu können.

Bei der Auswertung von Messungen setzt sich eine Ausgangsgröße Y oftmals aus mehreren Eingangsgrößen X_i zusammen und wird über eine Modellfunktion f ermittelt.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2.25)$$

Der wahre Wert der Eingangsgrößen X_i ist in der Regel nicht bekannt und wird daher anhand von, mit gewissen Unsicherheiten behafteten, Messwerten x_i geschätzt. Nach DIN ISO 5168 (2004) ist die Unsicherheit ein „dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden könnte“. Wird die Unsicherheit einer Messung durch die Standardabweichung ausgedrückt, spricht man von der Standardunsicherheit $u(x_i)$.

Es werden in der Regel drei Arten von Unsicherheiten unterschieden:

- Systematischer Fehler
- Messgeräte-Fehler
- Zufälliger Fehler

Die Unsicherheiten der jeweiligen Eingangsgrößen pflanzen sich durch Anwendung einer Modellfunktion f fort. Zur Interpretation der berechneten Ausgangsgröße ist daher auch deren Messunsicherheit von Interesse.

Im allgemeinen Fall berechnet sich die Standardunsicherheit $u(y)$ der Ergebnisgröße Y gemäß DIN 1319-3 (1996) wie folgt:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{k=i+1}^m \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_k} u(x_i, x_k)} \quad (2.26)$$

mit:

- $u(x_i)$ Standardunsicherheit des Eingangsgrößenwertes x_i
 $u(x_i, x_k)$ Kovarianz der Eingangsgrößenwerte x_i und x_k

Sind die Eingangsgrößen X_i unkorreliert, so reduziert sich Gleichung 2.26 auf den vorderen Term. Diese Gleichung wird auch als Gauß'sches Fehlerfortpflanzungsgesetz bezeichnet.

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)} \quad (2.27)$$

2.4.1 Standardunsicherheit eines Stichprobenmittelwerts unkorrelierter Messwerte

Im Folgenden wird das Unsicherheitsfortpflanzungsgesetz auf die Berechnung des Mittelwertes mehrmaliger unkorrelierter Einzelmessungen angewendet. Der Mittelwert aus n Einzel-

werten x_i berechnet sich mit folgender Modellfunktion:

$$y = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.28)$$

Wird Gleichung 2.27 auf diese Funktion angewendet und darüber hinaus berücksichtigt, dass die Standardunsicherheit zeitlich konstant und somit bei jeder Einzelmessung identisch ist ($u(x_t) = u(x_{t+1}) = u(x_i)$), so ergibt sich folgende Standardunsicherheit für den berechneten Mittelwert:

$$u(y) = \frac{1}{\sqrt{n}} u(x_i) \quad (2.29)$$

Die Unsicherheit des berechneten Mittelwertes reduziert sich folglich mit zunehmender Anzahl von Einzelmessungen.

2.4.2 Standardunsicherheit eines Trends unkorrelierter Messwerte

Ein einfacher Weg zur Trendermittlung ist die Halbmittelwertmethode (Billeter und Vlach, 1981). Dabei wird die Datenreihe halbiert und für jede Hälfte der Mittelwert bestimmt. Die doppelte Differenz beider Werte liefert den tendenziellen Zuwachs, respektive die tendenzielle Abnahme der Datenreihe.

$$y = 2 \left(\frac{1}{m} \sum_{i=m+1}^n x_i - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i \right) \quad \text{mit } m = n/2 \quad (2.30)$$

Unter Anwendung des Unsicherheitsfortpflanzungsgesetzes Gl. 2.27 ergibt sich folgende Standardunsicherheit für die berechnete Ausgangsgröße.

$$u(y) = \frac{4}{\sqrt{n}} u(x_i) \quad (2.31)$$

2.4.3 Standardunsicherheit eines Stichprobenmittelwerts autokorrelierter Messwerte

Für gewöhnlich weisen Zeitreihen von Talsperrenüberwachungsdaten eine Autokorrelation auf, insbesondere dann, wenn die Messdaten in einem kurzen Zeitintervall erhoben werden. In diesem Fall ist eine direkte Anwendung des Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetzes Gl. 2.27 bzw. dessen Anwendungen Gl. 2.29 und Gl. 2.31 nicht zulässig.

Im Folgenden wird daher eine Formel zur Berechnung der Standardunsicherheit eines berechneten Stichprobenmittelwerts hergeleitet, die für autokorrelierte Messwerte, die einem AR(1)-Prozess zugrunde liegen, angewendet werden kann.

Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, ist der autoregressive Prozesses 1. Ordnung wie folgt definiert:

$$x_t = \phi x_{t-1} + a_t \quad (2.32)$$

Jeder Messwert lässt sich demnach in zwei Anteile untergliedern, den mit ϕ gewichteten Vorgängerwert und einem sogenannten weißem Rauschen. Werden die in beiden Termen zerlegten Messwerte in die Gleichung Gl. 2.28 eingesetzt, lässt sich der Mittelwert mit folgender Reihe berechnen:

$$y = \frac{1}{n(\phi - 1)} [x_0(\phi^{n+1} - \phi) + a_1(\phi^n - 1) + a_2(\phi^{n-1} - 1) + \dots + a_n(\phi - 1)] \quad (2.33)$$

Auf diese Gleichung lässt sich wiederum das Gauß'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz (Gl 2.27) anwenden. Dabei wird ϕ als bekannt angenommen und ist daher selbst nicht mit Unsicherheiten behaftet.

$$u^2(y) = \left(\frac{1}{n(\phi - 1)} \right)^2 \cdot [u^2(x_0) \cdot (\phi^{n+1} - \phi)^2 + u^2(a_1) \cdot (\phi^n - 1)^2 + \dots + u^2(a_n) \cdot (\phi - 1)^2] \quad (2.34)$$

Unter der Voraussetzung, dass die Unsicherheit des weißen Rauschens zeitlich konstant bleibt $u(a_i) = u(a_{i+1}) = u(a)$, lässt sich die endliche geometrische Reihe vereinfachen.

$$u^2(y) = \left(\frac{1}{n(\phi - 1)} \right)^2 \left\{ u^2(x_0) \cdot \phi^2(\phi^n - 1)^2 + u^2(a) \cdot \left[\frac{\phi^{2(n+1)}}{\phi^2 - 1} - \frac{2\phi(\phi^n - 1)}{\phi - 1} + n - 1 \right] \right\} \quad (2.35)$$

Bei zeitlich konstanter Standardunsicherheit der Messwerte $u(x_t) = u(x_{t-1})$ gilt folgende Beziehung zwischen der Unsicherheit des weißen Rauschens $u(a)$ und der Unsicherheit der Messwerte $u(x_0)$.

$$u^2(a) = (1 - \phi^2) \cdot u^2(x_0) \quad (2.36)$$

Unter Berücksichtigung dieses Zusammenhangs vereinfacht sich Gl. 2.35 zu:

$$u^2(y) = \frac{n(1 - \phi^2) - 2\phi(1 - \phi^n)}{n^2(1 - \phi)^2} \cdot u^2(x_0) \quad (2.37)$$

Für den Fall, dass die Messwerte keine Autokorrelation aufweisen ($\phi = 0$), stimmt diese Gleichung mit Gl. 2.29 überein.

2.5 Bayessche Netze

Die statistische Auswertung der Ergebnisse der Finiten-Elemente-Berechnung aus Kapitel 6 unter Berücksichtigung der zugehörigen Auftretenswahrscheinlichkeiten erfolgt in dieser Arbeit mit einem Bayesschen Netz. Im Folgenden werden in komprimierter Form die zugehörigen

Grundlagen dieser Methode dargestellt. Die Rechenbeispiele in Anlage B dienen der Veranschaulichung. Zum tieferen Verständnis wird auf weiterführende Literatur wie Neapolitan (2004) oder Jensen und Nielsen (2001) verwiesen.

Die Bayesschen Netze werden den sogenannten Expertensystemen zugeordnet. Diese Programme unterstützen den Anwender bei der Lösung von komplexen Problemen. Dabei werden zu konkreten Fragestellungen Schlussfolgerungen abgeleitet und Handlungsempfehlungen ausgesprochen (Engesser u. a., 1993). Die Programmroutine greift dabei auf Expertenwissen zurück, das zuvor in das Programm eingepflegt wurde und dort gespeichert ist.

Bayessche Netze zeichnen sich durch ihre übersichtlichen Struktur aus Symbolen (Kreise und Pfeile) sowie ihre intuitive Handhabung aus und beruhen auf der mathematisch fundierten Theorie bedingter Wahrscheinlichkeitsrechnung (Bibel u. a., 2013). Sie werden in unterschiedlichsten Bereichen wie der Medizin, der Industrie oder bei Versicherungen eingesetzt, um Diagnosen und Prognosen zu erstellen oder Auswirkungen von Entscheidungen bewerten zu können.

2.5.1 Grundlegende Elemente der Wahrscheinlichkeitsrechnung

Statistische Wahrscheinlichkeit

Die Wahrscheinlichkeit P (bzw. Unsicherheit) des Auftretens eines Ereignisses A wird durch eine Zahl zwischen 0 und 1 ausgedrückt (Sachs, 1971). Alternativ ist auch dieser Wert multipliziert mit 100 in Prozentschreibweise gebräuchlich.

$$0 \leq P(A) \leq 1 \quad \text{bzw.} \quad 0\% \leq P(A) \leq 100\% \quad (2.38)$$

Liegt eine statistische Symmetrie vor, so lässt sich der Wahrscheinlichkeitswert berechnen. Man spricht von einer a-priori-Wahrscheinlichkeit oder mathematischen Wahrscheinlichkeit (Sachs, 1971). Klassisches Beispiel ist der ideale Würfel. Die Wahrscheinlichkeit eine 1 zu erhalten ist $1/6$, da der Würfel sechs gleich große Flächen aufweist.

Lässt sich die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses nicht durch eine solche Überlegung herleiten, wird diese aus einer möglichst großen Anzahl von Beobachtungen abgeleitet. Diese Wahrscheinlichkeit wird a-posteriori oder statistische Wahrscheinlichkeit bezeichnet. Nach Moss (2005) ist diese definiert als der Quotient aus der Anzahl der Fälle mit Eintreten des Ereignisses n_A und der Anzahl aller Ereignisse n_{tot} .

$$P(A) = \frac{n_A}{n_{tot}} \quad (2.39)$$

Die Gegenwahrscheinlichkeit $P(\bar{A})$, dass das Ereignis A nicht eintritt, ist wie folgt definiert:

$$P(\bar{A}) = \frac{n_{\bar{A}}}{n_{tot}} = 1 - P(A) \quad (2.40)$$

Additionssatz

Die Menge aller möglichen Ereignisse wird als Ereignisraum Ω bezeichnet. Wie in Abb. 2.6 dargestellt, sind die Ereignisse A und B Teilmengen dieses Ereignisraumes.

Bayessches Theorem

Das Bayessche Theorem bildet die fundamentale Grundlage der Berechnungen mit Bayesschen Netzen. Der Satz von Bayes lässt sich durch Einsetzen von 2.44 in 2.43 herleiten (Neapolitan, 2004):

$$P(A | B) = \frac{P(A) \cdot P(B | A)}{P(B)} \quad (2.47)$$

Da das Ereignis A und das Gegenereignis \bar{A} zusammen den gesamten Ereignisraum abdecken, lässt sich $P(B)$ in zwei Anteile untergliedern:

$$P(A | B) = \frac{P(A) \cdot P(B | A)}{P(B \cap A) + P(B \cap \bar{A})} \quad (2.48)$$

Unter Berücksichtigung von Gl. 2.44 ergibt sich folgender Berechnungsansatz zur Ermittlung der bedingten Wahrscheinlichkeit $P(A | B)$:

$$P(A | B) = \frac{P(A) \cdot P(B | A)}{P(A) \cdot P(B | A) + P(\bar{A}) \cdot P(B | \bar{A})} \quad (2.49)$$

Das Bayessche Theorem lässt sich für n Ereignisse A_1, A_2, \dots, A_n erweitern, sofern diese sich gegenseitig ausschließen und gemeinsam den Ereignisraum Ω abdecken (Sachs, 1971):

$$P(A_i | B) = \frac{P(A_i) \cdot P(B | A_i)}{\sum_{i=1}^n P(A_i) \cdot P(B | A_i)} \quad (2.50)$$

2.5.2 Aufbau eines Bayesschen Netzes

Der Aufbau eines Bayesschen Netzes erfolgt nach Ertel (2009) in der Regel in mehreren Schritten. Das einfache Beispiel im Anhang B.1 auf Seite 157 verdeutlicht die Herangehensweise.

Konzeption der Netzstruktur

Ein Bayessches Netz wird als netzartige Struktur, bestehend aus endlich vielen Knoten X_i und gerichteten Kanten dargestellt. Wie in Abb. 2.7 ersichtlich, werden die Knoten durch Kreise und die Kanten durch Pfeile symbolisiert.

Ein Knoten stellt eine Variable dar, für die endlich viele Zustände definiert werden. Beispielsweise ja / nein oder $x \leq 1$ / $1 < x < 2$ / $x \geq 2$. Diese Zustände müssen den gesamten Ereignisraum abdecken.

Die Kanten verbinden die Knoten miteinander und zeigen deren wechselseitige Beziehung an. Der Knoten, an dem die Kante beginnt, kann als Ursache, der Knoten, an dem die Kante endet, als deren Wirkung verstanden werden. Als grundlegende Voraussetzung gilt, dass das Netz nicht zyklisch ist. Ein Knoten darf demnach nicht über einen Pfad von gerichteten Kanten und anderen Knoten mit sich selbst verbunden sein. Im Gegensatz zu einem Fehler- oder Ereignisbaum ist es aber zulässig, dass zwei Knoten über mehrere unterschiedliche

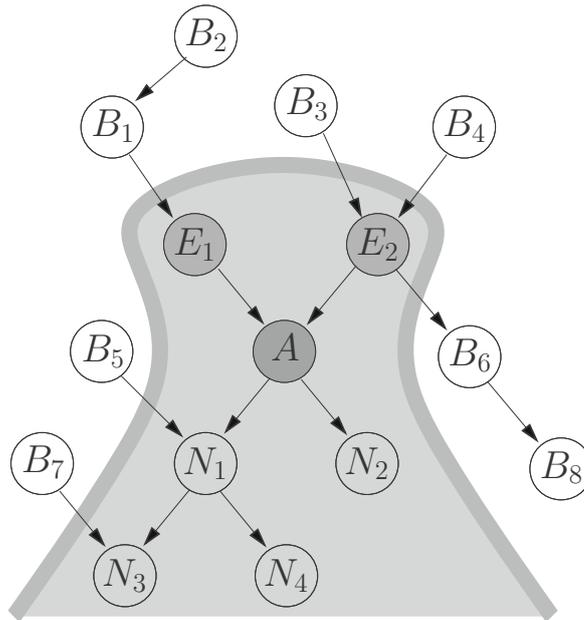


Abb. 2.7: Beispielnetz (Ertel, 2009)

Pfade miteinander verbunden sind. Das aus Knoten und Kanten bestehende Netz bildet einen gerichteten azyklischen Graphen (engl. directed acyclic graph, DAG).

Bezugnehmend auf Abb. 2.7 wird die Beziehung zwischen dem Knoten A und den anderen Knoten im Netz wie folgt unterschieden:

- Die von den Knoten E_1 und E_2 ausgehenden Kanten zeigen in Richtung A . E_1 und E_2 werden daher als Elternknoten $pa(A)$ bezeichnet.
- Die Knoten N_1 und N_2 sind die Kinder des Knotens A .
- Die Knoten B_1 bis B_4 und die Eltern E_1 und E_2 sind Vorgänger.
- Die Knoten N_1 bis N_4 sind Nachfolger.

Erstellung der Wahrscheinlichkeitstabellen

Als zweiter Schritt wird für jeden Knoten eine Tabelle mit bedingten Wahrscheinlichkeiten (engl. conditional probability table, CPT) aufgestellt.

Mindestens ein Knoten eines Netzes hat keine Eltern, da sonst die Bedingung eines azyklischen Graphen nicht erfüllt wäre. Für elternlose Knoten (z.B. B_2 in Abb. 2.7) wird die a-priori-Wahrscheinlichkeitsverteilung $P(X_i)$ eingetragen. Dennoch wird diese Tabelle auch als CPT bezeichnet. Da die Zustände des Knotens den gesamten Ereignisraum abdecken, ergibt die Summe der jeweilig definierten Wahrscheinlichkeiten 1.

Für alle anderen Knoten werden die Wahrscheinlichkeitstabellen mit bedingten Wahrscheinlichkeiten $P(X_i | pa(X_i))$ gefüllt. Für sämtliche Kombinationen für gegebene Zustände der Elternvariablen sind die zugehörigen bedingten Wahrscheinlichkeiten einzutragen. Auch hier muss jeweils die Summe der Einzelwahrscheinlichkeiten 1 ergeben.

Berücksichtigung von Vorinformationen

Sind das Netz mit seinen Knoten und Pfeilen erstellt und die bedingten Wahrscheinlichkeitstabellen definiert, können bereits Berechnungen durchgeführt werden.

Je nach Problem- bzw. Fragestellungen kann darüber hinaus der Zustand eines oder mehrerer Knoten durch Beobachtungen ε bekannt sein. Für diesen Fall beträgt die Wahrscheinlichkeit für diesen Knotenzustand 1 und im Umkehrschluss für sämtliche anderen möglichen Zustände des Knotens 0. Diese Vorinformation beeinflusst die Abhängigkeitsstruktur bzw. den Informationsfluss in einem DAG.

Abhängigkeiten und Informationsfluss

Für die Erstellung eines Bayesschen Netzes spielt die Kenntnis über den möglichen Informationsfluss im Netz eine wesentliche Rolle. Wird der Zustand eines Knotens, beispielsweise durch die Berücksichtigung einer Vorinformation geändert, so wirkt sich dies auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung sämtlicher von diesem Knoten abhängigen anderen Variablen aus.

Knoten, die direkt mit einer Kante verknüpft sind, sind voneinander abhängig. Wenn der Zustand eines oder mehrerer Elternknoten bekannt ist, wirkt sich diese Information auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung des betrachteten Knotens aus. Andererseits lassen sich auch aus bekannten Zuständen von Kinderknoten Rückschlüsse auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung des betrachteten Knotens ziehen (vgl. Beispiel Fabrik im Anhang B.1 auf Seite 157).

Für die Beschreibung der indirekten Abhängigkeits- bzw. Unabhängigkeitsbeziehungen in Bayesschen Netzen werden drei Fälle unterschieden:

Fall 1: Serielle Verbindung 

Fall 2: Divergierende Verbindung 

Fall 3: Konvergierende Verbindung 

Liegen keine Informationen vor, so sind zwei Knoten voneinander abhängig, wenn Sie über eine serielle und/oder divergierende Verbindung miteinander verbunden sind. Somit sind im Fall 1 und 2 die Knoten A und C voneinander abhängig, sofern B unbekannt ist. Folglich kann hier ein Informationsfluss zwischen A und C stattfinden.

Sind zwei Knoten ausschließlich über konvergierende Verbindungen miteinander verbunden, so sind sie voneinander unabhängig. Im Fall 3 sind bei unbekanntem B die Knoten A und C voneinander unabhängig.

Liegt eine Information über den mittleren Knoten vor, so ändern sich die Abhängigkeitsverhältnisse ins Gegenteil. Bei bekanntem B werden im Fall 1 und 2 die Knoten A und C voneinander unabhängig. Dagegen gibt die Kenntnis über den Knoten B im Fall 3 den Informationsfluss zwischen A und C frei.

Für das Netz in Abb. 2.7 gilt beispielsweise, dass bei gegebenen Elternknoten E_1 und E_2 ,

die Nichtnachfolger B_1 bis B_8 unabhängig von A sind (Ertel, 2009). Die bedingte Wahrscheinlichkeit $P(A | B_1, \dots, B_8, E_1, E_2)$ lässt sich daher zu $P(A | E_1, E_2)$ vereinfachen. Die Nachfolger N_1 bis N_4 sind weiterhin von A abhängig.

2.5.3 Rechnen mit Bayesschen Netzen

Bei einfachen Netzen erfolgt die Berechnung durch Ermittlung der Verbundwahrscheinlichkeit $P(U)$ aller Knoten (X_1, \dots, X_n) anhand der Kettenregel als Produkt der bedingten Wahrscheinlichkeiten aller Variablen (Jensen und Nielsen, 2001).

$$P(X_1, \dots, X_n) = P(X_n | X_1, \dots, X_{n-1})P(X_1, \dots, X_{n-1}) = \prod_{i=1}^n P(X_i | X_1, \dots, X_{i-1}) \quad (2.51)$$

Durch Berücksichtigung des Wissens über die Unabhängigkeit von Variablen bzw. der ausschließlichen Abhängigkeit von den Elternknoten $pa(X_i)$ lässt sich die Kettenregel in Gl. 2.51 nach Ertel (2009) stark vereinfachen.

$$P(U) = P(X_1, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | pa(X_i)) \quad (2.52)$$

Die wesentliche Aufgabe bei der Bayesschen Netzberechnung ist die Ermittlung der posteriori Wahrscheinlichkeitsverteilung eines bestimmten Knotens X . Diese lässt sich gemäß Kjaerulff und Madsen (2008) wie folgt ermitteln:

$$P(X) = \sum_{U \setminus \{X\}} P(U) = \sum_{U \setminus \{X\}} \prod_{i=1}^n P(X_i | pa(X_i)) \quad (2.53)$$

Liegen zusätzlich Vorinformationen $(\varepsilon = \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_m)$ über einzelne Knoten vor, so ergibt sich folgende Verbundwahrscheinlichkeit aller Knoten:

$$P(U, \varepsilon) = \prod_{i=1}^n P(X_i | pa(X_i)) \prod_{j=1}^m \varepsilon_j \quad (2.54)$$

Für einen nicht beobachteten Knoten berechnet sich die posteriori Wahrscheinlichkeitsverteilung unter Berücksichtigung der Vorinformation nach Jensen und Nielsen (2001):

$$P(X | \varepsilon) = \frac{P(X, \varepsilon)}{P(\varepsilon)} = \frac{\sum_{U \setminus \{X\}} P(U, \varepsilon)}{P(\varepsilon)} \quad (2.55)$$

Das Beispiel Alarmanlage im Anhang B.2 auf Seite 161 zeigt die praktische Anwendung obenstehender Rechenregeln.

Bei größeren Netzen mit vielen Knoten, die wiederum eine Vielzahl von Zuständen aufweisen können, ist die Verbundwahrscheinlichkeit sehr umfangreich, so dass eine händische Rechnung nicht praktikabel ist. Beinhaltet das Netz darüber hinaus azyklische Graphen, werden computergestützte Lösungsverfahren erforderlich. In dieser Arbeit wird die Software Hugin Educational 7.4 der Firma Hugin Expert A/S eingesetzt.

Die Berechnung erfolgt in diesem Programm durch schrittweise Überführung des Netzes in eine sekundäre Struktur, genannt junction tree oder Markov tree. Im ersten Schritt wird ein sogenannter moralischer Graph gebildet, der im zweiten Schritt in einen triangulierten Graphen überführt wird. Dieser besteht wiederum aus Teilgraphen (Cliques). Die Cliques bilden die Knoten des junction trees. Ausführliche Informationen zu den zugrundeliegenden Algorithmen finden sich in Cowell u. a. (1999), Kjaerulff und Madsen (2008) oder im Programmhandbuch (Hugin, 2016).

3 Schadensereignisse bei Gewichtsstaumauern

Die Talsperrenüberwachung dient nach DIN 19700-11 (2004) dem praktischen Nachweis der Zuverlässigkeit der Talsperre. Durch die regelmäßigen visuellen Kontrollen, die Auswertung der fortlaufend erhobenen Messdaten, Funktionskontrollen und Sicherheitsbewertungen sollen Auffälligkeiten erkannt, und das Bauwerk bei Bedarf rechtzeitig instand gesetzt werden, um die Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit der Anlage zu gewährleisten. Dabei ist die Kenntnis über mögliche Schadensereignisse von entscheidender Bedeutung.

In diesem Kapitel wird daher zunächst dargelegt, welche verschiedenen Versagensmechanismen bei Gewichtsstaumauern eintreten können. Dabei ist von Interesse, wo im Tragwerk möglicherweise eine Überbeanspruchung auftritt und auf welche Weise die Mauer dadurch versagen könnte.

Im zweiten Abschnitt werden mögliche Schadensursachen beleuchtet. An Hand einer Auswertung historischer Ereignisse werden sicherheitsrelevante Staumauerschäden ausgewählt und näher beschrieben. Diese Schadensbilder werden in Kapitel 6 numerisch simuliert, um daraus das Verhalten einer geschädigten Gewichtsstaumauer ableiten zu können.

Auf Basis dieser Vorüberlegungen wird in Kapitel 7 ein Bayessches Netz erstellt. Dabei fließen sowohl die Ergebnisse der numerischen Berechnungen als auch die aus diesem Kapitel abgeleiteten Eintrittswahrscheinlichkeiten für Staumauerschäden mit ein.

3.1 Versagensmechanismen bei Gewichtsstaumauern

Das Tragverhalten von Gewichtsstaumauern basiert auf dem statischen Prinzip, dass die auf das Bauwerk wirkenden äußeren Kräfte, wie der Wasserdruck und der Sohlwasserdruck, über das Eigengewicht in den Untergrund eingeleitet werden (Rissler, 1998). Im Gegensatz zu Bogenmauern, die die äußeren Kräfte über die Bogenwirkung vornehmlich in die seitlichen Talflanken abtragen, besitzen Gewichtsstaumauern daher einen massiven Mauerquerschnitt. Das Querprofil wird in der Regel dreiecksförmig, mit einer Erweiterung im Kronenbereich, ausgeführt. Im Grundriss haben die Mauern eine gerade oder leicht gekrümmte Achse.

Auf Grund des statischen Prinzips wird die konstruktive Ausbildung von Gewichtsstaumauern maßgeblich durch die Beschaffenheit des Untergrundes bestimmt. Daher ist das Absperrbauwerk und der Untergrund als einheitliches Tragwerk zu betrachten (DIN 19700-11, 2004). Nach Dachroth (2002) müssen nachfolgende globale Versagensmechanismen bei der Bemessung und Nachweisführung von Gewichtsstaumauern Berücksichtigung finden. Die den jeweiligen Versagensfällen zugehörigen Bewegungsrichtungen sind in Abb. 3.1 illustriert.

Gleiten

Als Gleiten wird das Rutschen der Mauer auf einer Gleitfläche bezeichnet. Dabei überschreiten die angreifenden Lasten die aktivierbaren widerstehenden Schwerkräfte (ICOLD EC, 2004). Das Gleiten kann in verschiedenen Ebenen des Bauwerks auftreten. Im Bereich der Mauer tritt das Gleiten in der Regel auf horizontalen Bauwerksfugen auf, wie beispielsweise den

Betonier- oder Mörtelfugen. Im Falle einer schlecht vorbehandelten Maueraufstandsfläche oder einer geringen Verzahnung bzw. Einbindetiefe der Mauer findet möglicherweise das Gleiten im Bereich der Sohlfuge statt. Da Gewichtsstau Mauern mit wenigen Ausnahmen auf Fels gegründet sind, findet dieser Versagensmechanismus im Bereich des Untergrundes in der Regel auf Trennflächen oder Störzonen im Fels statt.

Grundbruch

Die Versagensmechanismen „Gleiten im Untergrund“ und der „Grundbruch“ lassen sich nicht exakt abgrenzen (Möller, 2013). Bei diesem Versagensfall führt eine übermäßige vertikale Beanspruchung des Bauwerkfundamentes zu einer Überschreitung der Scherfestigkeit im Bereich unterhalb und unmittelbar neben der Gründung. Dabei erfolgt eine Bewegung des Baugrunds entlang mehrerer Gleitzonen, wodurch das Material schollenförmig zur Seite hin ausgetragen wird und das Bauwerk einsinkt (vgl. Abb. 3.1).

Kippen

Das sogenannte Kippen tritt bei Verlust des statischen Gleichgewichts infolge einer übermäßigen Momentenbeanspruchung auf. Dabei findet eine Rotationsbewegung um einen Fußpunkt statt, wenn die Materialzugfestigkeit an der Wasserseite beziehungsweise die Druckfestigkeit am luftseitigen Mauerfuß überschritten wird (Jansen, 1988). Dieser Versagensmechanismus tritt somit in Zusammenhang mit einem Gleitversagen auf. Als Maß zur Bewertung der Kippsicherheit wird oftmals die Ausmittigkeit der resultierenden Kraft herangezogen. Dieser Versagensfall tritt oftmals bei außergewöhnlich hohen Wasserständen auf, wenn eine starke horizontale Beanspruchung durch den Wasserdruck vorliegt und ein erhöhter Auftrieb der Gewichtskraft entgegenwirkt.

Setzungen und Verschiebungen

Ungleichmäßige Setzungen und Verschiebungen im Untergrund können zu einer übermäßigen Zugbeanspruchung der Mauer mit einhergehender Rissbildung führen. Nach Dachroth (2002) kommen dabei folgende geogene Ursachen in Betracht:

- Infolge des Eigengewichts der Mauer können insbesondere bei inhomogenen Gründungsverhältnissen unebene Setzungen auftreten. Bei Felsgründungen sind die Setzungsbeiträge im Regelfall jedoch sehr klein.
- Hangabwärts gerichtete schwerkraftbedingte Rutschungen von Böden und Felsmassen im Umfeld der Talsperren können ebenfalls zu ungünstigen Deformationen im seitlichen Widerlagerbereich führen.
- Erdfälle und Bodensenkungen im Gründungsbereich von Gewichtsstau Mauern kommen auf Grund der umfangreichen geologischen Baugrunderkundung und Baugrundverbesserungen sowie der üblicherweise dort anstehenden Gesteinsarten nur äußerst selten vor.
- In erdbebengefährdeten Gebieten können zudem Beben und tektonische Bewegungen entlang von Störzonen zu Deformationen im Gründungsbereich der Mauern führen.

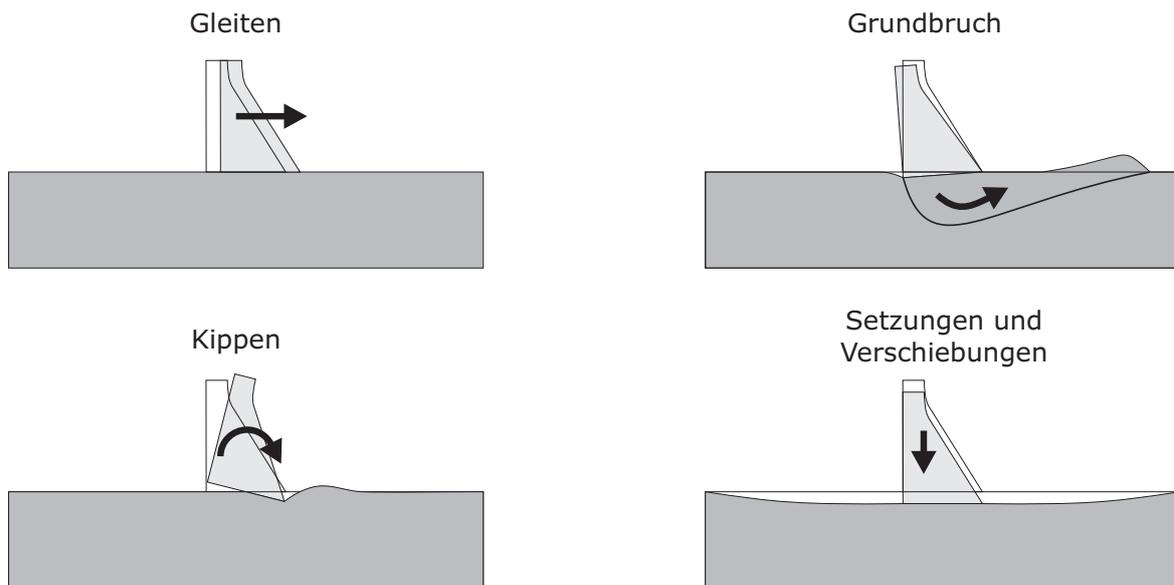


Abb. 3.1: Globale Versagensmechanismen bei Gewichtsstaumauern

3.2 Statistik historischer Schadensereignisse

Im Allgemeinen werden Talsperren fortlaufend eingehend kontrolliert, so dass Bauwerksschäden meist frühzeitig aufgedeckt und durch geeignete Vorkehrungsmaßnahmen Versagensfälle rechtzeitig vermieden werden können. Im Vergleich zu anderen Bauwerken ist daher die Anzahl von Versagensfällen relativ gering.

Im Folgenden werden historische Schadensereignisse von Talsperren analysiert und deren maßgebliche Schadensursachen identifiziert, um daraus Auftretenswahrscheinlichkeiten für Staumauerschäden abzuleiten. Diese werden später bei der Erstellung des Bayesschen Netzes in Kapitel 7 berücksichtigt.

3.2.1 Datengrundlage der statistischen Auswertung

Die statistische Auswertung bezieht sich auf die Datengrundlage folgender Quellen:

ICOLD Verzeichnis von Schadensursachen bei Talsperren

Die Internationale Kommission für große Talsperren (ICOLD/CIGB) führt ein Register von weltweit existierenden großen Talsperren. Als „groß“ gelten dabei Bauwerke mit einer Höhe von über 15 m. Darüber hinaus werden auch Sperren mit einer Höhe von über 10 m dieser Kategorie zugeordnet, sofern diese zusätzlich eine Kronenlänge von über 500 m oder einen Speicherraum von mehr als einer Mio. m³ oder ein Bemessungshochwasser von mehr als 2.000 m³/s aufweisen oder sich durch besonders schwierige Gründungsprobleme oder einen ungewöhnlichen Entwurf auszeichnen (DTK, 2003). Das World Register of Dams (WRD) enthält gegenwärtig Informationen zu mehr als 33.000 Talsperren und wird fortlaufend aktualisiert.

Neben dem Talsperrenregister wurden von der ICOLD in der Vergangenheit mehrere Zusammenstellungen von Schadensereignissen veröffentlicht (ICOLD, 1973, 1983, 1995). Hier werden die historischen Vorfälle hinsichtlich unterschiedlichster Gesichtspunkte ausgewertet und klassifiziert. Ein Kriterium ist dabei die Schadensursache der Ereignisse. Für die unterschiedlichen Talsperrentypen: Betonsperren, Erd- und Steinschüttdämmen sowie Bruchsteinmauern, wurde eine detaillierte Kodifizierung für Schadensursachen mit insgesamt 216 Kategorien ausgearbeitet. Diese Zusammenstellung ist in ICOLD (1983) aufgeführt.

Datenbank von Schadensereignissen bei Talsperren CONGDATA

Die meisten publizierten Statistiken zu Talsperrenkatastrophen beziehen sich auf die oben genannten ICOLD Studien. Auch Douglas u. a. (1998) haben diese Datengrundlage aufgegriffen und durch Informationen aus Datenbeständen weiterer Institutionen sowie umfangreichen Literaturstudien ergänzt und daraus eine Datenbank mit dem Namen CONGDATA erstellt. Auf Basis statistischer Analysen entwickelten die Autoren ein Verfahren zur überschlägigen Ermittlung von Versagenswahrscheinlichkeiten von Gewichtsstau Mauern (Douglas u. a., 1999).

In der Datenbank sind mehr als 4.600 Stau Mauern (Gewichtsstau Mauern, Pfeilermauern, einfach und doppelt gekrümmte Bogenmauern) aus 29 Ländern registriert. Damit ist diese Zusammenstellung weltweit eine der umfangreichsten ihrer Art. Die Vorkommnisse an Stau Mauern werden dabei drei Kategorien zugeordnet:

- Als **Versagensfall** wird ein Vorfall bezeichnet, bei dem an einer Talsperre eine Bewegung oder Bruch auftritt und große Wassermengen unkontrolliert abgegeben werden.
- Als **Unfall** wird ein Schadensereignis definiert, das nicht zu einem Bruch der Mauer führte, weil unverzüglich Maßnahmen getroffen wurden und somit eine Versagensfall abgewendet werden konnte.
- Unter **grundlegenden Instandsetzungen** werden aufwändige und für die Standsicherheit relevante Sanierungsmaßnahmen verstanden, wie beispielsweise eine umfangreiche Erneuerung von gealtertem Sperrbeton.

Im Folgenden wird ausschließlich auf die Gewichtsstau Mauern näher eingegangen. Tabelle 3.1 zeigt die Gesamtanzahl der historischen Schadensereignisse sowie die Gesamtanzahl der dabei als maßgeblichen festgestellten Schadensursachen. Aus der Tabelle geht hervor, dass ein Schadensereignis in der Regel aus dem Zusammenspiel mehrerer Ursachen resultiert.

Tab. 3.1: Anzahl historischer Schadensereignisse bei Gewichtsstau Mauern nach Douglas u. a. (1998)

	Versagensfall	Unfall	grundlegende Instandsetzung	Summe
Anzahl der Schadensereignisse	31	61	204	296
Anzahl der Ursachen für die Schadensereignisse	81	123	343	547

3.2.2 Wesentliche Erkenntnisse bei der Auswertung der Versagensfälle

Bei den insgesamt 31 Versagensfällen der Datenbank handelt es sich um 21 Vorkommnisse bei Bruchsteinmauern und 10 Ereignisse bei Gewichtsstau Mauern aus Beton. Dabei können gemäß Douglas u. a. (1998) und ICOLD (1995) folgende Kenntnisse gewonnen werden:

- Im Laufe der Jahre haben sich die Nachweisverfahren für Gewichtsstau Mauern, die eingesetzten Materialien sowie die Baugrunderkundungs- und Fertigungsverfahren stetig verbessert. Daher weisen ältere Talsperren, die vor 1930 errichtet wurden, eine größere jährliche Versagenswahrscheinlichkeit als jüngere Sperren auf ($P_{<1930} = 3,3 \cdot 10^{-4} 1/a$ versus $P_{\geq 1930} = 5,5 \cdot 10^{-5} 1/a$).
- Die Versagenswahrscheinlichkeit einer Gewichtsstau Mauer ist während der ersten fünf Betriebsjahre am größten ($P_{\leq 5a} = 7,9 \cdot 10^{-4}$ versus $P_{>5a} = 1,1 \cdot 10^{-4}$). In dieser Zeit zeigt sich, ob die theoretischen Annahmen der Planung mit den realen Gegebenheiten übereinstimmen. Während in den Anfangsjahren die Versagensursachen überwiegend auf mangelnde Materialfestigkeit des Untergrundes und des Absperrbauwerks zurückzuführen sind, treten Talsperrenkatastrophen bei älteren Sperren überwiegend auf Grund von in der Planung unterschätzten extremen Hochwasserereignissen und unzureichend bemessenen Hochwasserentlastungsanlagen auf.
- Die Standsicherheit von Talsperren hängt stark vom Untergrund ab. Während bei Lockergestein und Kalkstein tendenziell eher Sickerungsfolgeschäden eintreten, neigen Mauern die auf Schiefer gegründet wurden, zu einem Scherversagen.
- Bei etwa 55 % der 31 Versagensfälle liegen darüber Informationen vor, ob sich das Ereignis in irgendeiner Form angekündigt hat oder ob keine besonderen Anzeichen vorlagen. Wie die Grafik in Abb. 3.2 verdeutlicht, liegen bei 68 % der Fälle Anzeichen vor. Dabei kündigen sich Schadensereignisse am häufigsten durch Auffälligkeiten bei der Sickerwassermessung an. Von besonderer Bedeutung sind darüber hinaus visuelle Kontrollen der Sperre und der luftseitigen Talflanken, um Hangrutschungen, Hangquellen oder Deformationen und Rissbildungen zu identifizieren. In 32 % der Fälle deuten dagegen keine Anzeichen auf eine Schädigung der Sperre hin.

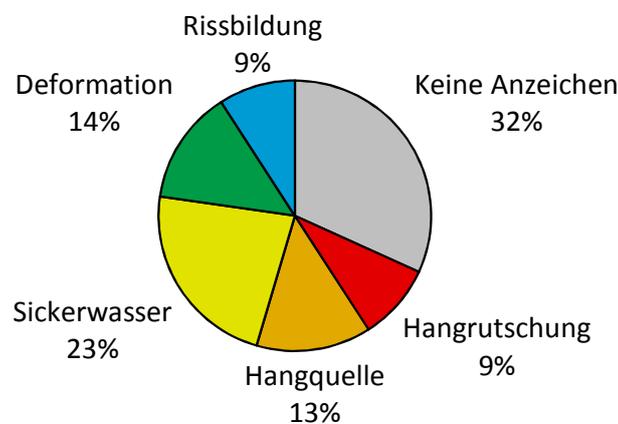


Abb. 3.2: Anzeichen vor dem Eintritt der historischen Versagensfälle von Gewichtsstau Mauern (Datengrundlage: Douglas u. a. (1998))

- Der Schadensumfang bei einer Talsperrenkatastrophe hängt direkt mit dem gespeicherten Wasservolumen zusammen, das bei einem Bruch unkontrolliert abgegeben wird. Darüber hinaus stellt die Wasserlast auch die maßgebliche Einwirkung auf das Absperrbauwerk dar. Aus diesem Grund treten Schadensereignisse in der Regel bei außergewöhnlich hohen Wasserständen auf. Wie Abb. 3.3 verdeutlicht, befand sich der Wasserstand bei 72 % der Ereignisse auf einem Rekordstand. Rund 24 % der Unglücke ereignen sich während des Ersteinstaus, in 3 % der Fälle ist die Hochwasseranlage erstmals in Betrieb und bei weiteren 45 % der Ereignisse wird überdies die Mauerkrone unplanmäßig überströmt. Die restlichen 28 % teilen sich auf normale Betriebszustände und gewöhnliche Hochwasserereignisse auf.

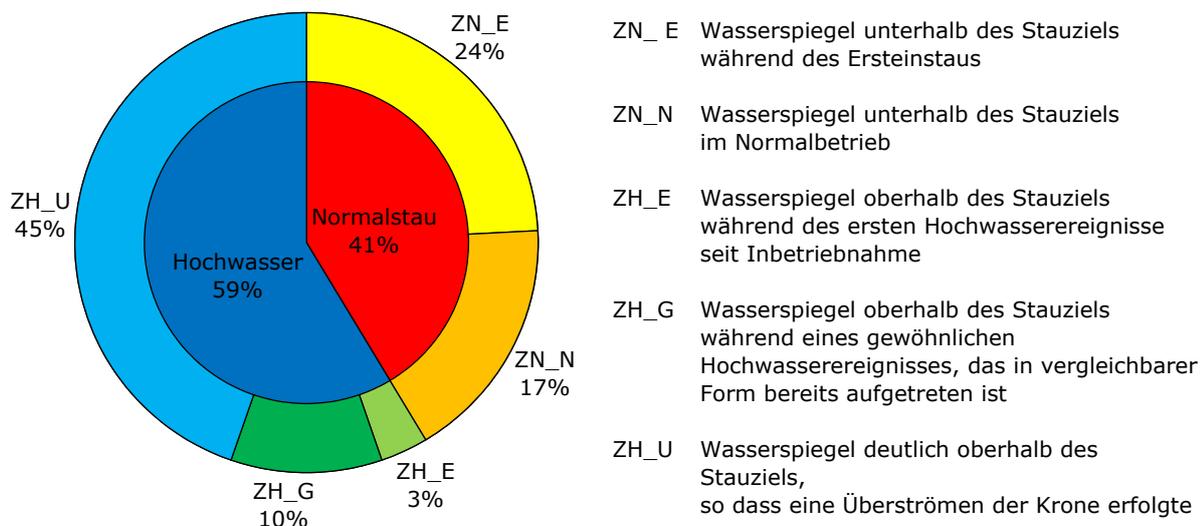


Abb. 3.3: Verteilung der Wasserspiegellagen während der Versagensereignissen von Gewichtsstaumauern (Datengrundlage: Douglas u. a. (1998))

Auf Grund der Bedeutung des Wasserstandes auf die Standsicherheit einer Talsperre wird diese Größe im Kapitel 6 „Finite-Element-Modellierung der idealisierten Mauer“ als Indikator für die Schwere des Schadensereignisses herangezogen. Dabei wird analysiert, ab welchem kritischen Wasserstand im Speicher ein Versagen der geschädigten Talsperre eintritt.

3.2.3 Auswahl relevanter Talsperrenschäden

Auf Grund des großen Umfangs von möglichen Schadensarten, wird in dieser Arbeit nicht auf jede der in ICOLD (1983) aufgeführte Schädigung eingegangen. Stattdessen erfolgt eine Beschränkung auf maßgebliche Schadensbilder, die in der Vergangenheit bei Gewichtsstaumauern mehrfach aufgetreten sind und sich mittels messtechnischer Talsperrenüberwachung aufdecken lassen könnten.

Für die Erstellung des Bayesschen Netzes in Kapitel 7 sind sinnvolle Annahmen bezüglich der Auftretenswahrscheinlichkeit der Schadensereignisse ungeachtet von deren Entdeckungswahrscheinlichkeit zu treffen. Die Auswahl relevanter Schädigungen stützt sich daher nicht nur auf die Ursachen der 31 Versagensfälle, sondern bezieht auch die dokumentierten Unfälle

und grundlegenden Instandsetzungen aus CONGDATA mit ein. Dadurch wird dem Umstand Rechnung getragen, dass sich manche Schadensprozesse leichter aufdecken lassen und somit ein Versagen der Mauer durch rechtzeitiges Ergreifen von Maßnahmen verhindert werden kann.

Die Auswertung der historischen Schadensereignisse von CONGDATA zeigt, dass lediglich 103 der insgesamt 216 in der ICOLD Kodifizierung zusammengestellten potenziellen Ursachen zu nennenswerten Schäden an Gewichtsstaumauern geführt haben. Die Tabelle C.1 im Anhang C enthält eine Auflistung dieser dokumentierten Schadensereignisse. Dabei werden vereinfachend für die verschiedenen Bauwerkskomponenten der Talsperre entsprechende Oberkategorien eingeführt, denen die ICOLD Kodifizierungen zugeordnet sind.

Das Kreisdiagramm in Abb. 3.4 stellt die prozentuale Häufigkeit der den Bauwerkskomponenten zugeordneten Schadensursachen dar. Dabei ist ersichtlich, dass rund die Hälfte aller Schädigungen im Zusammenhang mit dem Absperrbauwerk stehen, gefolgt von den Betriebseinrichtungen und Nebenanlagen mit 24 %, und Schadensprozessen im Untergrund mit 17 %. Schäden im Speicherbecken, im Unterwasser oder grundlegende Mängel bei der Konzeption der Gesamtanlage spielen dagegen kaum eine Rolle.

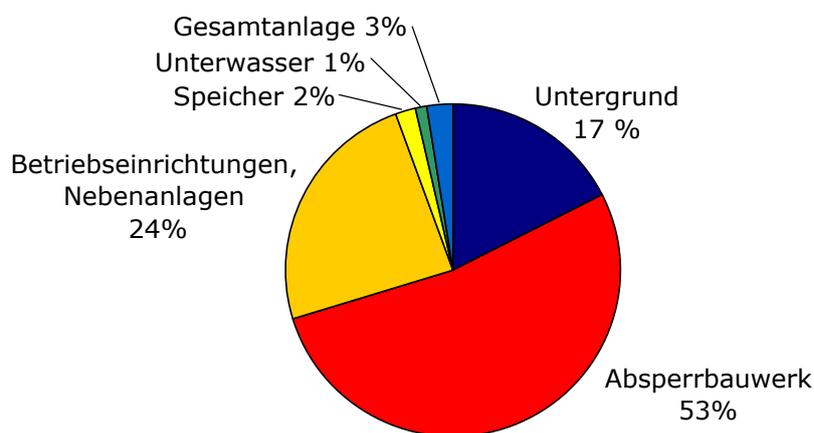


Abb. 3.4: Prozentuale Häufigkeit der den Bauwerkskomponenten der Gewichtsstaumauern zugeordneten Schädigungen

Die Tabelle C.1 im Anhang C beinhaltet darüber hinaus eine Bewertung, inwiefern sich die jeweiligen Schadensereignisse durch geeignete Untersuchungsmaßnahmen aufdecken lassen. Eine graphische Darstellung der prozentualen Anteile der jeweiligen Maßnahmen ist in Abb. 3.5 dargestellt. Dabei sind Schädigungsprozesse, die sich durch mehrere Methoden identifizieren lassen, anteilig in der Auswertung berücksichtigt.

Die Abbildung 3.5 verdeutlicht, dass alle drei in der DIN 19700-10 aufgeführten Komponenten der Talsperrenüberwachung für die Sicherheit der Talsperre wichtig sind.

Rund 30 % der Schäden lassen sich durch visuelle Kontrollen aufdecken. Selbst eine äußerst umfangreiche messtechnische Überwachung kann regelmäßige Begehungen nicht kompensieren, da einige Prozesse, wie beispielsweise die Oberflächenerosion, Feuchtstellen oder Rissbildungen, sich ausschließlich visuell identifizieren lassen. Dies trifft insbesondere auf die Hangbereiche der Widerlager zu, wo Änderung im Bewuchs (z. B. Säbelwuchs von Bäumen oder Moosbildung) Anzeichen für Bewegungen und Durchströmungen sind.

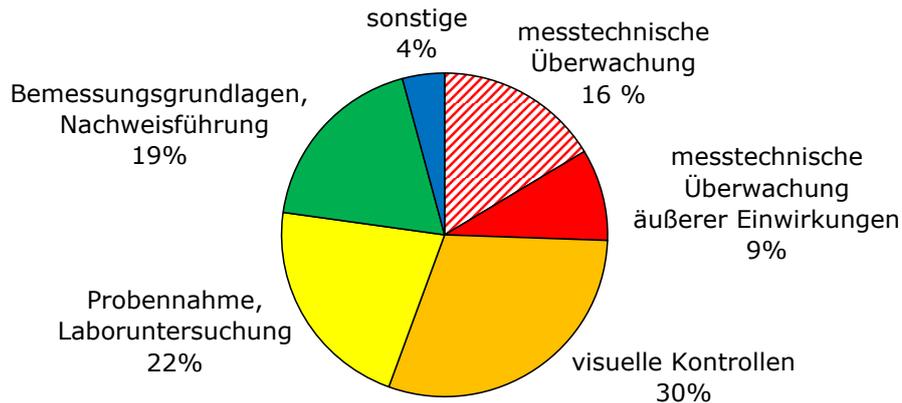


Abb. 3.5: Prozentuale Häufigkeit geeigneter Untersuchungsmaßnahmen zur Identifizierung von Talsperrenschädigungen

Die in größeren Zeitabständen stattfindenden vertieften Überprüfungen der Talsperre spielen ebenfalls eine bedeutende Rolle. Dabei werden zum einen basierend auf den gültigen Regelwerken die damaligen hydrologischen, hydraulischen und statischen Bemessungsgrundlagen geprüft und zum anderen mit aktuellen Methoden die hydraulischen Nachweise und Standsicherheitsnachweise erneut geführt. Dabei sind oftmals labortechnische Untersuchungen von Materialproben erforderlich, um die für die Nachweisführung erforderlichen Materialkennwerte abzuleiten.

Der letzte wesentliche Faktor für die Sicherheit der Talsperre ist die regelmäßige messtechnische Bauwerksüberwachung. Dabei ist eine zeitnahe Auswertung der Messdaten von entscheidender Bedeutung. In dieser Arbeit wird dabei vornehmlich auf den in Abb. 3.5 dargestellten schraffierten Bereich eingegangen, der die Messdatenauswertung der Bauwerksreaktion beinhaltet. Daher werden im Folgenden lediglich die Schädigungen der Talsperre aus Tab. C.1 im Anhang C näher beleuchtet, die sich messtechnisch erfassen lassen.

Die jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit der Schädigungen berechnet sich aus der Anzahl der Vorkommnisse dividiert durch die Summe der Betriebsjahre sämtlicher Gewichtsstau Mauern. Für die Grundgesamtheit der in Douglas u. a. (1998) berücksichtigten Gewichtsstau Mauern wird unter Berücksichtigung der Altersstruktur eine Gesamtsumme von etwa 172.300 Betriebsjahre abgeschätzt. Somit ergeben sich die in Tab. 3.2 aufgeführten Auftretenswahrscheinlichkeiten für die ausgewählten Talsperrenschädigungen.

An diese Stelle ist anzumerken, dass im internationalen Vergleich in Deutschland sehr hohe Sicherheitsanforderungen an Talsperren gestellt werden und die Talsperrenüberwachung dabei einen sehr wichtigen Stellenwert einnimmt. Die beiden großen Versagensfälle an der Möhnestaumauer und Ederstaumauer im 2. Weltkrieg wurden mutwillig durch den Menschen verursacht. Da sich die in Tab. 3.2 aufgeführten Auftretenswahrscheinlichkeiten auf eine internationale Datengrundlage beziehen, sind die Wahrscheinlichkeiten für Schäden in Deutschland nochmals deutlich geringer. Auf der sicheren Seite liegend erfolgt in dieser Arbeit jedoch keine Anpassung dieser Werte.

Tab. 3.2: Auftretenswahrscheinlichkeit ausgewählter Talsperrenschädigungen nach Douglas u. a. (1998)

Schädigung der Gewichtsstau mauer	Anzahl der Schadensereignisse	Auftretenswahrscheinlichkeit
Mängel an der Vorsatzschale (z.B. unzulängliche Frostbeständigkeit)	60	$3,5 \cdot 10^{-4}$
mangelhafte Materialbeständigkeit des Absperrbauwerks (z.B. AAR, Auswaschung von Calciumhydroxid)	50	$2,9 \cdot 10^{-4}$
zu große Sickerwasserströmung im Untergrund, Innere Erosion	48	$2,8 \cdot 10^{-4}$
untolerierbar hohe Materialdurchlässigkeit des Absperrbauwerks	31	$1,8 \cdot 10^{-4}$
fehlerhafte Ausführung, Schäden oder Mängel bei der Reinigung der Untergrunddrainagen	16	$9,3 \cdot 10^{-5}$
Verformungen und Setzungen des Untergrunds	6	$3,5 \cdot 10^{-5}$
mangelhafte Ausführung oder Beschädigung des Dichtungsschleiers bzw. der Untergrundabdichtungen	4	$2,3 \cdot 10^{-5}$

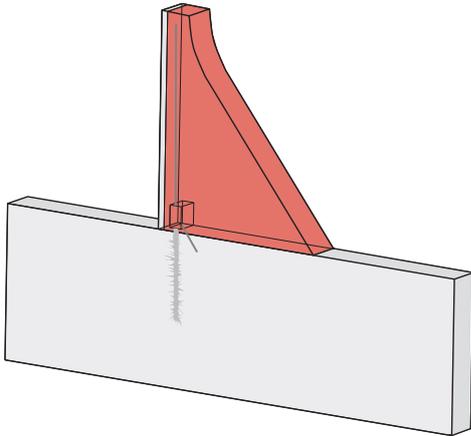
3.3 Beschreibung der berücksichtigten Staumauerschäden

Die im vorangegangenen Abschnitt selektierten und für die weiteren Auswertungen in dieser Arbeit als relevant erachteten Talsperrenschäden werden im Folgenden näher erläutert. Eine Zusammenstellung dieser Schäden lässt sich Abb. 3.6 entnehmen.

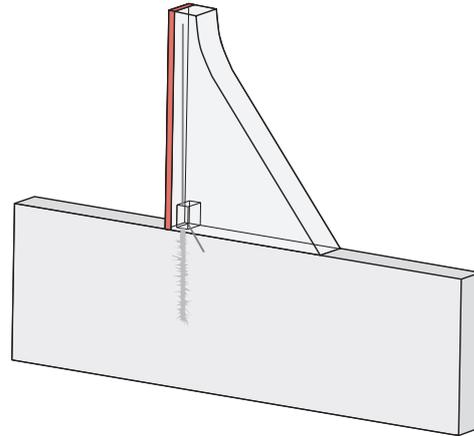
3.3.1 Schädigung des Kernbetons oder Bruchsteinmauerwerks

Gewichtsstau mauern besitzen einen massiven dreiecksförmigen Stützkörper aus Beton oder aus Bruchsteinmauerwerk, um die äußeren Krafteinwirkungen sicher abzutragen. In erster Linie werden dabei Anforderungen an die Materialfestigkeit und die Materialdurchlässigkeit gestellt. Nachfolgende Ursachen können für eine Schwächung des Kernbereichs der Talsperre verantwortlich sein.

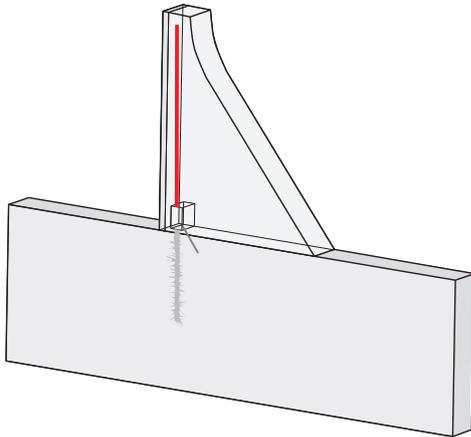
- Bei älteren Gewichtsstau mauern entspricht der damalige Kenntnisstand bezüglich der Herstellung und der Bauausführung von Bruchsteinmauerwerk und Beton nicht den heutigen Kriterien. Die Verwendung ungewaschener Zuschläge mit schlecht abgestufter Körnung und ungünstigen Wasserzementwerten führen zu einer minderwertigen Qualität des Mörtels oder des Betons. Infolge einer unzureichenden Vor- und Nachbehandlung sowie Kühlung beim Abbindeprozess der Bindemittel können Schwindrisse auftreten. Durch den schlechten Verbund entstehen zwischen den Steinen und dem Mörtel bzw. den einzelnen Betonierabschnitten Fugen mit geringer Festigkeit. Dar-

Schädigung des Kernbetons oder
Bruchsteinmauerwerks

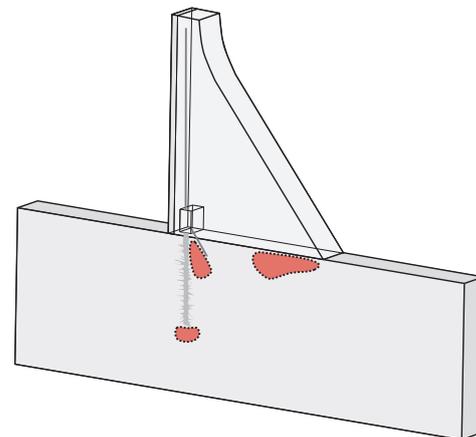
Schäden an der Vorsatzschale



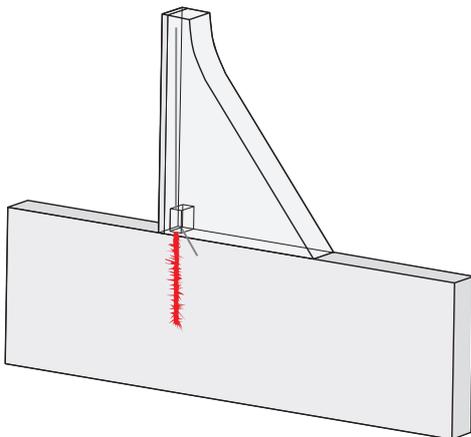
Schäden an den Mauerdrainagen



Schadensprozesse im Untergrund



Schäden am Dichtungsschleier



Schäden an den Untergrunddrainagen

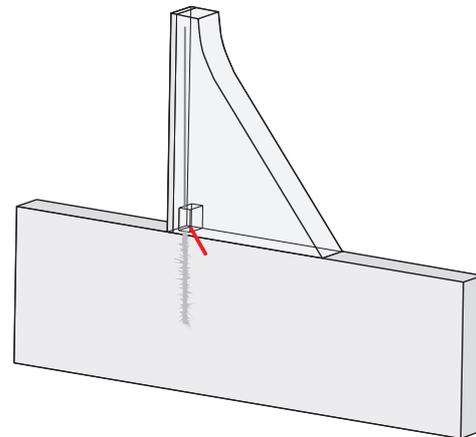


Abb. 3.6: Auswahl möglicher Schadensfälle bei Gewichtsstaumauern

über hinaus führt eine unzulängliche Verdichtung oder Entmischung beim Einbau zu Kiesnestern und Hohlräumen im Beton.

- Eine mangelhafte Materialbeständigkeit des Mauerwerks oder Betons kann unterschiedliche Ursachen haben. Bei sehr starker Durchströmung des Absperrbauwerks mit Sickerwässern, die eine hohe Konzentration von betonangreifenden Inhaltsstoffen aufweisen, kann nach Weber (2009) langfristig durch Auswaschung von Mörtel- bzw. dem Betoninhaltsstoffen eine Materialschwächung eintreten. Dazu gehören nach DIN 4030-1 (2008) saure, weiche oder salzhaltige Wässer. Um diesem Schädigungsprozess entgegenzuwirken, bieten sich Sanierungsmaßnahmen an der wasserseitigen Vorsatzschale und der Mauerdrainage an oder es können nach DWA-M 506 (2006) Injektionen von hydraulischen Bindemitteln in das Bruchsteinmauerwerk oder in den porösen Mauerbeton erfolgen.
- Des Weiteren führen unterschiedliche Reaktionen zwischen den Mauerwerks- bzw. Betonbestandteilen und der Umgebung infolge einer Volumenausdehnung zu einer merklichen Entfestigung des Materialgefüges. In Tab. 3.3 sind einige dieser Treibreaktionen zusammengestellt.

Tab. 3.3: Schädliche Treibreaktionen im Mörtel oder Beton

Treibreaktionen	Kurzbeschreibung	weiterführende Literaturquellen
Alkali-Kieselsäure-Reaktion	Reaktion zwischen löslicher Kieselsäure der Zuschläge und den Alkalien des Zementsteins (Na^+ , K^+).	Hunkeler u. a. (2007), ICOLD (2008)
Ettringittreiben	Reaktion zwischen dem Calciumaluminathydrat und mobilisierter Sulfate führen zu einer Bildung von sekundärem Ettringit.	Bollmann (2000)
Gipstreiben	Reaktion zwischen Calciumhydroxid und Sulfat aus der Gesteinskörnung oder der Umgebung unter Bildung von Gips.	Mulenga (2002), Ruffert (1999)
Schädigung durch Thaumazit	Bildung von Thaumazit durch Kieselsäure, Carbonat, Sulfat, Wasser und Calcium führt zu einem Verlust der Gefügefestigkeit.	Mulenga (2002)

3.3.2 Schäden an der Vorsatzschale

Die wasserseitige Vorsatzschale schützt den Kernbeton vor mechanischen Einwirkungen und dient insbesondere der Abdichtung gegenüber dem gestauten Talsperrenwasser. Grundsätzlich können bei unsachgemäßer Ausführung oder bei Verwendung einer ungeeigneten Betonrezeptur ähnliche Schädigungsmechanismen wie beim Kernbeton auftreten. Darüber hinaus führen folgende Schadensfälle zu einer Beeinträchtigung der Wirksamkeit der Vorsatzschale:

- Grobe mechanische Einwirkungen, wie beispielsweise bei einem frontalen Schiffsanprall, schädigen die Vorsatzschale. Im Bereich der Entnahmeanlagen ist die Oberflächenbeanspruchung besonders groß. Treibgut, Schwebstoffe oder Geschiebe bewirken dort einen Abrasionsverschleiß. Bei hohen Fließgeschwindigkeiten können darüber hinaus Erosionsschäden infolge Kavitation auftreten (Saxena und Sharma, 2005).
- Insbesondere im Bereich der Wasserwechselzone führen Frost-Tau-Wechsel häufig zu Schäden an der Vorsatzschale. Dabei dringt Wasser über Poren und Risse in den Beton ein und gefriert dort bei Temperaturen unter dem Nullpunkt. Die mit der Eisbildung verbundene Volumenausdehnung, führt zu Abplatzungen an der Betonoberfläche. In der Regel sind die Vorsatzschalen so dimensioniert, dass erst massive Schädigungen die Dichtheit der Vorsatzschale nachhaltig beeinträchtigen. Die Mauerbrüstung und exponierte Bauwerkskomponenten der Nebenanlagen sind ebenfalls anfällig gegenüber einer Frostbeanspruchung (Saxena und Sharma, 2005).
- Während der Kernbeton von Talsperren unbewehrt ist, können Vorsatzschalen auch teilweise mit Bewehrung ausgeführt sein. In diesen Fällen kommt als weiterer Schadenprozess die Korrosion der Bewehrung in Betracht, zumal die feuchten Umgebungsverhältnisse eine Carbonatisierung des Betons begünstigen. Talsperren mit chloridhaltigen Zuflüssen sind dabei besonders gefährdet (Yu, 2006).

Die meisten Mängel an der Vorsatzschale lassen sich durch eine visuelle Inspektion der Oberfläche bei reduziertem Stau vom Wasser aus aufdecken. In BAW (2011b) sind mögliche Schadensbilder und deren Ursachen näher spezifiziert. Bereiche die unterhalb der Wasserwechselzone liegen und ganzjährig mit Wasser benetzt sind, weisen in der Regel kaum Schäden auf.

3.3.3 Schäden an den Mauerdrainagen

Insbesondere Bruchsteinmauern und ältere Gewichtsstauwauern aus Beton verfügen über Drainagen, die hinter der Vorsatzschale bzw. im Bereich des Mauerkörpers angeordnet sind. Über diese wird eindringendes Sickerwasser abgeführt, um eine großräumige Durchströmung des Mauerquerschnittes zu verhindern. Die in ICOLD (1983) und Douglas u. a. (1998) dokumentierten Schadensfälle an Drainagen beziehen sich auf Untergrunddrainagen, die zur Reduktion des Porenwasserdrucks an der Maueraufstandsfläche eingesetzt werden. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass auch die Funktionstüchtigkeit der Mauerdrainagen nicht immer gewährleistet ist. Daher wird auf diesen Schadensfall ebenfalls eingegangen.

Folgende Ursachen können zu Schäden an den Mauerdrainagen führen:

- Schon während des Talsperrenbaus werden bei unsachgemäßer Ausführung bereits verlegte Drainageleitungen zerquetscht oder Rohrverbindungen durchtrennt. Darüber hinaus können Rohrverstopfungen durch flüssigen Beton oder Injektionsmaterial auftreten (Hildebrandt, 2006).
- Ein häufig auftretendes Problem ist ein fortschreitendes Zusetzen der Drainageleitungen durch mineralische Ablagerungen. Dabei spielen biologische Vorgänge durch Bakterien und Pilze sowie chemische Prozesse eine Rolle (Saxena und Sharma, 2005). Im Sickerwasser gelöste Ionen wie Calcium, Eisen oder Mangan führen beim Kontakt mit Luft zu Ausfällungen und bilden Versinterungen bzw. Verockerungen. Begünstigt werden

diese Prozesse durch den Kontakt des Sickerwassers mit kalkhaltigen Bindemitteln des Betons oder dem Mörtel der Bruchsteinmauern.

Eine mögliche Maßnahme, um die Bildung von Sinter zu verringern, ist die Anordnung eines Siphons im Auslaufbereich der Drainageleitungen. Dadurch wird eine Luftströmung in der Leitung unterbunden und sedimentierte Feinteile werden im Siphonrohr zurückgehalten (Girmscheid u. a., 2003b).

Um einer Versinterung der Drainagen entgegenzuwirken, ist bei der Herstellung auf leicht zugängliche Geometrien zu achten, damit Reinigungsarbeiten nicht behindert werden. Im Regelfall sind alljährliche Spülungen der Drainagen zur Gewährleistung der Funktionstüchtigkeit ausreichend. In schwerwiegenderen Fällen sind eine hydromechanische Reinigung mit Ketten- oder Seilschleudern, mechanische Verfahren mit Schlagbohrfräsen oder eine chemische Reinigung erforderlich (Girmscheid u. a., 2003a).

3.3.4 Schadensprozesse im Untergrund

Während aller Bau- und Betriebsphasen muss der Untergrund den Belastungen des Absperrbauwerks, des Stauraumes sowie weiteren äußeren Einwirkungen widerstehen können, ohne dass unzulässige Deformationen auftreten oder zu große Sickerwassermengen aus dem Stauraum austreten. Am Standort des Absperrbauwerks werden daher vor dem Bau der Mauer großflächig Bodenüberlagerungen und angewitterte mürbe Felspartien abgetragen bzw. abgesprengt. Im Bedarfsfall erfolgt zusätzlich eine Vergütung der Aufstandsfläche durch Injektionsmaßnahmen. Auf die Beschreibung von Schadensprozessen bei Gründungen auf Lockergestein, wie beispielsweise die Sickerrohrbildung, wird im Folgenden verzichtet, da Gewichtsstau Mauern vornehmlich auf Fels gegründet sind.

Weist der Fels Klüfte oder Trennflächen mit Füllungen aus erodierbarem Material auf, so könnten bei der Durchströmung des Untergrundes Partikel aus dem Korngerüst gelöst werden (Prinz und Strauss, 2011). Dies ist der Fall, wenn der von der Kornverteilung, Lagerungsdichte und Kohäsion der Füllung abhängige kritische hydraulische Strömungsgradient überschritten wird (vgl. Gleichung 6.20) und gleichzeitig Hohlräume oder freie Oberflächen existieren, wo sich die Einzelkörner ablagern können (Stahlmann, 1991). Dies gilt beispielsweise für den Abtransport durch offene Trennflächen oder Drainagen und trifft auf die Austrittsfläche am luftseitigen Mauerfuß zu. Unter diesen Voraussetzungen kann sich eine rückschreitende Erosion entwickeln.

Bestimmte Sedimentgesteine (Ton-, Sand- oder Mergelsteine) neigen dazu aufzuweichen. Des Weiteren können, wie in (Prinz und Strauss, 2011) näher erläutert, Lösungen von Karbonatgesteinen (Kalkstein, Kalkmergelstein, Dolomit) oder von salzhaltigen Einlagerungen auftreten. Ein weiterer Schadensmechanismus ist die Umwandlung von im Untergrund eingelagertem Anhydrit zu Gips mit einhergehender Volumenzunahme.

Auf die Problematik von Verformungen und Setzungen des Untergrunds wurde bereits in Abschnitt 3.1 eingegangen.

3.3.5 Schäden am Dichtungsschleier

Um die Unterläufigkeit der Absperrbauwerke zu reduzieren, erfolgen vom Kontrollgang oder von der Herdmauer aus Abdichtungen des Untergrundes. Ein weiterer für die Standsicherheit

positiver Effekt bei einer an der Wasserseite angeordneter Dichtung ist, dass der Potenzialabbau überwiegend im Untergrundbereich mit geringer Durchlässigkeit stattfindet und dadurch der Porenwasserdruck im luftseitigen Gründungsbereich vermindert ist.

Da Gewichtsstauwauern vornehmlich auf Fels gegründet sind, werden überwiegend Injektionsverfahren zur Abdichtung der anstehenden Klüfte und Störzonen eingesetzt. Als Injektionsgut eignen sich Suspensionen aus Wasser, Zement, Feinstbindemittel, Bentonit und Flugasche (Smoltczyk, 2001b).

Fehlstellen im Dichtungsschleier können bereits bei der Bauausführung auftreten, wenn sich beispielsweise Klüfte in bestimmten Bereichen nicht ausreichend verpressen lassen oder das Injektionsgut durch zu starke Grundwasserströme verfrachtet wird. Werden größere Hohlräume angetroffen, kann dies zusätzlich den Einsatz von Beton, Mörtel oder Pasten erfordern (DWA-M 512-1, 2012). In sehr seltenen Fällen treten im Untergrund Deformationen auf, die zu einem Abscheren des Dichtungsschleiers führen.

Nach DWA-M 512-1 (2012) weisen Zement- und Toninjektionen sowie Silikatgele unter Normalbedingungen eine sehr gute Altersbeständigkeit auf. Sollten der Boden oder das Grundwasser aggressive Stoffe in schädlicher Menge enthalten, kann die Wirksamkeit des Dichtungsschleiers im Laufe der Zeit abnehmen, sofern dem Injektionsgut nicht adäquate Zusatzmittel beigemischt wurden. In DIN 4030-1 (2008) sind die betonangreifenden Substanzen näher erläutert. Dazu gehören beispielsweise die kalklösende Kohlensäure, Sulfate oder Eisensulfide.

3.3.6 Schäden an den Untergrunddrainagen

Untergrunddrainagen werden unterwasserseitig des Dichtungsschleiers angeordnet, um dort den Porenwasserdruck an der Maueraufstandsfläche bzw. den Auftrieb zu reduzieren. Dies bewirkt eine deutliche Verbesserung der Standsicherheit von Gewichtsstauwauern. Das Drainagewasser wird im Kontrollgang messtechnisch erfasst und aus der Talsperre abgeleitet. Wie bei den im Mauerkörper verlegten Drainagen sind auch bei den Untergrunddrainagen regelmäßige Reinigungen zur Sicherstellung einer dauerhaften Funktionsfähigkeit erforderlich. Je nach den Gründungsverhältnissen müssen die Drainagen mit Filter ausgestattet sein. Die Entwässerung des Untergrundes führt zu erhöhten Strömungsgradienten. Deshalb könnte Bodenmaterial aus den gefüllten Felsklüften in die Drainagen erodieren.

Grundsätzlich können bei den Untergrunddrainagen ähnliche Schadensprozesse wie bei den Mauerdrainagen auftreten. Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, dass die Untergrunddrainagen in der Regel ständig mit Wasser gefüllt sind und der gesamte Rohrquerschnitt sehr langsam durchströmt wird. Dadurch findet im Bereich der Rohrleitung keine Verdunstung statt und auch der Gasaustausch ist deutlich eingeschränkt. Dies führt dazu, dass die Ablagerungen im eingestauten Bereich der Untergrunddrainagen zwar flächiger verteilt, aber deutlich weicher sind (Girmscheid u. a., 2003b).

4 Idealisiertes Referenzbauwerk

Bei der Planung und dem Entwurf einer Talsperre ist eine Vielzahl unterschiedlichster Faktoren zu beachten. So sind meist unterschiedliche Nutzungen zu gewährleisten und gleichzeitig müssen die topographischen, geologischen und hydrologischen Verhältnisse vor Ort Berücksichtigung finden. Daher sind sämtliche Gewichtsstaumauern Unikate und für die spezifischen Verhältnisse optimiert.

Um die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse auf verschiedene Gewichtsstaumauern übertragen zu können, wird zunächst eine idealisierte und standardisierte Gewichtsstaumauer konzeptioniert, die die Grundgesamtheit der in Deutschland errichteten Gewichtsstaumauern repräsentieren soll. Einführend wird die Historie des Gewichtsstaumauerbaus beleuchtet. Im Anschluss werden die Abmessungen der in Deutschland existierenden Bauwerke statistisch ausgewertet sowie Messeinrichtungen und Materialparameter für die standardisierte Mauer definiert.

Die Auswertung beschränkt sich dabei auf große Talsperren mit einer Höhe über 15 m, da an diese Bauwerke, z.B. gemäß DWA-M 514 (2011), höhere Anforderungen hinsichtlich der messtechnischen Überwachung gestellt werden.

In Deutschland existieren mittlerweile insgesamt 82 Gewichtsstaumauern dieser Größe. Davon sind 45 % aus Bruchstein und 55 % aus Beton ausgeführt worden. Die „durchschnittliche Gewichtsstaumauer“ wurde 1930 in Betrieb genommen und ist fast 90 Jahre alt. In Abb. 4.1 ist die räumliche Verteilung der Talsperren in Deutschland ersichtlich. Die Sperren befinden sich dabei vornehmlich in den Mittelgebirgen von Baden-Württemberg, Bayern, Nordrhein-Westfalen, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen.

4.1 Historische Entwicklung des Baus von Gewichtsstaumauern in Deutschland

Die Geschichte des Talsperrenbaus in Deutschland steht in einem direkten Zusammenhang mit dem Verwendungszweck der Anlagen und dem derzeitigen technischen Entwicklungsstand. Im Vergleich mit Ländern in heißeren Klimazonen und einer ungleichmäßigeren Niederschlagsverteilung, die schon in der Frühzeit insbesondere für landwirtschaftliche Bewässerungszwecke Speicher benötigten, fand in Deutschland der Beginn des Talsperrenbaus vergleichsweise spät statt. Im Mittelalter wurden lediglich kleinere Wehranlagen zum Betrieb von Wasserrädern für Mühlen und Hammerwerke errichtet oder mit Erddämmen künstliche Teiche für die Fischzucht und den Bergbau erstellt (Mittelsdorf, 2007).

Ende des 19. Jahrhunderts wurde in Deutschland der moderne Talsperrenbau eingeleitet. Zum einen galt es für Regionen mit Wasserknappheit die Trinkwasserversorgung sicherzustellen, zum anderen war der im Zuge der Industrialisierung ansteigende Strombedarf zu decken. Diese Phase des Talsperrenbaus wurde maßgeblich durch Geheimrat Prof. Dr.-Ing. Intze geprägt. Die erste der so genannten Intzemauern ist die 1891 fertig gestellte Eschbachtalsperre in Nordrhein-Westfalen. Diese Art der Gewichtsstaumauer ist üblicherweise im Grundriss gekrümmt und monolithisch ohne Dehnungsfugen ausgeführt. Der Untergrund wird in der Regel weder abgedichtet noch drainiert. Das Absperrbauwerk wird mit Bruchsteinen

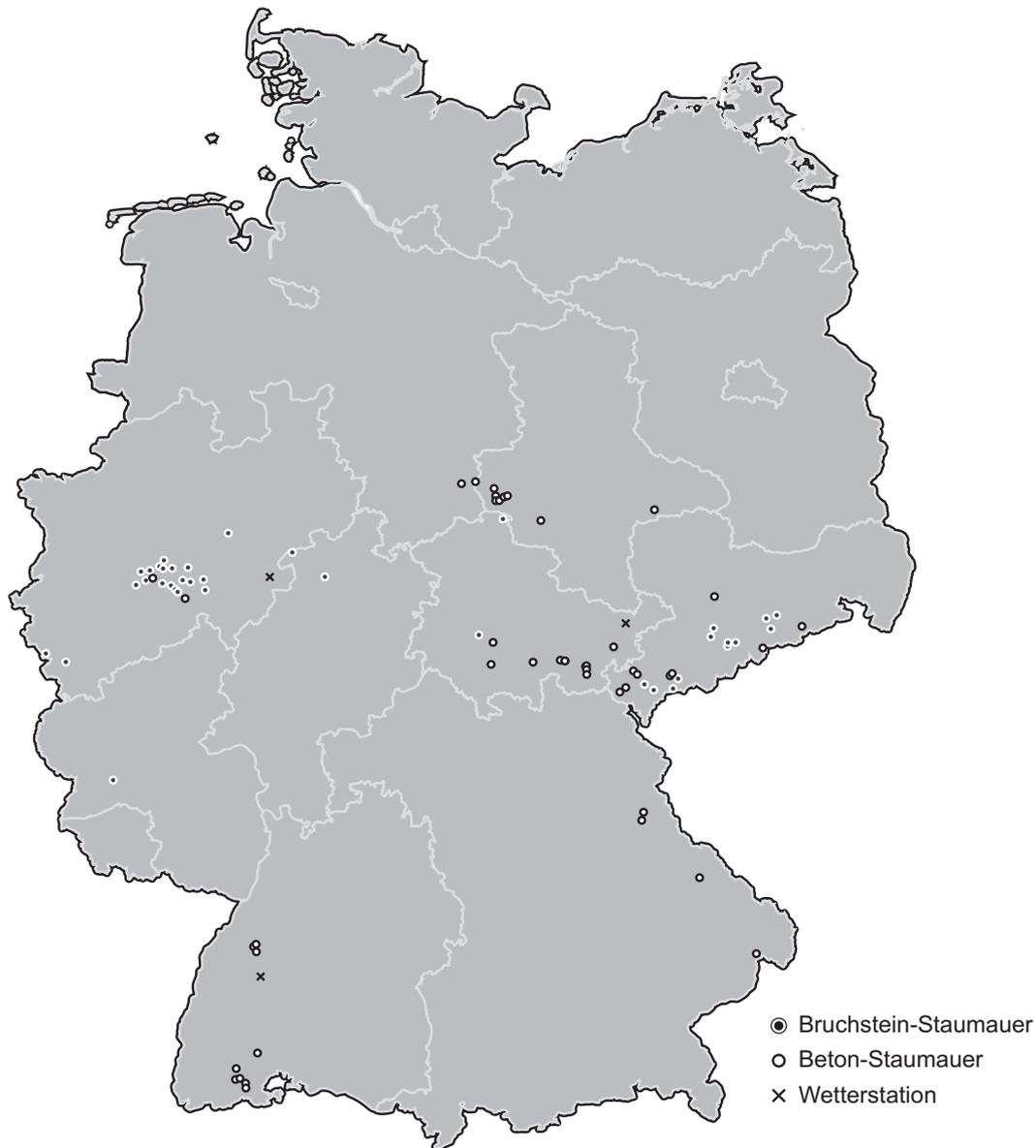


Abb. 4.1: Räumliche Lage der 82 deutschen Gewichtsstauwauern (mit $H > 15$ m) und ausgewählte Wetterstationen des DWD

und einem Bindemittel aus Kalk, Traß und Zement gemauert. Die Abdichtung der Wasserseite erfolgt durch ein Vorsatzmauerwerk mit innen liegender Putzschicht. Üblicher Weise besitzt dieser Talsperrentyp im unteren Bereich der Wasserseite eine Lehmvorlage, den so genannten Inzekeil, der ursprünglich als zusätzliche Dichtungsmaßnahme fungieren sollte. Eine Unterströmung der Mauer wurde in der statischen Betrachtung zur damaligen Zeit nicht berücksichtigt. Hinter der Stauwand werden darüber hinaus senkrechte Drainagerohre aus Ton verlegt, um eindringendes Sickerwasser ableiten zu können (Rissler, 1998). Mittlerweile mussten die meisten der Bruchsteinmauern durch umfangreiche Sanierungsmaßnahmen an den aktuellen Stand der Technik angepasst werden. Dabei wird nachträglich ein am wasserseitigen Mauerfuß entlang geführter Kontrollgang angelegt. Vom Inneren des Kontrollgangs aus

können daraufhin Drainagen zur Entwässerung der Mauer und des Untergrunds gebohrt, der Untergrund durch Injektionen abgedichtet und Messgeräte zur Überwachung der Talsperre eingebaut werden.

Wie Abb. 4.2 verdeutlicht, lösten die Gewichtsstau Mauern aus Beton nach und nach die Bruchsteinmauern ab. Mit dem Bau des Rudolf-Fettweis-Werks wurde erstmalig in Deutschland Gussbeton als Baumaterial für Gewichtsstau Mauern eingesetzt (Urban, 2006). Im Jahr 1917 wurde zunächst das Ausgleichsbecken Forbach errichtet, daraufhin das Sammelbecken Kirschbaumwasen in Betrieb genommen und schließlich im Jahr 1926 die 65,3 m hohe Schwarzenbachtalsperre fertig gestellt. Letztere ist im Grundriss leicht gekrümmt und bereits in Blockbauweise ausgeführt. In den Kernbeton sind zur Erhöhung der Rohdichte einerseits und zur besseren Verzahnung der einzelnen Betonierabschnitte andererseits bis zu 2 m³ große Granitblöcke eingebracht worden. Die Luftseite der Mauer ist mit Granitblöcken verblendet. Die Wasserseite besitzt eine Betonvorsatzschale mit dahinter liegender Dichtungsschicht sowie vertikal angeordneten Drainageleitungen zur Entwässerung eindringender Sickerwässer, die in den Kontrollgang münden. Die Gründungssohle ist im Bereich des wasserseitigen Fußes durch einen Injektionsschleier abgedichtet. Zur Reduktion des Porenwasserdrucks im Aufstandsreich sind darüber hinaus im Bereich der Gründung Drainageröhre eingebaut.

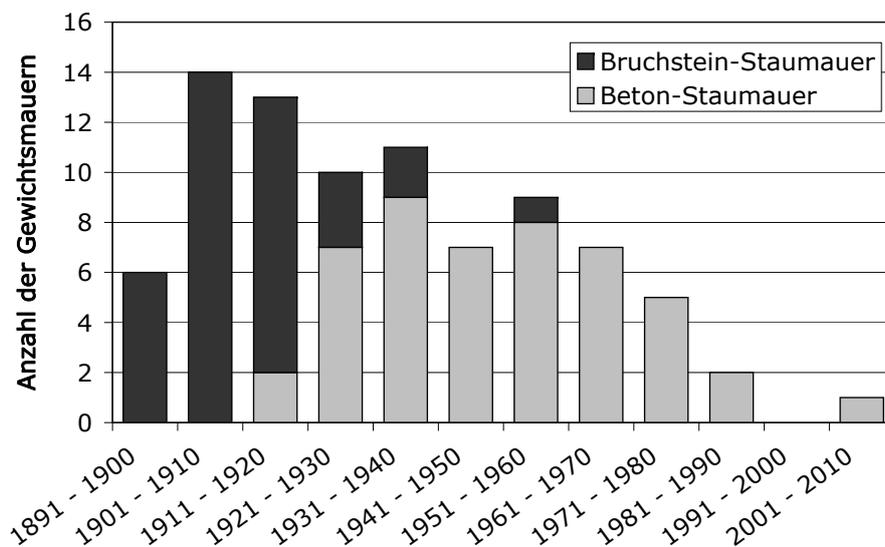


Abb. 4.2: Jahr der Inbetriebnahme der 82 deutschen Gewichtsstau Mauern (mit $H > 15$ m)

Mit fortschreitenden bodenmechanischen Kenntnissen und Prüfmethode n war seit den 1930-er Jahren der Bau von größeren Staudämmen möglich. Durch die Entwicklung größerer Baumaschinen konnten die für den Dammbau erforderlichen Baumaterialien wirtschaftlich eingebaut werden. Der Vorteil gegenüber den Mauern liegt darin, dass an den Untergrund geringere Anforderungen gestellt werden und zudem für den Schüttkörper auch minderwertiges Gesteinsmaterial verwendet werden kann (Bettzieche, 2010). Seitdem wurden Talsperren überwiegend als Staudämme ausgeführt, was in Abb. 4.2 den Abfall des Gewichtsstau Maueraubaus seit Anfang der 1960-er Jahren erklärt.

Die jüngste deutsche Gewichtsstau Mauer ist die im Jahr 2005 fertig gestellte Talsperre Leibus/Lichte. Die modernen Stau Mauern besitzen in der Regel einen geraden Kronenverlauf der in einzelne Mauerblöcke unterteilt ist. Die Blöcke sind durch Feldfugen getrennt, die

wiederum durch Dehnfugenbänder wasser- und luftseitig abgedichtet sind. Der Aufbau des Mauerquerschnitts gliedert sich in einen Kernbereich und eine Vorsatzschale. An den Vorsatzbeton werden höhere Anforderungen hinsichtlich der Wasserundurchlässigkeit und der Frostwiderstandsfähigkeit gestellt. In die Kontrollschächte münden Drainagen zur Entwässerung der horizontalen Arbeitsfugen. Zur Reduzierung des Sohlwasserdrucks ist der Untergrund mit einem Dichtungsschleier injiziert (Kühme u. a., 2006).

Heutzutage werden Gewichtsstaumauern in der Regel aus Walzbeton (engl. Roller Compacted Concrete - RCC) errichtet. Die RCC-Technologie zeichnet sich im Gegensatz zur traditionellen Blockbauweise durch kurze Bauzeiten bei gleichzeitiger Einsparung von Personal, Gerätschaften und Zement aus, was wiederum zu einer Kostenersparnis führt. Für das einstige Neubauprojekt Pumpspeicherwerk Atdorf im Südschwarzwald war als Hauptsperre des Unterbeckens in Deutschland erstmalig eine RCC-Mauer vorgesehen (Klebsattel, 2012).

4.2 Abmessungen des Referenzbauwerks

Um die räumlichen Abmessungen des Referenzbauwerks festzulegen, werden zunächst die geometrischen Hauptdaten sämtlicher deutscher Gewichtsstaumauern zusammengetragen und statistisch ausgewertet. Die Informationen zu den jeweiligen Parametern entstammen dem ICOLD World Register of Dams, mit Ergänzung weiterer Daten aus Literaturquellen wie z. B. Franke und Giesecke (2001) oder Wouters (2010). Zudem sind Informationen aus den Internetseiten der jeweiligen Talsperrenbetreiber miteinbezogen.

Zur Festlegung der Mauerabmessungen des Referenzbauwerks werden von sämtlichen maßgeblichen Parametern die statistischen Kenngrößen Median, sowie zur Veranschaulichung der Streubreite das 5%- und 95%-Quantil ermittelt (vgl. Tab. 4.1). Die Spalte Datenverfügbarkeit liefert eine Information von wie vielen der 82 Talsperren anhand der oben genannten Quellen Daten verfügbar waren.

Tab. 4.1: Statistische Auswertung des deutschen Talsperrenbestands hinsichtlich der Mauerabmessungen

Parameter	5%- Quantil	Median	95%- Quantil	Datenverfüg- barkeit
Höhe über Gründungssohle H	18,0 m	32,0 m	65,3 m	100%
Kronenlänge L	110,3 m	200 m	414,9 m	100%
Kronenbreite B_K	3,0 m	4,5 m	9,4 m	93%
Mauerneigung luftseitig	0,58	0,69	0,75	51%
Mauerneigung wasserseitig	0,00	0,03	0,15	57%
Abstand zwischen Stauziel und Krone $Z_K - Z_S$	0,8 m	1,7 m	4,5 m	85%
relative Lage des Absenkziels $(Z_K - Z_A)/H$	23,3 %	61,3 %	85,5 %	61,3 %

Nach Gebler u. a. (2010) weisen lediglich 20 % der deutschen Talsperren auf Grund ihrer Lage in einem schmalen Tal bzw. ihrer deutlich gekrümmten Formgebung ein räumliches Tragverhalten auf, so dass in der Regel die Standsicherheit einer Gewichtsstaumauer anhand eines zweidimensionalen Modells nachgewiesen werden kann. Daher wird in dieser Arbeit lediglich ein Querschnitt in der Talmitte betrachtet.

Die Dimensionen des in Abb. 4.3 dargestellten Mauerquerschnitts der idealisierten Gewichtstaumauer leitet sich aus den in Tab. 4.1 zusammengestellten geometrischen Abmessungen ab. Dabei wird der Median als repräsentative Größe verwendet, da sich diese statistische Kenngröße im Vergleich zum Mittelwert robuster gegenüber Ausreißern verhält.

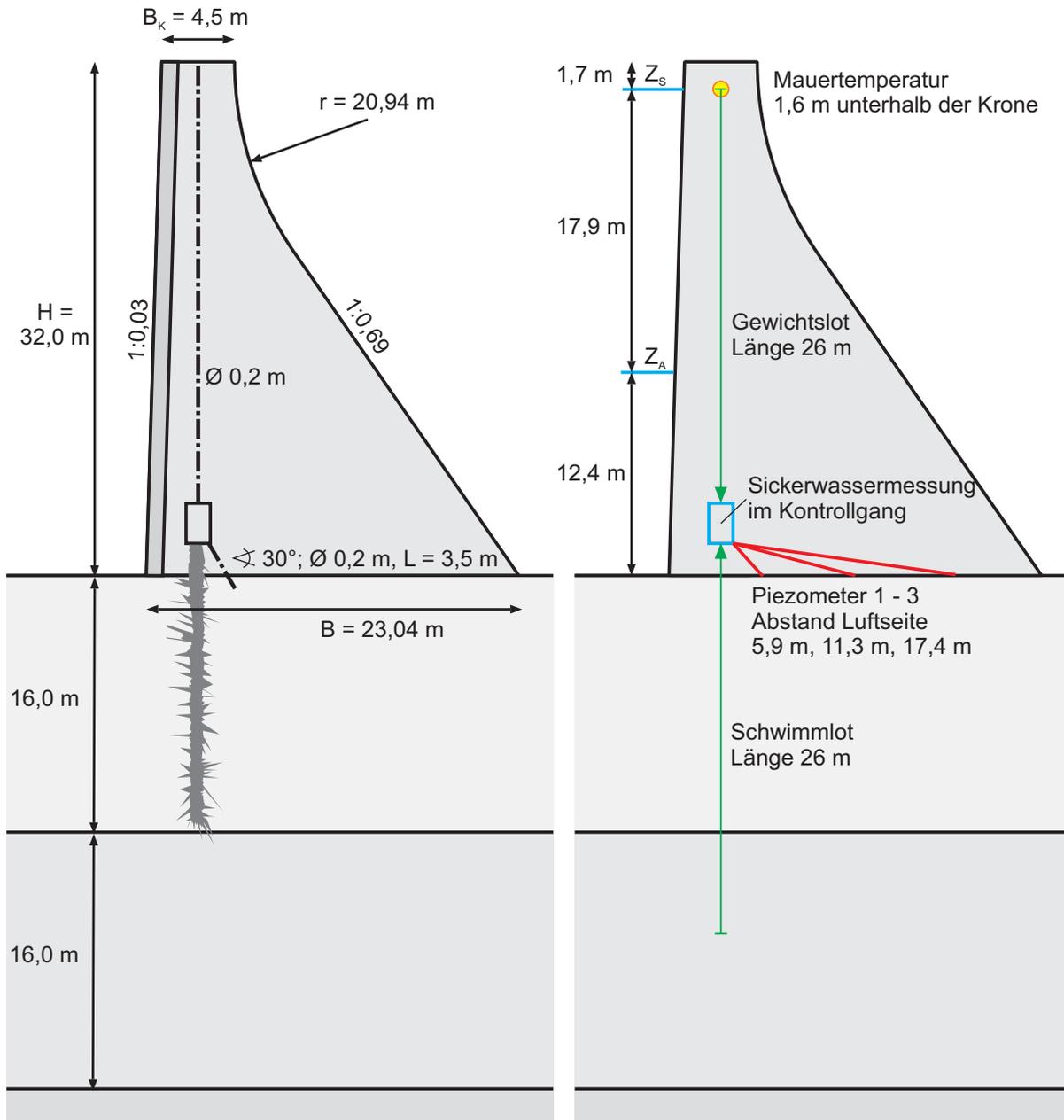


Abb. 4.3: Idealisiertes Referenzbauwerk: Abmessungen der Mauer (links), Lage der Überwachungseinrichtungen (rechts)

Der luftseitig und wasserseitig der Maueraufstandsfläche befindliche, den Fels überlagernde Oberboden spielt für die Standsicherheit der Talsperre eine sehr untergeordnete Rolle und wird daher im Modell vernachlässigt. Dies trifft im Wesentlichen auch auf eine mögliche Baugrubenverfüllung zu.

Gemäß Wieprecht u. a. (2015) kann eine potenzielle Sedimentation des Stauraumes in den Standsicherheitsberechnungen einer Gewichtsstaumauer durch eine horizontal auf die Maueroberfläche wirkende dreiecksförmige Flächenlast sowie eine vertikal auf den Untergrund wirkende Flächenlast berücksichtigt werden. Würde der komplette Stauraum der idealisierten Talsperre bis zum Absenkziel mit einer 12,4 m mächtigen Sedimentschicht verlandet sein, so würde die horizontale Last gerade einmal 15 % der Lasteinwirkung des Wasserdrucks betragen. Vereinfachend bleibt daher im Modell der idealisierten Mauer eine Sedimentation des Stauraumes unberücksichtigt.

4.3 Bauwerkskomponenten des Referenzbauwerks

Gewichtsstaumauern besitzen unterschiedliche Bauwerkskomponenten, die bestimmte Aufgaben erfüllen. Die statistische Auswertung der Datensammlung zu den deutschen Gewichtsstaumauern liefert folgendes Ergebnis:

Blockfugen (Datenverfügbarkeit 84 %)

Bruchsteinmauern werden im Gegensatz zu Betonmauern nicht in einzelnen Blöcken erstellt und haben daher, bis auf eine Talsperre in Deutschland, keine vertikalen Bauwerksfugen. Im Gegensatz dazu besitzen 91 % der Mauern aus Beton Blockfugen. Diese sind bei Gewichtsstaumauern in der Regel nur abgedichtet und nicht verpresst, so dass eine Kraftübertragung zwischen den benachbarten Blöcken nur eingeschränkt stattfindet.

Mauerdrainagen (Datenverfügbarkeit 78 %)

Etwa zwei Drittel der deutschen Gewichtsstaumauern sind mit Mauerdrainagen ausgestattet, die in der Regel hinter der wasserseitigen Dichtung verlegt sind (92 % der Bruchsteinmauern und 53 % der Betonsperren). Diese führen eindringendes Sickerwasser über die Kontrollschächte und Kontrollstollen ab. Die Drainagen haben somit einen merklichen Einfluss auf die Lage der Sickerlinie im Bauwerk. Der Drainagenabstand in Mauerlängsrichtung wird auf 3,0 m festgelegt.

Wasserseitige Dichtung (Datenverfügbarkeit 53 %)

Um das Eindringen von Sickerwasser in den Mauerkörper zu verhindern, besitzen etwa zwei Drittel der Gewichtsstaumauern eine wasserseitige Dichtung. Dabei sind unterschiedlichste Ausführungen von einfachen Beschichtungen und Anstrichen bis hin zu massiven Vorsatzschalen aus Beton mit hohem Wassereindringwiderstand gebräuchlich.

Sohldrainagen (Datenverfügbarkeit 79 %)

Durch Sohldrainagen wird der Untergrund im Bereich der Maueraufstandsfläche entwässert. Dies führt zu einer merklichen Reduktion des Porenwasserdrucks und der Auftriebskräfte. Insgesamt verfügen rund 45 % der Gewichtsstaumauern über Sohldrainagen. Dabei sind Bruchsteinmauern tendenziell eher mit Drainagen und der überwiegende Teil der Betonsperren ohne Drainagen ausgestattet. Analog zu den Mauerdrainagen wird der Abstand der Sohldrainagen in Mauerlängsrichtung zu 3,0 m festgelegt. Diese münden in den Kontrollgang.

Untergrundabdichtung (Datenverfügbarkeit 79 %)

Etwa drei Viertel der Gewichtsstaumauern verfügen über eine Untergrundabdichtung, um den Sickerweg unter der Sperre zu verlängern und den Verlust von gespeichertem Wasser zu minimieren. Zum größten Teil wurden dabei Injektionen von Dichtungsmitteln in das klüftige

Felsgestein vorgenommen. Während bei nahezu allen Betonsperren vorab Dichtungsarbeiten im Untergrund durchgeführt wurden, war diese Technik zur Bauzeit von Bruchsteinmauern noch nicht üblich. Bei Bruchsteinmauern wurden daher die Untergrundinjektionen, sofern erforderlich, erst einige Jahrzehnte nach dem Bau im Rahmen von umfangreichen Sanierungsarbeiten durchgeführt.

Um die Auswirkung eines Ausfalls oder einer eingeschränkten Wirksamkeit einer der oben genannten Bauwerkskomponenten untersuchen zu können, verfügt das Referenzbauwerk über jede dieser baulichen Einrichtungen (vgl. Abb. 4.3).

4.4 Materialkennwerte der idealisierten Staumauer

Die für die Berechnungen gewählten Materialparameter werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert. Da der Fokus dieser Arbeit in der Interpretation eines realitätsnahen Mauerhaltens liegt, wird für die Materialparameter im Modell ein repräsentativer Mittelwert verwendet. Es wird jeweils Bezug auf Abb. 4.4 genommen, in der die im Berechnungsmodell verwendeten unterschiedlichen Materialbereiche illustriert sind.

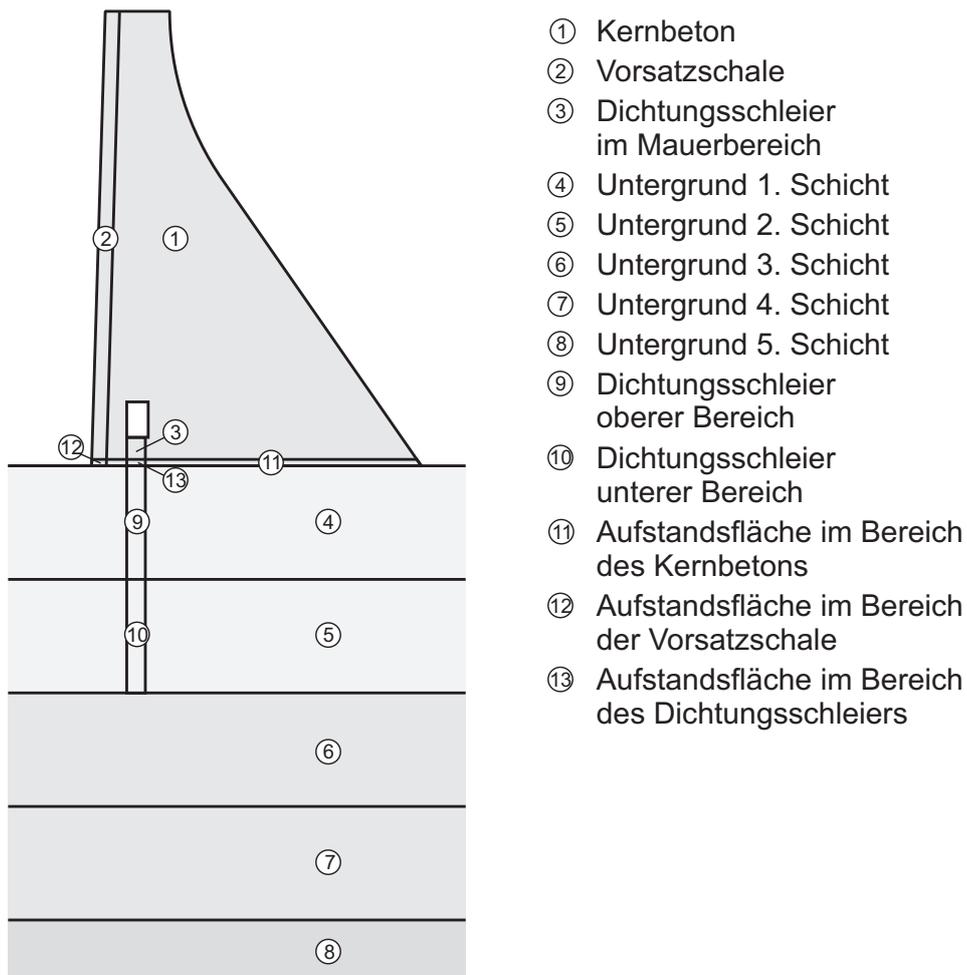


Abb. 4.4: Materialbereiche im Berechnungsmodell der idealisierten Mauer

Die Wahl des Baumaterials für das Absperrbauwerk orientiert sich an der in Abschnitt 4.1 erläuterten Altersstruktur der deutschen Gewichtsstau Mauern. Daraus geht hervor, dass als repräsentatives Bauwerk eine Gewichtsstau mauer aus den 1930-er Jahren zu wählen ist. In dieser Zeit wurden die Bruchsteinmauern durch Bauwerke aus Stampfbeton abgelöst.

Nach DVWK (1996) setzt sich die Rezeptur des Betons einer Sperre älteren Baujahrs wie folgt zusammen: der Bindemittelanteil ist relativ gering und besteht aus einer Mischung von Kalk, Trass und Zement. Als Betonzuschlag wird, ohne Berücksichtigung einer abgestuften Sieblinie, ein Gemisch aus Sand und grobem Schotter verwendet. Dabei werden zusätzlich in den unverdichteten Beton größere Gesteinsblöcke eingebaut. Die Verdichtung des Betons erfolgt mit einfachsten Mitteln, entweder manuell oder mit Druckluft betriebenen Vibrationsstampfern. In der Regel wird der Abbindeprozess des Zements ohne zusätzliche Kühlungsmaßnahmen begleitet. Die Qualität eines Betons dieser Art lässt sich etwa der Festigkeitsklasse C8/10 zuordnen.

4.4.1 Festigkeits- und Verformungsparameter

Folgende Kennwerte gelten für die Materialbereiche 1-3 und 11-13 nach Abb. 4.4.

Dichte

Nach DIN 1045-1 (2008) variiert die Dichte von Normalbeton entsprechend der Zusammensetzung zwischen 2.000 kg/m^3 und 2.600 kg/m^3 . Zur Verbesserung der Verzahnung einzelner Betonierabschnitte und zur Ersparnis von Bindemittel, wurden dem Beton älterer Talsperren zusätzliche größere Gesteinsblöcke zugegeben. Dies führt auch zu einer Erhöhung des Eigengewichts. In den Berechnungen wird daher eine Dichte von $\rho = 2.400 \text{ kg/m}^3$ angesetzt.

Elastizitätsmodul

Der E-Modul des Betons ist maßgeblich von der Betonrezeptur und den verwendeten Zuschlagstoffen abhängig. Der mittlere Elastizitätsmodul für Normalbeton der Klasse C 8/10 liegt gemäß DIN 1045-1 (2008) bei etwa $20 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$.

Poissonzahl

Die Querdehnzahl des Betons liegt im Bereich der Gebrauchsspannungen typischer Weise zwischen 0,15 und 0,25 (Bergmeister u. a., 2009). Mit steigender Beanspruchung bis in die Nähe der Druckfestigkeit, nimmt die Querdehnzahl zu. In den Berechnungen wird für die Poissonzahl ein Wert von konstant $\nu = 0,2$ angesetzt.

Nachstehende Festigkeitsparameter gelten für die Bereiche 1 bis 3 der Mauer nach Abb. 4.4.

Druckfestigkeit

Der Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit von Beton der Festigkeitsklasse C 8/10 liegt in Anlehnung an die DIN 1045-1 (2008), etwa bei $f_{cm} = 16 \text{ N/mm}^2$. Beim mehrachsigen Span-

nungszustand liegt die Festigkeit des Betons etwas höher, so dass bei zweiachsialer Druckbeanspruchung eine Festigkeit von $f_{cm2} = 19 \text{ N/mm}^2$ angesetzt wird.

Für die elastisch-plastische Berechnung wird bei einachsialer Beanspruchung die Spannungsdehnungslinie aus Abb. 4.5 (links) zugrunde gelegt. Es liegt linear elastisches Materialverhalten bis zum Erreichen von 40 % der Druckfestigkeit vor ($6,4 \text{ N/mm}^2$). Daraufhin erfolgt eine gekrümmte Zunahme bis zum Erreichen der Druckfestigkeit f_{cm} . Anschließend tritt eine Materialentfestigung bis zu einem Restspannungsniveau von $3,2 \text{ N/mm}^2$ ein. Das in der FE-Berechnung Anwendung findende Materialmodell ist ausführlich in Schlegel und Will (2009) beschrieben.

Zugfestigkeit

Als Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit kann bei einem Beton der Festigkeitsklasse C8/10 etwa von $f_{ctm} = 1,2 \text{ N/mm}^2$ ausgegangen werden. Als weiteres Maß zur Beschreibung des Widerstands von Beton gegenüber einem Zugversagen wird die Bruchenergie G_F angesetzt. Nach Bergmeister u. a. (2009) lässt sich die Bruchenergie überschlägig über die Druckfestigkeit abschätzen, so dass für diesen Fall $G_F = 50,0 \text{ Nm/m}^2$ gilt. Nach Schlegel (2005) ist die Bruchenergie dabei definiert als die Fläche unterhalb der Zugspannungs-Dehnungsbeziehung multipliziert mit der äquivalenten Länge der Modellelemente.

In Abb. 4.5 (rechts) ist das Spannungs-Dehnungsverhalten des Betons unter Zugbeanspruchung dargestellt. Bis zum Erreichen der Zugfestigkeit liegt linear elastisches Verhalten vor, im Anschluss erfolgt eine exponentielle Entfestigung infolge Zugrissbildung (Schlegel, 2005).

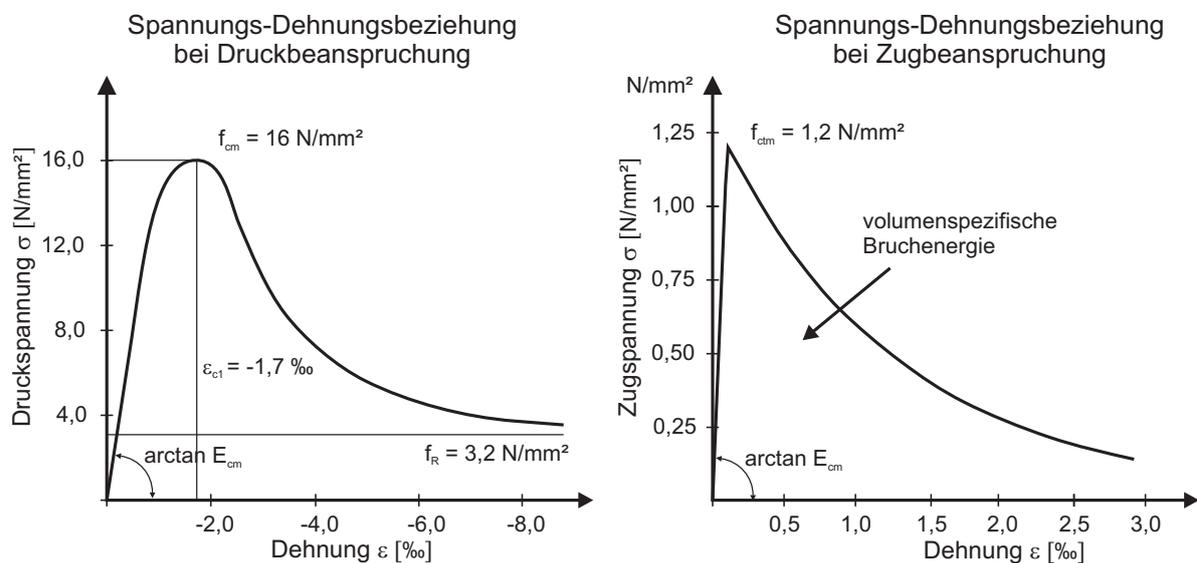


Abb. 4.5: Spannungs-Dehnungsbeziehung des Sperrbetons im Druck- und Zugbereich

4.4.2 Temperaturparameter

Folgende Kennwerte gelten für die Materialbereiche 1-3 und 11-13 aus Abb. 4.4.

Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit von Beton ist von der Dichte, der Wärmeleitfähigkeit der Betonzuschlagsstoffe, der Porosität sowie der Temperatur abhängig. Darüber hinaus nimmt die Wärmeleitfähigkeit mit steigendem Wassergehalt zu. Bei gewöhnlichen Verhältnissen variiert die Wärmeleitfähigkeit zwischen 1,2 und 3,0 W/mK (ICOLD, 2008). Da bei Talsperren der Beton in der Regel durchfeuchtet ist, wird für die Wärmeleitfähigkeit ein Wert von $\lambda = 2,7$ W/mK angesetzt.

Spezifische Wärmekapazität

Je nach Betonrezeptur schwanken die Werte der spezifischen Wärmekapazität zwischen 0,9 kJ/(kgK) und 1,15 kJ/(kgK) (Hamfler, 1988). Dabei besitzt ein Beton mit natürlichem Feuchtegehalt eine geringere Wärmekapazität als ein wassergesättigter Beton. In den Berechnungen wird ein Wert von $c = 1,1$ kJ/(kgK) zugrunde gelegt.

Wärmeausdehnungskoeffizient

Die Größe des Wärmeausdehnungskoeffizienten hängt neben den Bestandteilen des Betons auch vom Feuchtegehalt ab. Für die Berechnungen wird nach DIN 1045-1 (2008) eine Wärmedehnzahl von $\alpha = 1 \cdot 10^{-5}$ angesetzt.

4.4.3 Strömungsparameter

Der Zementleim, sowie in der Regel auch die Zuschlagsstoffe, weisen eine deutlich höhere Undurchlässigkeit als der Massenbeton auf. Dies ist damit begründet, dass für die Permeabilität des Betons hauptsächlich Mikrorisse und Mikroporen zwischen den Zuschlägen und dem Zementleim, wie auch größere Diskontinuitäten, wie Hohlräume, Betonierfugen oder Risse verantwortlich sind (ICOLD, 2008). Ein wesentlicher Faktor für die Wasserdurchlässigkeit des Betons ist zum einen die Betonrezeptur (Wahl der Zuschlagsstoffe, Zementzusätze, Wasser-Zementgehalt). Zum anderen spielt eine sorgfältige Verarbeitung und Verdichtung sowie eine entsprechende Kühlung während des Abbindens eine entscheidende Rolle.

Je nach Betonqualität liegt der Durchlässigkeitsbeiwert von Talsperrenbeton zwischen $1 \cdot 10^{-8}$ m/s und $1 \cdot 10^{-14}$ m/s (ICOLD, 2008). Da das in dieser Arbeit zu untersuchende Referenzbauwerk eine alte Betonsperre repräsentiert und daher von einer minderwertigen Betonqualität und von einer schlechten Verarbeitung auszugehen ist, wird eine sehr hohe Durchlässigkeit gewählt. Für den Kernbeton (Bereiche 1, und 11) wird ein Durchlässigkeitsbeiwert von $1 \cdot 10^{-8}$ m/s und für den Vorsatzbeton (Bereiche 2, 12 nach Abb. 4.4) sowie den injizierten Mauerbereich (Bereiche 3 und 13 nach Abb. 4.4) ein Wert von $1 \cdot 10^{-9}$ m/s angesetzt.

An dieser Stelle sei Angemerkt, dass für das Durchströmungsverhalten des Absperrbauwerks und somit für die Ausbildung des Strömungsnetzes nicht die absoluten Materialkenngrößen entscheidend sind, sondern das Verhältnis der Größen der unterschiedlichen Materialbereiche untereinander.

4.5 Materialkennwerte des Felsuntergrundes

Nach DIN 19700-10 (2004) ist der Untergrund Bestandteil der Stauanlage. Insbesondere hinsichtlich der Aufnahme der aus den gestauten Wassermassen resultierenden äußeren Kräfte und des Dichtungsverhaltens der Talsperre, sind das Absperrbauwerk und der Untergrund als Einheit zu betrachten.

4.5.1 Geologische Verhältnisse

Die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften des Felsuntergrundes stehen im Zusammenhang mit der Gesteinsart und dem Gefüge, das die Raumlage und Anordnung von Gesteinsbestandteilen beschreibt. Die Klassifikation der Gesteine richtet sich nach ihrer Entstehung und ihrer mineralischen Zusammensetzung. Zur Festlegung repräsentativer Untergrundverhältnisse wird das Grundgestein sämtlicher 82 Sperrenstandorte an Hand der geologischen Karte der Bundesrepublik Deutschland GK1000 ausgewertet (BGR, 2007). Talsperren, die eine uneinheitliche Gründungssituation aufweisen, werden anteilig den jeweiligen Gesteinsgruppen zugeordnet. In Abb. 4.6 ist die Verteilung der Gesteinsarten im Gründungsbereich der Gewichtsstaumauern ersichtlich. Rund ein Viertel der Mauern ist auf magmatischem und ein weiteres Viertel auf metamorphem Gestein gegründet. Der Untergrund der restlichen Sperren besteht aus Sedimentgestein. Dabei macht Tonschiefer mit 31 % den größten Anteil aus und wird folglich als Gesteinsart für den repräsentativen Untergrund gewählt.

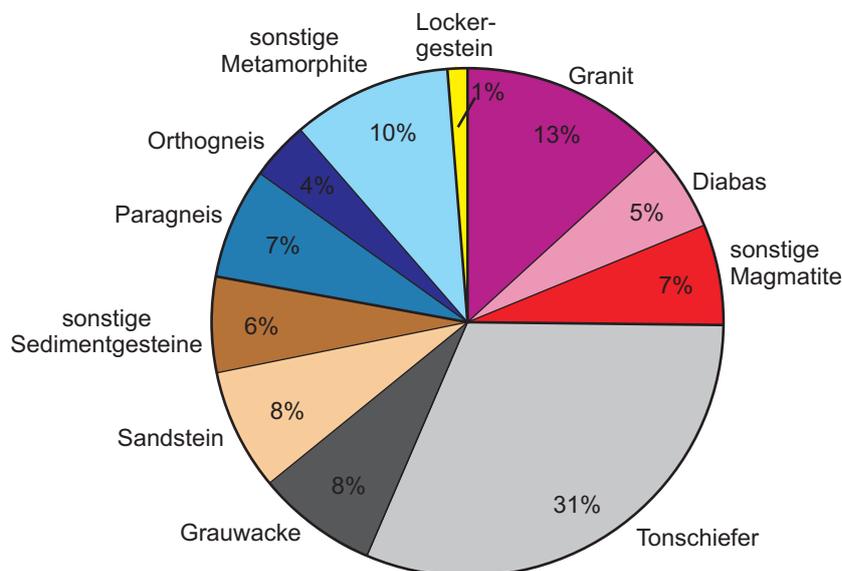


Abb. 4.6: Gesteinsarten im Gründungsbereich der Gewichtsstaumauern

4.5.2 Festigkeits- und Verformungsparameter

Für den repräsentativen Untergrund aus Tonschiefer gelten nachfolgende Materialparameter. Dabei wird von homogenen Untergrundverhältnissen ausgegangen, die Kennwerte gelten somit für sämtliche Raumrichtungen.

Dichte

Die Dichte des Gesteins wird im Wesentlichen durch den Mineralbestand bestimmt. Für Tonschiefer wird ein mittlerer Wert von $\rho = 2750 \text{ kg/m}^3$ angenommen (Schön, 1983). Sowohl für den Fels (Bereiche 4 - 8 nach Abb. 4.4), als auch für den Dichtungsschleier (Bereiche 9 und 10 nach Abb. 4.4) gilt dieser Wert.

Elastizitätsmodul

Das elastische Materialverhalten von Felsgesteinen wird durch verschiedenste Faktoren, wie die mineralische Zusammensetzung, die Kristallanisotropie, die Gefügeeigenschaften oder den Feuchtegehalt geprägt (Neumann, 1964). Der E-Modul ist daher in der Regel je nach örtlichen Gegebenheiten richtungsabhängig, was in dieser Arbeit jedoch vernachlässigt wird. Nach Neumann (1964) variiert der Elastizitätsmodul von Tonschiefer zwischen $1,6 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ und $3,8 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$. Darüber hinaus ist der E-Modul abhängig von der Spannung. Infolge des Eigengewichts wird der Fels mit zunehmender Dichte kompakter. In den Berechnungen wird daher eine Abstufung des E-Moduls wie folgt vorgenommen (vgl. Abb. 4.4):

- Bereich 4: $E = 2,0 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$,
- Bereich 5: $E = 2,5 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$,
- Bereich 6: $E = 3,0 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$,
- Bereich 7: $E = 3,5 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$,
- Bereich 8: $E = 4,0 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$.

Das Steifigkeitsverhältnis von Mauer und Untergrund beeinflusst insbesondere die Spannungsverteilung im Gründungsbereich der Mauer. Im Vergleich zum Untergrund weist der Beton der idealisierten Mauer einen höheren E-Modul auf. Je größer dieses Verhältnis ist, desto größer werden die Spannungsspitzen an den Rändern der Aufstandsfläche. Bei einer gefüllten Talsperre mit einem steiferen Beton sind folglich die Normal- und Schubspannungen an der Mauerluftseite höher.

Poissonzahl

Nach (Prinz und Strauss, 2011) liegt die Poissonzahl von Gesteinen zwischen 0,15 und 0,3. In den Berechnungen wird für den Untergrund (Bereiche 4 - 10 nach Abb. 4.4) $\nu = 0,25$ gewählt.

Scherparameter

Die Standfestigkeit des Gebirges wird vornehmlich durch die Scherfestigkeit der Trennflächen bestimmt. Um das nichtlineare Materialverhalten in den Berechnungen zu beschreiben, wird für Fels häufig das Mohr-Coulomb'sche Bruchkriterium herangezogen.

Die nachstehend aufgeführten Scherparameter für Tonschiefer orientieren sich an den in Engl u. a. (2009) aufgeführten Streubreiten für den Spitzenreibungswinkel φ_s und den Spitzenkohäsionswert c_s der schieferungsparallelen Klufflächen.

- Bereiche 4 und 5 nach Abb. 4.4: $\varphi_s = 22,7^\circ$; $c_s = 2,0 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$,

- Bereiche 6 und 7 nach Abb. 4.4: $\varphi_s = 23,7^\circ$; $c_s = 3,5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$,
- Bereich 8 nach Abb. 4.4: $\varphi_s = 24,7^\circ$; $c_s = 5,0 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$.

Nach Überschreitung der Bruchfestigkeit werden ein Restreibungswinkel von $\varphi_R = 18,0^\circ$ und eine Restkohäsion und Restzugfestigkeit von nahezu Null gewählt. Darüber hinaus wird ein Dilatanzwinkel von $\psi = 10^\circ$ angesetzt. Die Bruchgeraden der jeweiligen Bereiche des Untergrundes sind in Abb. 4.7 dargestellt.

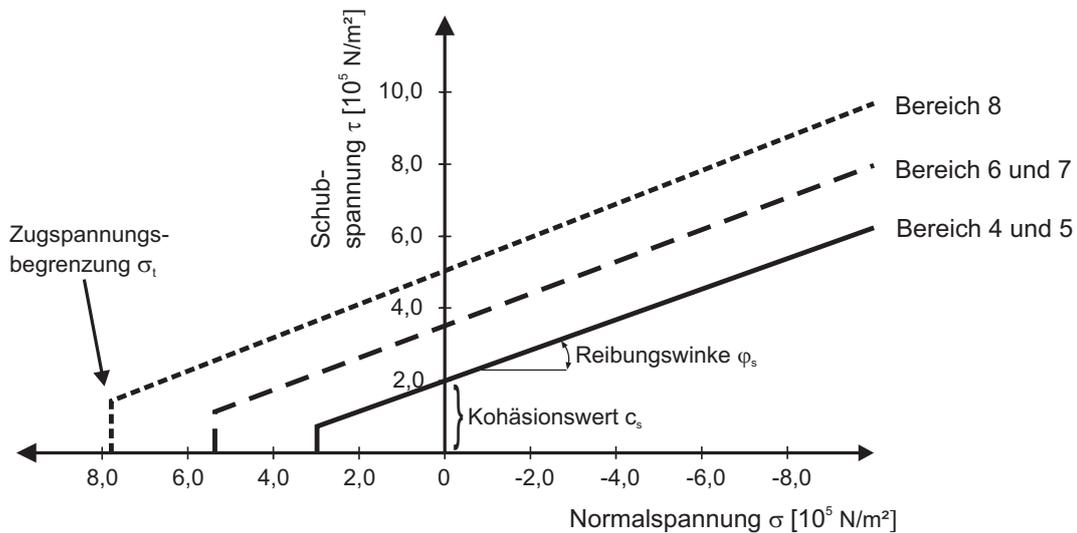


Abb. 4.7: Mohr-coulombsches Bruchkriterium für den Felsuntergrund

Zugfestigkeit

Für die Gebirgszugfestigkeit werden nachfolgende tiefenabhängige Werte abgeschätzt. Bei gerissenem Zustand wird die Zugfestigkeit σ_t auf annähernd Null reduziert.

- Bereiche 4 und 5 nach Abb. 4.4: $\sigma_t = 3,0 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$,
- Bereiche 6 und 7 nach Abb. 4.4: $\sigma_t = 5,4 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$,
- Bereich 8 nach Abb. 4.4: $\sigma_t = 7,8 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$.

4.5.3 Temperaturparameter

In Anlehnung an Rowe (2001) und Smoltczyk (2001a) werden für den Tonschiefer der Bereiche 4 bis 10 nach Abb. 4.4 folgende thermischen Materialkennwerte angesetzt:

- Wärmeleitfähigkeit: $\lambda = 2,1 \text{ W/mK}$,
- Spezifische Wärmekapazität: $c = 1200 \text{ J/(kgK)}$,
- Wärmeausdehnungskoeffizient: $\alpha = 8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$.

4.5.4 Strömungsparameter

Natürlich gewachsener Fels ist in der Regel von Klüften und Störzonen durchzogen. Zur Festlegung der mechanischen und hydraulischen Kennwerte wird in der Felsmechanik der Untergrund durch ein Gefügemodell idealisiert, das die geometrische Lage und die Abmessungen der Trennflächen beschreibt (DVWK, 1996). Das für den Untergrund der standardisierten Mauer zugrunde gelegte Gefügemodell ist in Abb. 4.8 dargestellt.

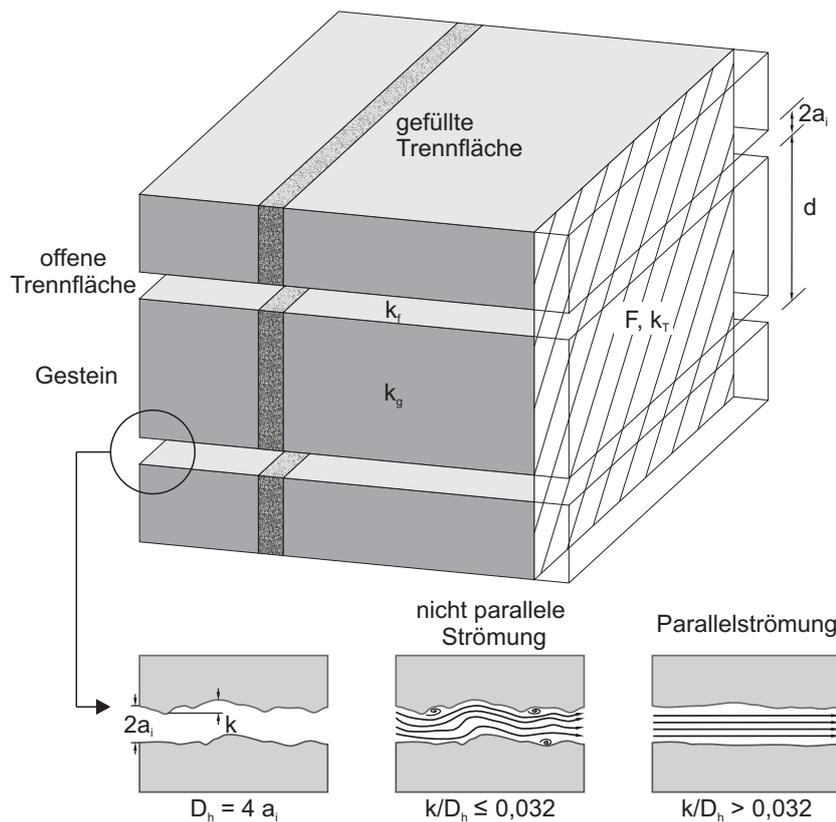


Abb. 4.8: Gefügemodell des Felsuntergrunds der idealisierten Gewichtsstaumauer in Anlehnung an Wittke (1984)

Die Sickerströmungen im Felsuntergrund hängen im Wesentlichen von der Art und Lage des Trennflächengefüges ab. Das Gestein selbst weist eine wesentlich geringere Durchlässigkeit auf und kann daher hinsichtlich der Durchströmung vernachlässigt werden. Nach Wittke (1984) liegt der Durchlässigkeitsbeiwert von Tonschiefer etwa bei $k_g = 1 \cdot 10^{-12}$ m/s. Im Regelfall erfolgt die Durchströmung der Trennflächen nicht über einzelne Strömungskanäle, sondern es tritt eine zweidimensionale Spaltströmung auf (DVWK, 1996).

Bei gefüllten Trennflächen entspricht der Durchlässigkeitsbeiwert der Trennfläche k_t [m/s] dem Durchlässigkeitsbeiwert des feinkörnigen Füllmaterials k_f [m/s].

$$k_t = k_f \quad (4.1)$$

Bei einem offenen Spalt wird zwischen parallelen und nicht parallelen Strömungsverhältnissen unterschieden. Wie aus Abb. 4.8 hervorgeht, hängt die Abgrenzung vom Verhältnis der

absoluten Rauheit der Trennflächenwandung k zum hydraulischen Durchmesser D_h bzw. der Spaltweite $2a_i$ ab (Smoltczyk, 2001a).

In den Strömungsberechnungen der Talsperre aus Kapitel 6 treten im Felsuntergrund keine hohen Gradienten auf, so dass nahezu überall $I < 1$ gilt. Dadurch liegen selbst bei größeren Spaltweiten noch laminare Strömungsverhältnisse vor. Ausnahmen bilden kleinere Bereiche am luftseitigen und wasserseitigen Mauerfuß sowie unterhalb des Dichtungsschleiers.

Der Durchlässigkeitsbeiwert k_t bei paralleler, laminarer Spaltströmung errechnet sich nach dem Widerstandsgesetz von Poiseuille (Soyeaux, 1991):

$$k_t = \frac{g \cdot (2a_i)^2}{12\nu} \quad (4.2)$$

mit:

g	Erdbeschleunigung [m/s ²]
$2a_i$	Trennflächenöffnungsweite nach Abb. 4.8 [m]
ν	Kinematische Zähigkeit des Wassers [m ² /s] ($\nu = 1,3 \cdot 10^{-6}$ bei 10° C)

Bei einer rauen Trennflächenwandung ($k / D_h > 0,032$) entstehen kleinere Wirbel, welche die Stromlinien etwas ablenken. Der Durchlässigkeitsbeiwert k_t bei nicht paralleler, laminarer Spaltströmung wird durch das Widerstandsgesetz von Louis beschrieben (Louis, 1967).

$$k_t = \frac{g \cdot (2a_i)^2}{12\nu [1 + 8,8 (k/D_h)^{1,5}]} \quad (4.3)$$

mit:

k	Absolute Rauheit der Trennflächenwandung nach Abb. 4.8 [m]
D_h	Hydraulischer Durchmesser nach Abb. 4.8 [m] ($D_h = 4a_i$)

Für eine ausführliche Beschreibung der Spaltströmungen, insbesondere auch bei turbulenten Verhältnissen, wird auf weiterführende Literatur wie beispielsweise Wittke (1984) verwiesen.

Auf diesen Fließformeln basieren sowohl diskrete hydraulische Modellansätze, wie z.B. nach Giesecke und Soyiaux (1990), als auch das in dieser Arbeit angewendete homogene Modell. Hierzu wird für den Fels ein homogenes Ersatzmaterial durch Mittelung der Durchlässigkeitsbeiwerte der einzelnen Klüfte k_t über die Querschnittsfläche F , generiert. Dabei wird unterstellt, dass sämtliche Klüfte die gleiche Durchlässigkeit aufweisen. Unter Vernachlässigung der Durchlässigkeit des Gesteins ergibt sich folgender Wert für den Durchlässigkeitsbeiwert der Kluftchar k_T (Wittke, 1984):

$$k_T = k_t \cdot \frac{2a_i}{d} \quad (4.4)$$

d	Trennflächenabstand nach Abb. 4.8 [m]
-----	---------------------------------------

Lägen, entgegen den Annahmen des idealisierten Gefügemodells aus Abb. 4.8, für die verschiedenen Raumrichtungen unterschiedliche Durchlässigkeiten vor, ist die Durchlässigkeit k_T , wie in Wittke (1984) detailliert erläutert, richtungsabhängig in Tensorschreibweise festzulegen.

Für das homogene Untergrundmodell des idealisierten Felsuntergrunds werden tiefenabhängig folgende Durchlässigkeitsbeiwerte gewählt:

- Bereiche 4 und 5 nach Abb. 4.4: $k_T = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ (z.B. $d = 1 \text{ m}$, $2a_i = 5 \text{ mm}$, $k_f = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$)
- Bereiche 6 und 7 nach Abb. 4.4: $k_T = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ (z.B. $d = 1 \text{ m}$, $2a_i = 3 \text{ mm}$, $k_f = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$)
- Bereich 8 nach Abb. 4.4: $k_T = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ (z.B. $d = 1 \text{ m}$, $2a_i = 1 \text{ mm}$, $k_f = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$)

4.6 Kontaktfläche Staumauer und Felsuntergrund

In ICOLD EC (2004) sind die Ergebnisse verschiedener experimenteller Versuche zur Ermittlung spezifischer Scherparameter zwischen der Mauer und dem Felsuntergrund zusammengestellt und ausgewertet. Es handelt sich hierbei somit nicht um Materialparameter im klassischen Sinn sondern um eine Beschreibung der Haftfestigkeit der Betonierfuge zum Fels. Im Modell werden der untersten Elementreihe der Mauer (Bereiche 11-13 nach Abb. 4.4) die für die Kontaktfläche zwischen dem Beton und dem Tonschiefer geltenden Materialkennwerte zugewiesen.

Zugfestigkeit

Die Zugfestigkeit an der Kontaktfläche beträgt etwa 50 % der Festigkeit des monolithischen Betons (ICOLD EC, 2004). Daher wird ein Wert von $\sigma_t = 0,6 \text{ N/mm}^2$ angesetzt.

Scherparameter

Die Scherfestigkeit an der Kontaktfläche ist maßgeblich davon abhängig, wie gründlich diese vor dem Betonieren gereinigt wird, und ob zusätzlich Zementmilch aufgetragen wird. Die physikalischen Scherversuche zeigen, dass sich die Bruchfläche oftmals nicht an der Kontaktzone befindet, sondern der darunterliegende Fels die Schwachstelle darstellt. Im Vergleich zu anderen Felsarten weist eine Kontaktfläche mit Tonschiefer eine vergleichsweise geringe Kohäsion auf. Folgende Scherparameter werden in Anlehnung an ICOLD EC (2004) angesetzt:

- Spitzenreibungswinkel $\varphi_S = 60,0^\circ$
- Restreibungswinkel $\varphi_R = 35,0^\circ$
- Spitzenkohäsionswert $c_S = 2,0 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$
- Restkohäsionswert $c_R \approx 0 \text{ N/m}^2$

4.7 Überwachungseinrichtungen des Referenzbauwerks

Die Bauwerksüberwachung von Talsperren umfasst regelmäßige visuelle Kontrollen und die Durchführung von Messungen. Das Überwachungsprogramm richtet sich dabei nach den örtlichen und konstruktiven Gegebenheiten und sollte darüber hinaus dem Gefährdungspotenzial

angepasst sein (DWA-M 514, 2011). Dabei wird das Ziel verfolgt, sowohl die Einwirkungen auf die Sperre, als auch die Bauwerksreaktion in ausreichender zeitlicher und örtlicher Auflösung zu erfassen, um das Bauwerksverhalten hinsichtlich der Zuverlässigkeit interpretieren zu können.

Es existiert eine Vielzahl von unterschiedlichen Messmethoden und Geräten, die für die sperrenspezifischen Anforderungen einsetzbar sind. In dieser Arbeit wird das Tragwerksverhalten eines repräsentativen Querschnittes in Mauermitte analysiert. Daher wird auf Messverfahren, die die Mauerbewegungen in Längsrichtung erfassen, wie beispielsweise geodätische Lagebestimmungen von Objektpunkten, Alignements oder Blockfugmessungen, nicht näher eingegangen.

Für die messtechnische Ausrüstung der idealisierten Mauer werden gängige Überwachungseinrichtungen ausgewählt, die für die Beurteilung des aktuellen Bauwerkszustandes eine wichtige Rolle spielen und daher auch in den Empfehlungen des DWA-M 514 (2011) für die Ausstattung von Gewichtsstaumauern aufgeführt sind.

Im Folgenden werden die jeweiligen Messeinrichtungen kurz erläutert. Empfehlungen hinsichtlich des Messintervalls, der Messgenauigkeit und möglicher Fehlerquellen sind in Tab. 4.2 zusammengestellt. Die Anordnung der Messgeräte im Mauerquerschnitt des idealisierten Referenzbauwerks ist auf Seite 49 in Abb. 4.3 (rechts) ersichtlich.

Wasserstandsmessung

Ziel einer jeden Sperre ist die Speicherung und bedarfsgerechte Abgabe von Wasser. Für die Bewirtschaftung einer Talsperre ist daher der Wasserstand die wichtigste Messgröße. Darüber hinaus ist der Wasserdruck die wesentlichste Belastung für das Bauwerk. Gebräuchliche Verfahren zur Messung des Wasserstandes sind einerseits manuelle Ablesungen mittels Lattenpegel oder andererseits automatisierbare Verfahren wie Schwimmermessungen, pneumatische Messzellen, Radar- oder Ultraschallsensoren oder Druckmesssonden wie Quarzsensoren oder Präzisionsmanometer (Morgenschweis, 2010).

Temperaturmessung

Die zweite maßgebliche Einwirkung auf Staumauern stellt die Temperatur dar. Dabei ist sowohl die Lufttemperatur als auch die Temperatur an der wasserbenetzten Maueroberfläche von Bedeutung. Entsprechend der Umgebungstemperatur stellt sich im Mauerinneren eine Temperaturverteilung ein, die insbesondere das Verformungsverhalten der Mauer maßgeblich beeinflusst. Nach Dunnycliff (1993) haben sich zur Überwachung der Temperatur in der Praxis überwiegend optische Thermometer (z.B. Flüssigkeitsthermometer) und elektrische Thermometer (z.B. Widerstandselemente, Thermolemente, Bimetallthermometer, Messzellen mit schwingender Saite) bewährt. Im Gegensatz zu Dämmen werden bei Mauern faseroptische Thermometer kaum eingesetzt (Gebler, 2005).

Sickerwassermessung

Zur Funktionskontrolle von Drainagen und Dichtungselementen wird regelmäßig das in den Schächten und Kontrollgängen anfallende Sickerwasser registriert. Trübungen des Sickerwas-

sers können darüber hinaus Hinweise auf Erosionsprozesse im Bereich der Mauer oder des Untergrunds liefern. Bei geringen Mengen ($< 250\text{ml/s}$) erfolgt üblicherweise eine volumetrische Erfassung des Sickerwasseranfalls (DWA-M 514, 2011). Bei größeren Abflüssen werden geeichte Messwehre mit dreiecks- oder trapezförmigem Überfall eingesetzt. Über den gemessenen Wasserstand im Messwehr lassen sich Rückschlüsse auf den Sickerwasserabfluss ziehen. Für die Wasserstandserfassung am Messwehr eignen sich Stechpegel oder automatisierbare Verfahren wie Druck- oder Ultraschallsonden.

Gewichts- und Schwimmot

Lote werden in Staumauern zur Erfassung vertikaler Relativbewegungen eingesetzt. Gewichtslote (Pendellote) werden in einem Schacht oder einer Bohrung möglichst nahe der Mauerkrone befestigt und durch ein am unteren Ende des Drahtes verankertes Gewicht gespannt (Möser u. a., 2012). Um durch Luftzirkulationen ausgelöste Schwingungen zu dämpfen, ist das Gewicht in einen mit Wasser oder Öl befüllten Behälter eingetaucht. Über ein Koordiskop oder einen automatisierten elektrooptischen Positionsgeber lässt sich die vertikale Verschiebung der Aufhängung gegenüber der Ableseeinrichtung ermitteln.

Im Gegensatz dazu werden Schwimmote (Umkehrlote) am Fuß einer möglichst tief in den Felsuntergrund reichenden vertikalen Bohrung verankert und über ein sich in einem wassergefüllten Behälter befindlichen Schwimmkörper gespannt. Durch diese Messeinrichtung lassen sich Bewegungen der Ableseeinrichtung gegenüber der Aufhängung im Untergrund erfassen.

Sohlpiezometer

Sohlpiezometer ermöglichen eine Erfassung des Porenwasserdrucks im Bereich der Mauerstandsfläche. Dabei werden meist vom Kontrollgang aus Bohrungen zu den jeweiligen Messpunkten erstellt. In der Regel übersteigt der anstehende Wasserdruck die geodätische Lage der Bohrlochöffnung, so dass überwiegend geschlossene Systeme eingesetzt werden. In der Praxis kommen dabei hydraulische, pneumatische oder elektrische Piezometer zur Anwendung, deren Funktionsweisen z. B. in ASCE (2000) näher ausgeführt sind.

Tab. 4.2: Empfehlungen zur Messhäufigkeit und zur maximal zulässigen Messunsicherheit nach DWA-M 514 (2011) und STK (2005a)

Messgröße	Häufigkeit der Messung*	Messunsicherheit (Standardabweichung)	Mögliche Fehlerquellen***
Wasserstand	permanent	$< 0,05 \text{ m}^{*,**}$	Sedimentablagerungen und Schwebstoffe im Bereich der Zuleitungen zum Messgerät; Wellengang, Treibgut und Eis an der Wasseroberfläche.
Temperatur	Lufttemperatur täglich/ permanent, Mauertemperatur monatlich	$< 0,5 \text{ K}^{*,**}$	Störungen der Stromversorgung z.B. infolge Blitzschlag; Positionierung in Bereichen mit direkter Sonneneinstrahlung oder mit Luftzug; Nullpunktverschiebungen auf Grund fehlender regelmäßiger Kalibrierungen.
Sickerwassermessung	Gesamtsickerwasser wöchentlich	$< 5\%$ der maximal zu erwartenden Menge**	Verfälschung der Wasserstand-Abflussbeziehung des Messwehres durch Sinterablagerungen im Bereich der Überfallkante oder durch zurückgestaute Verhältnisse.
Gewichtslot, Schwimmlot	wöchentlich	$< 0,1 \text{ mm}^{**}$	Unzureichende Befüllung der Schwimmgefäße; Unsachgemäße Eichung und Einhängung des Ablesegerätes; Eisbildung oder Algenwuchs im Schwimmgefäß; Eisbildung oder Fixpunktverschiebung im Bereich der Lotaufhängungen oder Ableseeinrichtungen.
Piezometer	monatlich	offenes System: $< 0,025 \text{ m}^{**}$, geschlossenes System: $< 0,25 \text{ m}^{**}$	Offenes System: Eindringen von Oberflächenwasser, Schlamm oder Steinen; unzureichend Be- oder Entlüftung. Geschlossenes System: Versinterung oder Verschlammung des Bohrlochs; unzureichende Wartung und Kalibrierung der Ablese- und Messeinrichtungen.
*nach (DWA-M 514, 2011)			
*nach (STK, 2005a) Angaben in der Literaturquelle als Genauigkeit der gesamten Messeinrichtung $\pm a$. Unter der Annahme einer Normalverteilung und einem Erweiterungsfaktor $k = 2$ erfolgt eine Umrechnung auf die Messunsicherheit mit $u = a/k$.			
***nach (STK, 2005b)			

5 Betreiberumfrage zu Talsperrenüberwachungsdaten von Gewichtsstaumauern

Um die Simulationsergebnisse der idealisierten Mauer mit den Messdaten realer Gewichtsstaumauern in Bezug setzen zu können, wird eine schriftliche Befragung deutscher Talsperrenbetreiber durchgeführt. Die Betreiberumfrage verfolgt zum einen das Ziel, Informationen über den Überwachungsumfang an den Gewichtsstaumauern zu erheben. Dabei sind die Messhäufigkeit, die Art der Datenerfassung und inwiefern an den Messstellen Warnwerte definiert sind, von Interesse. Zum anderen werden durch eine deskriptive Datenanalyse der zur Verfügung gestellten Messdaten typische Größenordnungen und Schwankungsbereiche verschiedener Messgrößen bei gewöhnlichem Stauanlagenbetrieb ermittelt. Diese sind später für die Bewertung der Berechnungsergebnisse aus dem FE-Modell in Abschnitt 6.3.2 erforderlich. Mit weiterführenden statistischen Verfahren, wie der Korrelations- und Regressionsanalyse wird darüber hinaus die Stärke des Zusammenhangs zwischen den Wirkgrößen und den Messwerten der Bauwerksreaktion analysiert und durch eine anschließende Residuenanalyse der natürlichen Messdaten deren Messunsicherheiten abgeleitet. Diese fließen dann wiederum als Unschärfe in das Bayessche Netz aus Kapitel 7 ein.

5.1 Aufbau des Fragebogens

Der Fragebogen ist für eine E-Mail-Befragung ausgelegt, da neben sperrenspezifischen Fragen auch Talsperrenüberwachungsdaten in digitaler Form zur Verfügung gestellt werden sollen. Die Umfrage besteht aus folgenden zwei Teilen:

Das Begleitschreiben, das im Anhang D.1 abgedruckt ist, soll den Teilnehmer motivieren und auf den Fragenteil vorbereiten. In Anlehnung an Schnell u. a. (2011) wird hier in knapper Form der Zweck und die Relevanz der Untersuchung erläutert sowie die Vorteile einer Teilnahme an der Umfrage aufgeführt. Des Weiteren enthält das Schreiben eine Zusage, dass die Fragebögen vertraulich behandelt werden. Im zweiten Teil werden Anmerkungen zur Vorgehensweise und dem Ausfüllen des Umfragebogens aufgeführt.

Der Fragenteil des Erhebungsbogens ist als Microsoft-Excel-Arbeitsmappe konzipiert, deren Tabellenblätter im Anhang D.2 abgebildet sind. Das erste Tabellenblatt fragt Kontaktdaten der ausfüllenden Person und allgemeine Kennwerte zur Talsperre ab. Die darauf folgenden Tabellenblätter beziehen sich jeweils auf eine bestimmte Messgröße. Dabei werden gängige Überwachungseinrichtungen betrachtet, die auf Grund ihrer Bedeutsamkeit für die Bewertung der Talsperrensicherheit auch bei der konzipierten idealisierten Talsperre aus Abschnitt 4.7 Berücksichtigung finden. Dies sind die Messgrößen Wasserstand und Temperatur, die die wesentlichen Einwirkungen auf die Staumauer repräsentieren. Da nur wenige Talsperren direkt am Standort über Niederschlags- oder Erdbebenaufzeichnungen verfügen, erfolgt keine Erhebung dieser Daten. Die Bauwerksreaktion wird in der Regel durch die Messung des Sickerwasseranfalls, die Lotbewegungen und der Piezometerdrücke beobachtet. Weitere Messdaten wie beispielsweise von Extensometern und Inklinometern werden nicht abgefragt, da diese Messgeräte stark auf die örtlichen Gegebenheiten abgestimmt sind und somit eine

Vergleichbarkeit der Anlagen untereinander kaum möglich ist. Neben einführenden allgemeinen Fragen zur messtechnischen Ausstattung und zur Datenerfassung ist die untere Hälfte des Tabellenblatts für die Eingabe der zugehörigen Messdaten vorgesehen.

5.2 Durchführung der Befragung

Die Befragung richtet sich an Eigentümer von Gewichtsstau Mauern mit einer Höhe über Gründungssohle von mehr als 15 m. In Deutschland existieren insgesamt 82 Talsperren, auf welche dieses Kriterium zutrifft. Für diese Grundgesamtheit sind etwa 30 verschiedene Betreiber unterhaltungspflichtig, die sich folgenden Bereichen zuordnen lassen:

- Energieversorger,
- Landestalsperrenverwaltungen und andere staatliche Betreiber sowie
- Wasserversorgungsunternehmen und Wasserwirtschaftsverbände.

In einem ersten Schritt werden obige Betreiber telefonisch kontaktiert, um deren Interesse an einer Umfragebeteiligung zu testen. Dabei stellt sich heraus, dass die Bereitschaft zur Teilnahme an der Umfrage bei kleineren Unternehmen auf Grund der begrenzten Personalkapazitäten relativ gering ist. In einem weiteren Schritt wird daher der Fragebogen vornehmlich an größere Betreiber, die für mehr als eine Gewichtsstau Mauer zuständig sind, versendet. Diese sind mit insgesamt 82 % für den Großteil der Gewichtsstau Mauern aus der Grundgesamtheit verantwortlich.

Nach dem Rücklauf der Umfragebögen werden zunächst sowohl die allgemeinen Fragen als auch die Daten auf Plausibilität überprüft. Durch eine graphische Darstellung der Zeitreihen und Box-Plots lassen sich Werte leicht erkennen, die deutlich ausreißern bzw. physikalisch mögliche Grenzen überschreiten (z. B. Piezometerwert = 0 m+NN). Diese Werte sind in der Regel auf Ablese-, Übertragungs- oder Auswertungsfehler, Gerätedefekte oder Umstellungen der Messmethode zurückzuführen und stellen somit keine verwertbaren Messwerte dar. Bei Bedarf werden etwaige Auffälligkeiten durch ein telefonisches Gespräch geklärt und unzutreffende Antworten bzw. fehlerbehaftete Daten aus dem Datensatz entfernt oder entsprechend abgeändert.

5.3 Auswertung der Umfrage

An der Befragung haben sich sechs Betreiber mit insgesamt 16 Sperren beteiligt. Somit sind rund 20 % der relevanten Gewichtsstau Mauern in der Umfrage vertreten. Folgende Unternehmen haben freundlicherweise Informationen zu ihren Talsperren sowie Messdaten zur Verfügung gestellt:

- EnBW Kraftwerke AG,
- Ruhrverband,
- Schluchseewerk AG,
- Talsperrenbetrieb Sachsen-Anhalt,
- Wasser- und Schifffahrtsamt Hann. Münden,

- Wupperverband.

Die Merkmale der in der Umfrage berücksichtigten Mauern sind im Folgenden aufgeführt. Diese Stichprobe wird darüber hinaus in Bezug zur Grundgesamtheit aller 82 Gewichtsstau-mauern aus Abschnitt 4.2 und 4.3 gesetzt.

- Die Mauerhöhe über Gründungssohle der Grundgesamtheit weist einen Medianwert von 32,0 m auf, wohingegen der Median der Mauern aus der Befragung 42,5 m beträgt. Die Abmessungen der in der Umfrage beteiligten Sperren sind somit im Mittel etwas größer.
- 56 % der Mauern sind in Beton und 44 % als Bruchsteinmauerwerk ausgeführt. Dieses Verhältnis entspricht im Wesentlichen dem der Grundgesamtheit.
- Alle Mauern der Umfrage besitzen Drainagen zur Entwässerung des Mauerkörpers, wo-hingegen die Mauern der Grundgesamtheit lediglich zu zwei Drittel mit Mauerdrainagen ausgestattet sind.
- 63 % der an der Umfrage beteiligten Mauern haben Sohldrainagen. Im Gegensatz dazu sind lediglich 45 % der Talsperren aus der Grundgesamtheit mit Sohldrainagen ausgestattet.
- Die Gewichtsstau-mauern der Befragten verfügen über folgende Dichtungsmaßnahmen im Untergrund: 81 % der Mauern haben einen Injektionsschleier an der Wasserseite, 13 % eine Untergrunddichtung sowohl auf der Luft- als auch auf der Wasserseite und rund 6 % der Mauern sind ohne zusätzliche Abdichtung des Untergrundes ausgeführt. Dagegen wurden lediglich bei drei Viertel der Mauern aus der Grundgesamtheit Injek-tionsarbeiten im Untergrund durchgeführt.

Im Folgenden wird die Stichprobe der Gewichtsstau-mauern nach unterschiedlichen Kriterien analysiert.

5.3.1 Auswertung des Messprogramms

Den Betreibern ist freigestellt, mit welchen Anlagen sie sich an der Umfrage beteiligen möch-ten und somit stellen die in der Umfrage aufgenommen Anlagen keine Zufallsauswahl aus der Grundgesamtheit dar. Ein Teil der Betreiber suchte explizit Anlagen aus, deren Überwa-chungseinrichtungen bereits modernisiert bzw. automatisiert wurden. Damit liegt eine bessere Messdatengrundlage für die statistische Messdatenanalyse vor. Dieser Umstand ist bei der Bewertung der Messprogramme zu berücksichtigen.

In Abb. 5.1 sind graphische Auswertungen der Messintervalle, die Art der Messwerterfassung, sowie die Vorgabe von Warnwerten messgerätebezogen dargestellt.

Der Wasserstand aller an der Umfrage beteiligten Gewichtsstau-mauern wird mindestens ein-mal täglich erfasst. Die Messung erfolgt automatisiert und die Daten werden an eine Leitwarte fernübertragen.

Eine Auswertung zur Temperaturmessung ist nur eingeschränkt möglich, da unterschiedliche Messdaten zur Verfügung gestellt wurden (47 % Lufttemperaturmessdaten, 40 % Messda-ten der Mauertemperatur in Kronennähe, 13 % Wassertemperaturdaten). Bei der geringen Datengrundlage der jeweiligen Messstellen lässt sich kein eindeutiger Zusammenhang zwi-schen der Temperaturmessgröße und dem Messintervall herstellen.

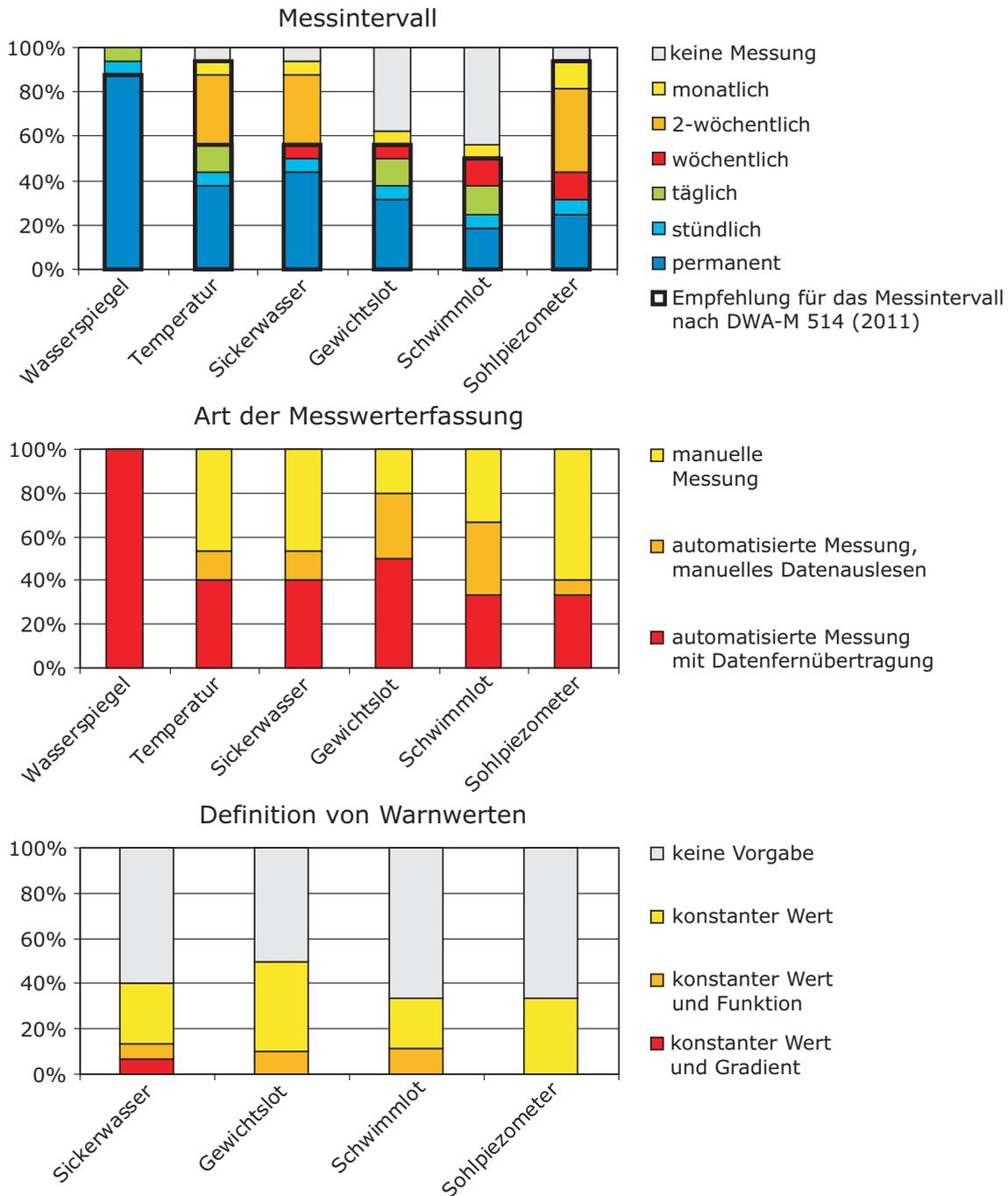


Abb. 5.1: Messprogramm der an der Umfrage beteiligten Gewichtsstaumauern

Während bei nahezu allen Mauern das Gesamtsickerwasser und der Potenzialabbau registriert wird, sind dagegen nur etwa 60 % der Sperren mit einem Gewichts- oder Schwimmlot ausgestattet. Beträgt der Zeitabstand zwischen den Messungen mindestens eine Woche, so wird die Messung manuell durchgeführt. Bei kürzeren Überwachungsintervallen erfolgen automatisierte Messungen. Dabei werden die Daten in der Regel direkt fernübertragen.

Die empfohlenen Messintervalle des DWA-M 514 (2011) aus Tab. 4.2 sind in Abb. 5.1 als schwarze Umrandung gekennzeichnet. Es ersichtlich, dass die vorgeschlagenen Richtwerte weitestgehend eingehalten werden.

Für den überwiegenden Teil der Sperren existieren an den jeweiligen Messstellen keine festgelegten Warnwerte. Sind Meldewerte definiert, sind diese in der Regel konstant und hängen nicht von anderen Größen, wie dem Wasserstand oder der Temperatur ab. Auch die Vorgabe eines maximal tolerierbaren Gradienten, der bei einem starken Anstieg der Messgröße innerhalb eines kürzeren Zeitintervalls überschritten werden würde, ist eher unüblich.

5.3.2 Größenordnung der Messwerte

Aus den Messdaten, die der Umfrage beigelegt sind, werden statistische Kennzahlen ermittelt, um die Größenordnungen und Schwankungsbereiche der Messwerte in Diagrammen übersichtlich darzustellen.

Größenordnung des Sickerwasseranfalls

Die Größenordnung des Sickerwasserabflusses wird in Abb. 5.2 als Streudiagramm durch die Kennzahlen Median (Punkt) und Standardabweichung (Balken) charakterisiert.

Der Sickerwasseranfall ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig und kann daher von Sperre zu Sperre deutlich variieren. Ein wesentlicher Faktor für den Sickerwasseranfall ist die Abmessung der Mauer, so dass die gemittelten Messwerte in Abhängigkeit der Größe „Länge x Höhe“ aufgetragen sind. Des Weiteren wird zwischen Mauern mit und ohne Untergrunddrainage unterschieden.

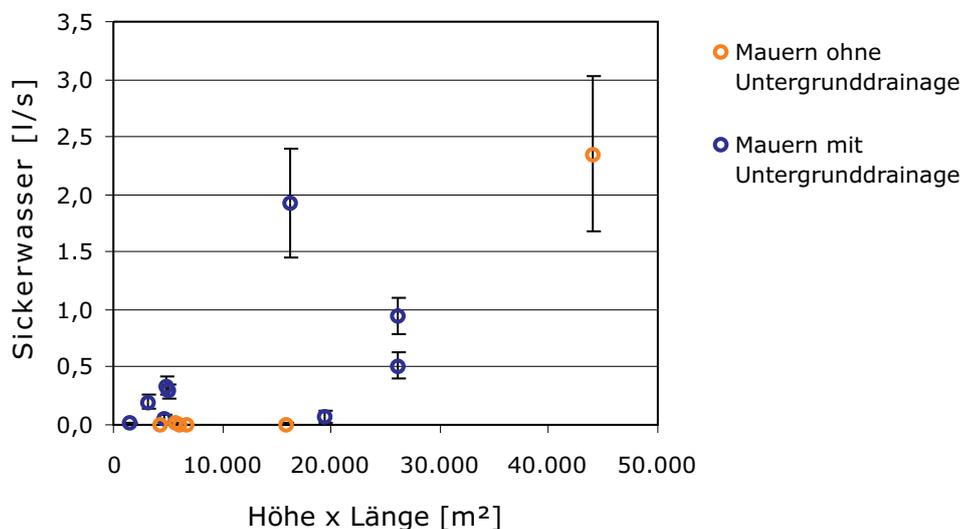


Abb. 5.2: Median und Standardabweichung des Sickerwasserabflusses der an der Umfrage beteiligten Gewichtsstaumauern

Wie zu erwarten, ist der Sickerwasseranfall bei Mauern mit Untergrunddrainagen tendenziell etwas höher als bei Mauern die über keine Sohl drainagen verfügen. Weitere Untergliederungen wie beispielsweise die Unterscheidung in Bruchsteinmauern und Mauern aus Beton oder mit und ohne Mauerdrainage liefert infolge des begrenzten Datenumfanges keine repräsentativen Darstellungen. Auf Grund des relativ schwachen Zusammenhangs zwischen dem Median der Messgröße und der Mauerabmessung wird deutlich, dass der Gesamtsickerwasserabfluss einer Sperre sehr stark von äußeren Faktoren geprägt ist. Dazu

gehören unter anderem die Anordnung der Kontrollgänge und Kontrollschächte in der Mauer, die Abdichtung der Kronenfahrbahn gegenüber eindringendem Niederschlagswasser oder auch Hangquellen, die in die Sperre eingeleitet werden. Daher lassen sich nur bedingt allgemeingültige Aussagen über die Größenordnung des Sickerwasseranfalls treffen.

Größenordnung der Lotmessdaten

Als Maß für die Lotbewegung wird die Spannweite der Messdaten herangezogen. Da diese Größe sensibel auf Messwerte reagiert, die als Ausreißer einzuordnen sind, bleiben jeweils die höchsten und niedrigsten 2,5 % der Messwerte in der Auswertung unberücksichtigt. Im Streudiagramm in Abb. 5.3 ist somit der Quantilabstand $Q_{0,975}$ bis $Q_{0,025}$ in Abhängigkeit von der Mauerhöhe dargestellt.

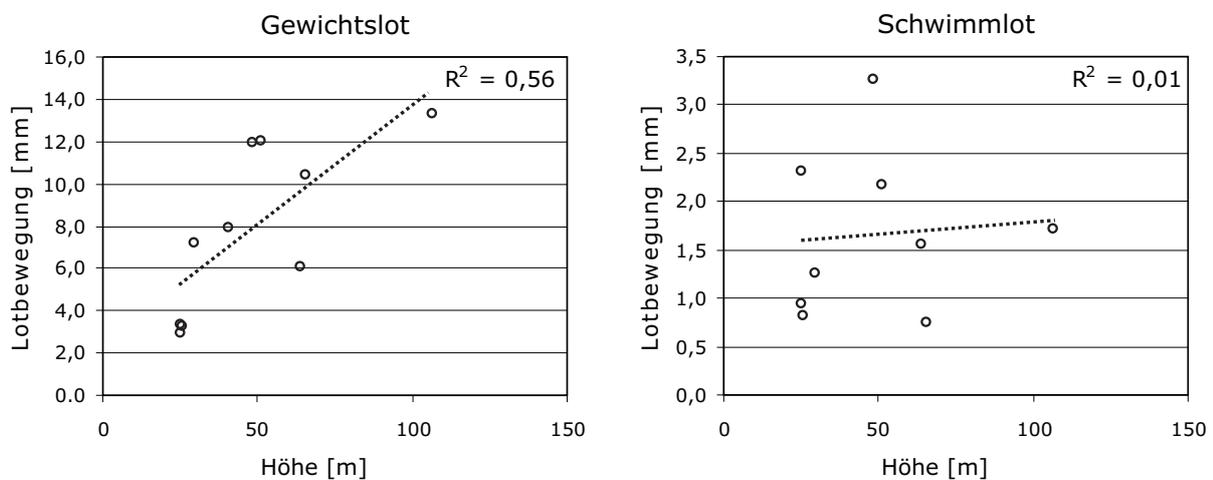


Abb. 5.3: Quantilabstand der Gewichtslotbewegung der an der Umfrage beteiligten Gewichtsstaumauern

Die maximale Gewichtslotauslenkung hängt deutlich von der Mauerhöhe ab, so dass das Bestimmtheitsmaß R^2 nach Gleichung 2.3 den Wert 0,56 aufweist. Zwei Faktoren führen jedoch zu einer gewissen Streuung der Ergebnisse. Zum einen ist die Gewichtslotauslenkung vom Wasserstand an der Talsperre abhängig. Da jedoch die an der Umfrage beteiligten Talsperren im Normalbetrieb lediglich in einem geringen Maße bewirtschaftet werden (durchschnittlich 20 % des Bewirtschaftungsraumes), spielen die Wasserspiegelschwankungen hier eine untergeordnete Rolle. Zum anderen hängt die Auslenkung von der Länge des Lotdrahts ab. Das Gewichtslot wird in der Regel nahe der Mauerkrone eingehängt, die Ablesung erfolgt am unteren Ende im Kontrollgang. Dieser befindet sich jedoch nicht bei jeder Mauer direkt an der Gründungssohle. Tendenziell verfügen jedoch höhere Mauern über längere Gewichtslote. Die Spannweite der Schwimmlotbewegung ist, wie aus Abb. 5.3 hervorgeht, im Vergleich zum Gewichtslot deutlich geringer und unabhängig von der Mauergröße ($R^2 = 0,01$). Es besteht auch nicht zwangsläufig ein Zusammenhang zwischen Länge der Schwimmlotbohrung und Mauerhöhe.

Größenordnung der Piezometerdaten

Eine für die Standsicherheit der Mauer maßgebliche Größe ist der Sohlwasserdruck, der durch Piezometer registriert wird. Der Potenzialabbau an der Sohle wird in Abb. 5.4 als Liniendiagramm

gramm dargestellt. Dabei werden Maximalwerte verwendet. Um den Einfluss von Ausreißern zu reduzieren, wird der Quantilwert $Q_{0,975}$ angesetzt.

Um die Messdaten der unterschiedlichen Mauern vergleichen zu können, werden diese zuvor entsprechend der Mauerhöhe normiert. Auf der Abszisse ist der im Bezug zur Querschnittsbreite relative Abstand zur Wasserseite aufgetragen. An der Stelle $x = 0$ ist der Wasserstand im Becken ($Q_{0,975}$) eingezeichnet.

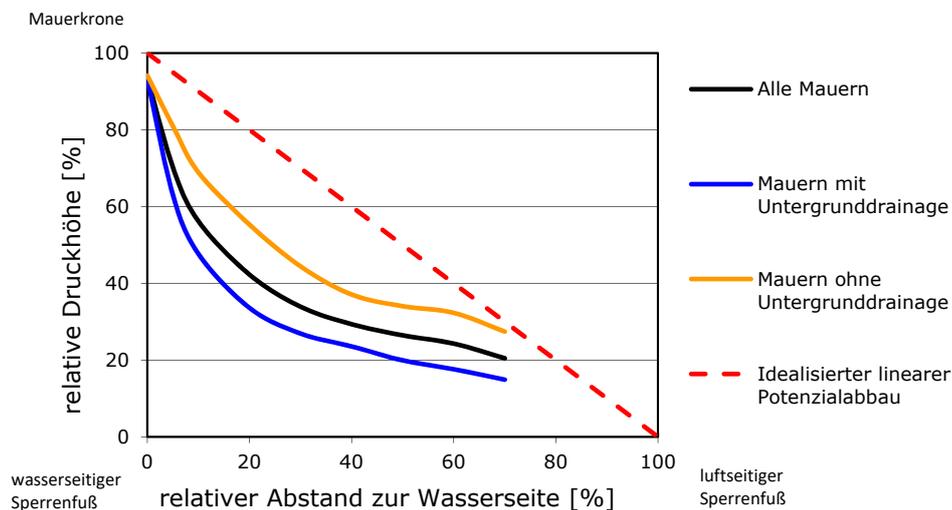


Abb. 5.4: Potenzialabbau an der Mauersohle der an der Umfrage beteiligten Gewichtsstaumauern (Maximalwerte)

Zum Vergleich ist zudem in rot gestrichelt der idealisierte lineare Potenzialabbau für folgenden Sonderfall eingetragen: die Mauer ist bis zur Krone gefüllt, der Grundwasserstand unterwasserseitig befindet sich auf Höhe der ebenen Aufstandsfläche, der Untergrund ist in Bezug auf die Durchlässigkeit homogen und somit ist auch kein Dichtungsschleier vorhanden, die Maueroberfläche ist absolut wasserdicht.

In Abb. 5.4 wird zwischen Mauern mit und ohne Untergrunddrainagen unterschieden. Dazu wird jeweils der Sohldruckverlauf der 9 Mauern mit, sowie der 5 Mauern ohne Drainage gemittelt. In der Darstellung wird deutlich, dass sich der Sohldruck durch die Entwässerung der Sohle effektiv reduzieren lässt. Anzumerken ist, dass bei dieser Darstellung die Lage der Linien auch von der Einbindetiefe der Mauer im Untergrund und dem Grundwasserspiegel im Unterwasser abhängig ist. Da in der Grafik die Ergebnisse mehrerer Mauern gemittelt sind, ist die Darstellung trotz der genannten Einschränkungen aussagekräftig.

Weil nahezu alle Sperren der Umfrage über einen Dichtungsschleier verfügen, lässt sich mit den zur Verfügung stehenden Daten keine repräsentative Darstellung mit der Differenzierung zwischen Mauern mit und ohne Untergrundabdichtung erzeugen.

5.3.3 Abhängigkeit der Messwerte von den Wirkgrößen Wasserstand und Temperatur

Die in der Umfrage erhobenen Messgrößen Wasserstand und Temperatur repräsentieren, wie bereits erwähnt, die wesentlichen Einwirkungen auf die Staumauer. Der Sickerwasseranfall,

die Lotbewegungen und Piezometerdrücke sind Messgrößen, die die Bauwerksreaktion charakterisieren. Mit Hilfe der multiplen Regressionsanalyse wird die Stärke des Zusammenhangs zwischen den Wirkgrößen und dem gemessenen Bauwerksverhalten analysiert.

Multiple Regression

Mittels multipler Regression lässt sich, wie in Abschnitt 2.1 erläutert, ein Regressionsmodell aufstellen, das den linearen Zusammenhang zwischen den Wirkgrößen und den einzelnen, die Bauwerksreaktion repräsentierenden Größen beschreibt. Dabei wird die Datengrundlage in einen Kalibrierungszeitraum (2/3 der Datenreihe), für den die Modellparameter angepasst werden, und einem Validierungszeitraum (1/3 der Datenreihe), mit welchem die Eignung des Modells überprüft werden kann, unterteilt.

Die Güte des Anpassungsmodells lässt sich mit dem multiplen Bestimmtheitsmaß (R^2) bewerten (vgl. Gleichung 2.14). Ein niedriger Wert nahe Null deutet darauf hin, dass das Regressionsmodell die Messgrößen nur sehr schwach beschreiben kann, ein Wert größer als 0,5 besagt dagegen, dass die Wirkgrößen einen hohen Einfluss auf die Messgrößen haben.

Zur Beurteilung der Güte der Regressionsgleichung wird darüber hinaus die Maßzahl Root-Mean-Square Error (RMSE) herangezogen (vgl. Gleichung 2.6). Diese beschreibt die durchschnittliche Abweichung der im Modell berechneten Größe von der tatsächlichen Beobachtung und trägt die Einheit der Messgröße.

Für die Datenreihen der jeweiligen Sperren aus der Umfrage werden entsprechende Regressionsmodelle aufgestellt und oben genannte Gütemaße bestimmt. Die über alle Sperren gemittelten Ergebnisse sind für die jeweiligen Messgrößen der Bauwerksreaktion in Abb. 5.5 dargestellt. Die Piezometerdaten werden dabei entsprechend ihrem Abstand zur Wasserseite den Gruppen erstes, zweites und drittes Drittel der Mauerbreite zugeordnet.

Wie aus Abb. 5.5 hervor geht, ist das multiple Bestimmtheitsmaß R^2 der Validierungszeiträume nur geringfügig geringer als das der Kalibrierungszeiträume und auch der Zuwachs des mittleren Fehlers ist verhältnismäßig klein. Dies deutet darauf hin, dass innerhalb der ausgewerteten Zeitabschnitte keine gravierenden Umstellungen der Messwerterfassung erfolgt sind. Des Weiteren liegt keine maßgebliche Änderung des Bauwerksverhaltens vor. Im negativen Fall könnte diese auf Schäden am Objekt zurückzuführen sein und im positiven Fall könnte diese durch Sanierungsmaßnahmen verursacht sein.

Die Variation der Sickerwasserdaten lässt sich im Vergleich zu den anderen Messgrößen weniger gut durch die Wirkgrößen beschreiben ($R^2 = 0,41$ für den Kalibrierungszeitraum). Wie bereits erläutert, wird der Sickerabfluss deutlich von weiteren Einflussgrößen geprägt.

Der mittels Regression hergeleitete funktionale Zusammenhang für das Gewichtslot ist besser als der für das Schwimmlot. Da jedoch die Schwankungen der Gewichtslotauslenkung im Vergleich zum Schwimmlot deutlich größer sind (vgl. Abb. 5.3), weist das Gewichtslot einen größeren mittleren Fehler auf.

Wie aus Abb. 5.5 hervorgeht, werden die an der Wasserseite angeordneten Piezometer deutlich stärker von den Wirkgrößen beeinflusst, als die im zweiten und dritten Drittel des Mauerquerschnitts positionierten Messgeräte. Da der Schwankungsbereich der Sohlwasserdrücke in Richtung Wasserseite zunimmt, ist hier der RMSE größer.

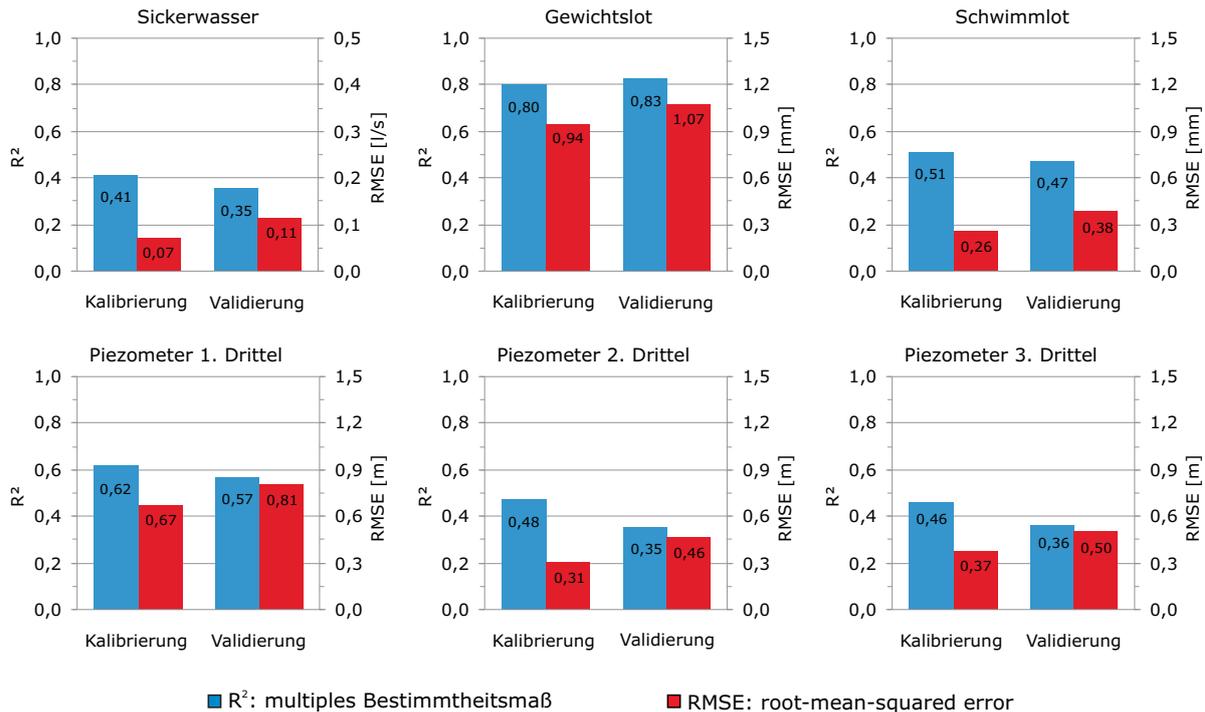


Abb. 5.5: Güte der Regressionsmodelle für die Überwachungsdaten aus der Umfrage

Varianzzerlegung

Um aufzuzeigen, wie groß der jeweilige Anteil der im Regressionsmodell berücksichtigten Wirkgrößen Temperatur (*Temp*) und Wasserstand (*Stau*) an der erklärenden Varianz der Messgröße (*y*) ist, wird für den Kalibrierungszeitraum sämtlicher Zeitreihen eine Varianzzerlegung durchgeführt (vgl. Abschnitt 2.2). Für jede Messgröße werden die einzelnen Varianzanteile der jeweiligen Gewichtsstaumauern gemittelt und in Abb. 5.6 als gestapeltes Säulendiagramm dargestellt. Die einzelnen Abschnitte sind dabei wie folgt definiert:

- Varianzanteil Stau: gemittelte quadrierte Semipartialkorrelation $\bar{r}_{y(Stau.Temp)}^2$
- Varianzanteil Temperatur: gemittelte quadrierte Semipartialkorrelation $\bar{r}_{y(Temp.Stau)}^2$
- Varianzanteil Stau und Temperatur: $\bar{R}^2 - \left(\bar{r}_{y(Stau.Temp)}^2 + \bar{r}_{y(Temp.Stau)}^2 \right)$
- Varianzanteil Rest: $1 - \bar{R}^2$

Wie dem Säulendiagramm in Abb. 5.6 zu entnehmen ist, wird der Sickerwasserabfluss wesentlich stärker vom Wasserstand als von der Temperatur beeinflusst. Dabei ist festzuhalten, dass durch die Größe Temperatur indirekt auch andere Größen mit einbezogen werden, die ebenfalls einen Jahresgang besitzen. Dies könnte beispielsweise auf die Niederschlagsverteilung oder die Grundwasserstände zutreffen.

Die durch das Gewichtslot registrierte Mauerbewegung wird hauptsächlich von der Temperatur geprägt. Dass Wasserstandsänderungen hier eine untergeordnete Rolle spielen, hängt jedoch auch damit zusammen, dass die Speicherbewirtschaftung der an der Umfrage beteiligten Sperren im Regelbetrieb nur wenige Meter beträgt. Die Schwimmplotbewegung wird im Gegensatz zum Gewichtslot dagegen durch den Wasserstand dominiert.

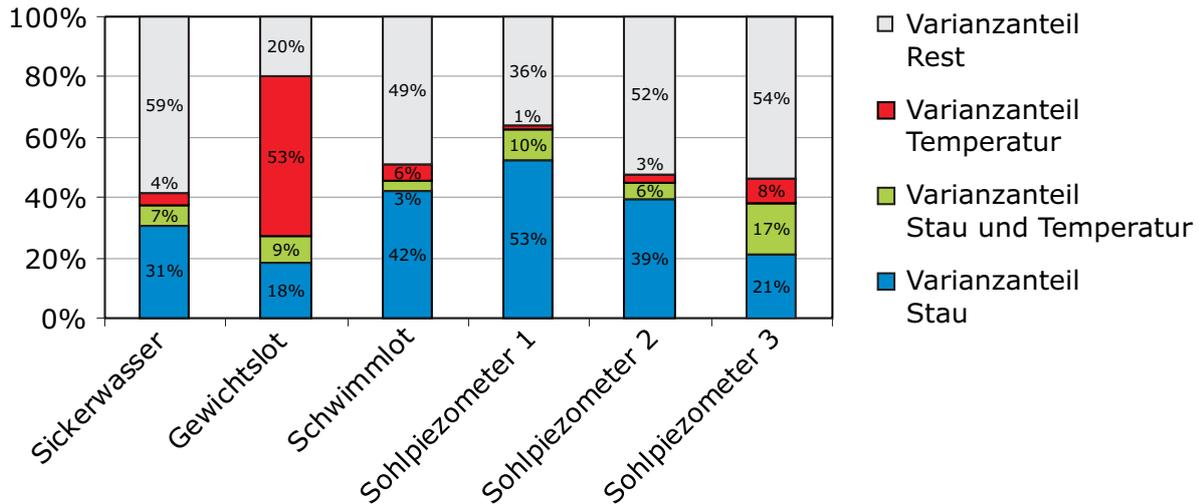


Abb. 5.6: Darstellung der Varianzanteile der Überwachungsdaten aus der Umfrage für die jeweiligen Messgeräte

Bei den Piezometern sind die Varianzanteile von deren Positionierung abhängig. Je weiter die Piezometer von der Wasserseite entfernt angeordnet sind, desto geringer ist die Abhängigkeit vom Wasserstand. Der Einfluss anderer, jahreszeitlich schwankender Größen nimmt dagegen zu.

Residuenanalyse

Im FE-Modell der idealisierten Gewichtsstaumauern werden die maßgeblichen Wirkgrößen Temperatur und Stau berücksichtigt. Wie bereits erläutert, lassen sich je nach Messgröße jedoch lediglich 41 % bis 80 % der Variabilität mit diesen beiden Größen erklären (vgl. Abb. 5.6). Um eine realitätsnahe Bewertung der FE-Berechnungsergebnisse zu ermöglichen, muss dieser restliche Anteil der Streuung in der Erstellung des Bayesschen Netzes in Kapitel 7 gesondert Berücksichtigung finden. Die künstlich generierten Messdaten weisen dadurch im Bezug auf ihre Unschärfe ähnliche Eigenschaften wie reale Messdaten auf, wodurch die Aussagekraft der Endauswertung in Kapitel 8 verbessert wird. Zur systematischen Beschreibung dieser Unsicherheiten wird daher eine Zeitreihenanalyse der Regressionsresiduen durchgeführt.

In einem ersten Schritt wird untersucht, welcher Verteilungsfunktion sich die Residuen zuordnen lassen. Gängige Testverfahren wie der Lilliefors-Test (Lilliefors, 1967), der Jarque-Bera-Test (Jarque und Bera, 1987) oder der Anderson-Darling-Test (Trujillo-Ortiz u. a., 2007) führen zu dem Ergebnis, dass mehrheitlich eine Normalverteilung der Residuen vorliegt. Dementsprechend werden für sämtliche Residuen die Parameter der Normalverteilung ermittelt (vgl. Anhang A.1). Da es sich bei den untersuchten Zeitreihen um Residuen der Regressionsanalyse handelt, ist der Lageparameter gleich Null. Der zweite Parameter, die Standardunsicherheit $u(x_0)$, wird durch den Median der Standardabweichungen der Residuen sämtlicher Mauern ermittelt. Da sich die Standardunsicherheiten des Sickerwasserabflusses der Mauern mit und ohne Untergrunddrainagen grundlegend unterscheiden, werden diese differenziert betrachtet. Die berechneten Werte sind in Tab. 5.1 in der zweiten Spalte aufgeführt. Diesen Werten sind repräsentative oberer Erwartungswerte gegenübergestellt, die aus dem Median der Maximalwerte bzw. Spannweiten ermittelt sind.

Tab. 5.1: Ermittelte Standardunsicherheiten aus der Residuenanalyse der Überwachungsdaten

	Standardunsicherheit $u(x_0)$	repräsentativer oberer Erwartungswert
Sickerwasser Mauer ohne UD	0,01 l/s	0,02 l/s
Sickerwasser Mauer mit UD	0,05 l/s	0,42 l/s
Gewichtslot	0,65 mm	7,6 mm
Schwimmlot	0,26 mm	1,6 mm
Piezometer 1	0,41 m	12,2 m
Piezometer 2	0,35 m	8,6 m
Piezometer 3	0,33 m	6,4 m

Im zweiten Schritt werden die Residuen, wie in Kapitel 2.3.5 erläutert, hinsichtlich ihrer Autokorrelation analysiert. Eine Auswertung der Zeitreihen zeigt, dass sich die Residuen sehr gut mit einem einfachen autoregressiven Prozess erster Ordnung beschreiben lassen:

$$z_t = \phi \cdot z_{t-1} + a_t \quad (5.1)$$

Für die Messwerte der jeweiligen Messgeräte werden für unterschiedlichen Messintervalle die spezifischen Autoregressionsparameter ϕ ermittelt. Um eine breitere Datengrundlage zu erhalten, werden darüber hinaus die vorliegenden Zeitreihen mit kurzen Messintervallen mehrfach ausgewertet. So werden beispielsweise aus täglichen Zeitreihen zusätzlich wöchentliche, zweiwöchentliche und monatliche Reihen gebildet. Die aus dem Median aller Einzelergebnisse abgeleiteten Autoregressionsparameter ϕ sind in Tab. 5.2 zusammengestellt. Dabei ist ersichtlich, dass erwartungsgemäß die Autokorrelation mit zunehmendem Messabstand abnimmt. Die geringste Autokorrelation weisen die Sickerwasserdaten der Mauern ohne Untergrunddrainagen auf.

Tab. 5.2: Ermittelte Autoregressionsparameter aus der Residuenanalyse der Überwachungsdaten

	Autoregressionsparameter ϕ			
	täglich	wöchentlich	2-wöchentlich	monatlich
Sickerwasser Mauer ohne UD	0,40	0,30	0,25	0,20
Sickerwasser Mauer mit UD	0,80	0,65	0,50	0,35
Gewichtslot	0,90	0,70	0,55	0,35
Schwimmlot	0,95	0,85	0,70	0,55
Piezometer 1	0,90	0,80	0,60	0,50
Piezometer 2	0,90	0,70	0,55	0,40
Piezometer 3	0,90	0,65	0,50	0,30

6 Finite-Elemente-Modellierung der idealisierten Mauer

Mit Hilfe der Finite Elemente Methode (FEM) lassen sich unterschiedliche physikalische Fragestellungen, die auf der Lösung von Differentialgleichungssystemen beruhen, näherungsweise bestimmen. Die Anwendung klassischer analytischer Lösungsverfahren ist für die zumeist komplexen Aufgabenstellungen nicht praktikabel (Smolczyk, 2001a).

Im ersten Abschnitt des Kapitels erfolgt eine kurze Einführung in die FEM. Im Anschluss wird der Modellaufbau der repräsentativen Stauwand erläutert. Anhand der in der Umfrage aus Kapitel 5 erhobenen Messdaten erfolgt eine Validierung des Modells der ungeschädigten Stauwand. Im nächsten Schritt werden die zur Modellierung der jeweiligen Schadensmechanismen gewählten Ansätze erläutert. Darauf aufbauend, werden Talsperrenmessdaten unterschiedlich geschädigter Mauern generiert und die Simulationsergebnisse erörtert. Im letzten Abschnitt des Kapitels wird durch sukzessive Steigerung der Wasserlast eine kritische Überstauhöhe ermittelt, die zu einem Mauerversagen führen würde. Daraus lassen sich Aussagen ableiten, wie gravierend sich der jeweilige Schadensprozess auf die Stabilität der Mauer auswirkt. Diese Rechenergebnisse liefern letztendlich die wesentlichen Eingangsdaten für das in Kapitel 7 beschriebene Bayessche Netz.

6.1 Grundlagen

Im Folgenden werden zunächst die Grundlagen der FEM mit Blick auf die Programmanwendung erläutert. Dabei wird kurz auf die in dieser Arbeit Anwendung findenden Temperaturfeldberechnungen, Sickerströmungsberechnungen und strukturmechanischen Berechnungen eingegangen. Bezüglich tiefergehender Grundlagen wird an dieser Stelle auf die Handbücher des eingesetzten FEM-Programms ANSYS sowie weiterführende Literatur wie beispielsweise Betten (2003), Betten (2004), Knothe und Wessels (1999) und Rust (2011) verwiesen.

6.1.1 Kurzeinführung in die FEM

Die FEM beruht auf dem Grundprinzip, ein zu lösendes komplexes Gesamtgebiet näherungsweise durch ein Ersatzmodell zu beschreiben, das in einzelne kleine berechenbare Teilbereiche, die sogenannten Elemente, untergliedert (diskretisiert) ist. Die Elemente weisen endliche (finite) Abmessungen auf und sind über Knoten miteinander verbunden. Die an diesen Kopplungspunkten gesuchten physikalischen Größen, Freiheitsgrade genannt, hängen von der Aufgabenstellung ab. Es handelt sich dabei beispielsweise um Temperaturen, Porenwasserdrücke oder Verschiebungen (Dankert, 2014).

Nach Betten (2003) ist der nächste Schritt, Näherungsansätze für die unbekanntes Größen eines Elementes aufzustellen. In der Regel werden lineare Ansatzfunktionen verwendet. Je nach Problemstellung werden aber auch Polynome höherer Grade eingesetzt. Dabei muss das Gleichgewicht und die Kompatibilität an den Elementübergängen erfüllt sein, so dass sich die Lösung für das Gesamtgebiet aus den Näherungsansätzen der Teilgebiete zusammensetzen lässt (Groth und Müller, 2009).

Im Anschluss erfolgt die Herleitung der einzelnen Element-Steifigkeitsmatrizen. Für die Formulierung der Elementeigenschaften sind dabei unterschiedliche Methoden, wie beispielsweise das Prinzip der virtuellen Arbeit, das Ritz-Verfahren oder das Galerkinverfahren, anwendbar (Betten, 2003).

Die einzelnen Elementmatrizen werden nach vorangegangener Transformation in globale Koordinaten additiv zu einer quadratischen Gesamtsteifigkeitsmatrix überlagert. Die Summe der Freiheitsgrade aller Knoten liefert die Dimension der Gesamtsteifigkeitsmatrix (Merkel und Öchsner, 2015). Diese Matrix stellt somit den Zusammenhang zwischen den unbekanntem Zustandsgrößen aller Knoten und der Belastung auf das ganze System her.

Nach Merkel und Öchsner (2015) ist die Struktur der Gesamtsteifigkeitsbeziehung für den allgemeinen Fall folgende:

$$[K] \cdot \{u\} = \{F\} \quad (6.1)$$

mit:

$[K]$	Gesamtsteifigkeitsmatrix, die die Geometrie- und Materialdaten beinhaltet
$\{u\}$	Vektor mit unbekanntem Funktionswerten bzw. Dirichlet-Randbedingungen
$\{F\}$	Lastvektor, der die Neumann-Randbedingungen beinhaltet

Dieses lineare Gleichungssystem wird unter Anwendung von mathematischen Algorithmen nach den gesuchten Knotengrößen aufgelöst. Je nach FEM-Programm kommen dabei direkte oder iterative Gleichungslöser zur Anwendung.

Zuletzt lassen sich die Reaktionskräfte an den Auflagerstellen und sukzessive für jedes Element die abgeleiteten Größen, wie beispielsweise Spannungen oder Sickergeschwindigkeiten, ermitteln.

6.1.2 Simulationssoftware

Zur computergestützten FEM der idealisierten Gewichtsstaumauer wird die Simulationssoftware ANSYS angewendet. Darüber hinaus wird das Softwarepaket multiPlas der Firma Dynardo GmbH eingesetzt, das eine Vielzahl von Materialmodellen bereitstellt.

ANSYS

Für die Anwendung der FEM steht eine große Vielzahl von Softwareprogrammen zur Verfügung, siehe Müller und Groth (2007). Diese sind in der Regel auf ein bestimmtes Anwendungsgebiet mit zugehörigen Typen von Differentialgleichungen ausgelegt. Sogenannte General-Purpose-Programme stellen dagegen mehrere unterschiedliche Elementtypen für verschiedene physikalische Fragestellungen zur Verfügung. In dieser Arbeit wurde das weit verbreitete kommerzielle Berechnungsprogramm ANSYS (Version 14.0) eingesetzt. Dieses bietet den Vorteil, dass sich sowohl die Temperaturfeldberechnungen, als auch die Sickerströmungsberechnungen und strukturmechanische Berechnungen der Gewichtsstaumauern mit demselben Rechenprogramm lösen lassen und sich dadurch eine Kopplung der verschiedensten Rechenschritte relativ einfach realisieren lässt. Für die Eingabe der Benutzerbefehle wird im klassischen ANSYS die Skriptsprache APDL (ANSYS Parametric Design Language) verwendet (ANSYS, 2011).

multiPlas

Das Softwarepaket multiPlas ergänzt das Simulationsprogramm ANSYS. Es ermöglicht die realitätsnahe Beschreibung verschiedener Materialien im Bereich der Geotechnik oder des Bauwesens, insbesondere im nichtlinearen Verformungsbereich. Darüber hinaus liefert es Optionen zur Darstellung verschiedener Versagensmechanismen (Schlegel, 2006).

Durch die Fließbedingungen nach Mohr-Coulomb mit Zugspannungsbegrenzung und Restfestigkeiten lässt sich beispielsweise das elasto-plastische Materialverhalten des Talsperrenuntergrundes beschreiben. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, das anisotrope Verformungsverhalten von zerklüftetem Fels durch die Vorgabe der räumlichen Orientierung von Klüften mittels Streichrichtung und Fallwinkel und der zugehörigen Materialparameter der jeweiligen Klüfte zu berücksichtigen (Will, 1999).

Für die Beschreibung der Betonfestigkeit sowohl im Druckbereich, im Zug-Druckbereich und im Zugbereich eignen sich die Fließbedingungen nach Drucker-Prager. Eine ausführliche Beschreibung des Materialmodells sowie dessen Verifikation anhand von Versuchsergebnissen finden sich in Schlegel (2005).

Die numerische Umsetzung der Materialmodelle ist ausführlich in Schlegel (2004) beschrieben, deren Anwendung wird in Schlegel und Will (2009) und Schlegel (2011) erläutert.

6.1.3 Ablauf bei der Anwendung der FEM

Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 6.1.1 beschreibenden Grundlagen kann die praktische Anwendung der FEM mit Hilfe der Simulationssoftware ANSYS nach Steinke (2015), Müller und Groth (2007) und Fahland (2004) in nachfolgende Schritte untergliedert werden. Während das Pre- und Postprocessing Eingaben durch den Programmanwender erfordern, erfolgt das Processing weitestgehend automatisiert.

Modellerstellung (Preprocessing)

- Approximation der Bauwerksstruktur und Festlegung der Tragwerksgeometrie
- Festlegung der Materialgesetze und der zugehörigen Materialparameter
- Auswahl des Elementtyps (Form, Knotenanzahl, Ansatzfunktion)
- Zerlegung der Gesamtstruktur in einzelne Elemente durch Generierung eines Netzes
- Vorgabe der Randbedingungen und Lasten
- Definition von Anfangsbedingungen (bei transienter Analyse)

Lösungsprozess (Processing)

- Bildung der Steifigkeitsmatrizen der einzelnen Elemente
- Additive Überlagerung der Elementsteifigkeitsmatrizen zu einer Gesamtsteifigkeitsmatrix
- Lösung des Gleichungssystems
- Approximation kontinuierlicher Ergebnisgrößen mittels der Ansatzfunktionen
- Bestimmung abgeleiteter Größen (z.B. Spannungen, Sickergeschwindigkeiten) und Auflagerreaktionen

Auswertung der Ergebnisse (Postprocessing)

- Darstellung der direkten und abgeleiteten Größen
- Interpretation der Ergebnisse
- Auslesen relevanter Größen

6.1.4 Temperaturfeldberechnung

Die Temperaturfeldberechnung behandelt das physikalische Wärmeübertragungsproblem und lässt sich durch die Fourier'sche Gleichung beschreiben (Steinke, 2015). In der Regel ist die materialspezifische Wärmeleitfähigkeit λ unabhängig von den Raumrichtungen und bei moderater Temperaturvariation auch temperaturunabhängig. Für den stationären Fall gilt:

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \Phi = 0 \quad (6.2)$$

mit:

λ	Wärmeleitfähigkeit
T	Temperatur
x, y, z	Raumrichtungen
Φ	Wärmequellendichte

In dieser Arbeit wird für die Temperaturfeldberechnungen die Vereinfachung getroffen, dass die Temperatur der Maueroberfläche sowie der Geländeoberfläche der dort vorherrschenden Umgebungstemperatur entspricht. Darüber hinaus bewegt sich der Wärmestrom senkrecht zur Oberfläche. Wärmeübertragungseffekte wie Wärmestrahlung, Verdunstung und Konvektion bleiben unberücksichtigt.

Für die finite Wärmeberechnung im stationären Fall gilt analog zur Matrixschreibweise aus Gleichung 6.1 folgende Systemgleichung. Die Knotentemperaturen stellen dabei die Freiheitsgrade dar.

$$[K] \cdot \{T\} = -\{Q\} \quad (6.3)$$

mit:

$[K]$	Wärmeleitmatrix, die die Geometrie- und Materialdaten beinhaltet (Wärmeleitfähigkeit λ)
$\{T\}$	Temperaturvektor
$\{Q\}$	Lastvektor der äußeren Wärmez-, und -abfuhr

Die stationäre Berechnung liefert ein Temperaturfeld, das sich bei dauerhaft gleichbleibenden Randbedingungen einstellt.

Bei Gewichtsstauwänden handelt es sich um sehr dickwandige Bauwerke. Im Vergleich zur Temperaturverteilung im Bauwerk ändert sich die Umgebungstemperatur wesentlich schneller. Daher ist deren Strukturverhalten in Abhängigkeit der Zeit zu analysieren. Bei einer instationären Berechnung wird die Gleichung 6.3 durch einen transienten Anteil ergänzt. Dieser beinhaltet die Wärmekapazitätsmatrix $[C]$, um den Effekt der materialspezifischen Wärmespeicherung berücksichtigen zu können.

$$[K] \cdot \{T\} + [C] \cdot \{\dot{T}\} = -\{Q(t)\} \quad (6.4)$$

mit:

$[C]$	Wärmekapazitätsmatrix, die die Material und Geometriedaten beinhaltet (Wärmekapazität C)
$\{\dot{T}\}$	Vektor der Temperaturänderung
$\{Q(t)\}$	zeitabhängiger Lastvektor der äußeren Wärmezu- und -abfuhr

Für die instationäre Berechnung wird der Betrachtungszeitraum in einzelne Zeitschritte unterteilt und es erfolgt für jeden Zeitschritt eine separate Berechnung des Gleichungssystems. Für den ersten Zeitschritt ist es erforderlich, als Anfangsbedingung die initiale Temperaturverteilung im Bauwerk vorzugeben. Im Idealfall können hierfür Temperaturmessdaten herangezogen werden. Andernfalls sind sinnvolle Annahmen zu treffen. Die Rechenergebnisse der ersten Zeitschritte sind demnach mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. Als Randbedingung für die instationäre Berechnung werden die einwirkenden Temperaturen als Funktion der Zeit definiert. Im Postprocessing lassen sich dann die berechneten Größen für jeden einzelnen Zeitschritt auswerten.

6.1.5 Sickerströmungsberechnung

Die Berechnung der stationären Grundwasserströmung in einem wassergesättigten homogenen und isotropen Boden stützt sich auf die Laplace-Gleichung, welche sich durch Einsetzen der Darcy-Gleichung in die Kontinuitätsgleichung ergibt (BAW, 2011a). Unter Berücksichtigung der Quellenergiebigkeit q lässt sich die Laplace-Gleichung wie folgt erweitern:

$$k \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) + q = 0 \quad (6.5)$$

mit:

k	Durchlässigkeitsbeiwert
h	Grundwasserpotential (Standrohrspiegelhöhe)
x, y, z	Raumrichtungen
q	Quellenergiebigkeit

Sowohl bei der Temperaturfeldberechnung als auch bei der Sickerströmungsberechnung handelt es sich um ein Feldproblem, das auf der Poisson'schen Gleichung beruht. Dies erklärt die analoge Schreibweise der beiden Gleichungen 6.2 und 6.5.

Die Differentialgleichung 6.5 lässt sich in Matrixschreibweise in folgender Form darstellen:

$$[K] \cdot \{h\} = \{Q\} \quad (6.6)$$

mit:

$[K]$	Durchlässigkeitsmatrix, die die Geometrie- und Materialdaten beinhaltet (Durchlässigkeitsbeiwerte k)
$\{h\}$	Vektor der Standrohrspiegelhöhen
$\{Q\}$	Vektor mit Quellen und Senken

Als Randbedingung werden an den Modellrändern der Wasserstand im Stausee bzw. der Grundwasserstand im Unterwasserbereich vorgegeben. An den entlang der Mauerdrainagen angeordneten Knoten wird als Randbedingung für die Sickerströmungsberechnung der Atmosphärendruck vorgegeben. Die Sohl-drainagen sind bis zur Oberkante wassergefüllt. Hier wird als Standrohrspiegelhöhe der Knoten die geodätische Lage der Kontrollgangsohle festgelegt. Durch Gleichung 6.6 lassen sich die Potentiallinien im Modellgebiet ermitteln. Nach Smolczyk (2001a) gelten dabei folgende vereinfachende Annahmen:

- Die Medien (Wasser und Festschubstanz) sind inkompressibel, so dass die Materialeigenschaften und die Geometrie konstant bleiben.
- Die Kapilar- und Oberflächenkräfte sowie die Dampfdiffusion bleiben unberücksichtigt.
- Das Medium wird laminar durchströmt, so dass das Darcy-Gesetz gilt.

In ANSYS wird die Sickerströmungsberechnung und die Temperaturfeldberechnung mit demselben Elementtyp durchgeführt, da, wie aus den vorherigen Abschnitten ersichtlich wird, den Berechnungen gleich gegliederte Differentialgleichungen zugrunde liegen. Diese Herangehensweise ist nur für den Sonderfall gültig, wenn der vernetzte Modellbereich vollständig wassergesättigt ist.

Die Durchströmung der Staumauer erfolgt gemäß dem Potentialgefälle von der Wasserseite in Richtung Luftseite unter Einwirkung der Schwerkraft. Dabei bildet sich im Mauerinneren in Abhängigkeit der Durchlässigkeitsbeiwerte der Materialien, sowie der Lage von freien Oberflächen von Kontrollgängen und Drainagen, eine Sickerlinie aus. Lediglich im vollgesättigten Bereich unterhalb der Sickerlinie findet eine laminare Durchströmung gemäß dem Darcy-Gesetz statt. Für eine realitätsnahe Sickerströmungsberechnung in der Mauer, ist daher mittels ADPL, eine iterative Ermittlung der Sickerlinie gemäß dem Flussdiagramm in Abb. 6.1 in den Simulationsablauf zu integrieren.

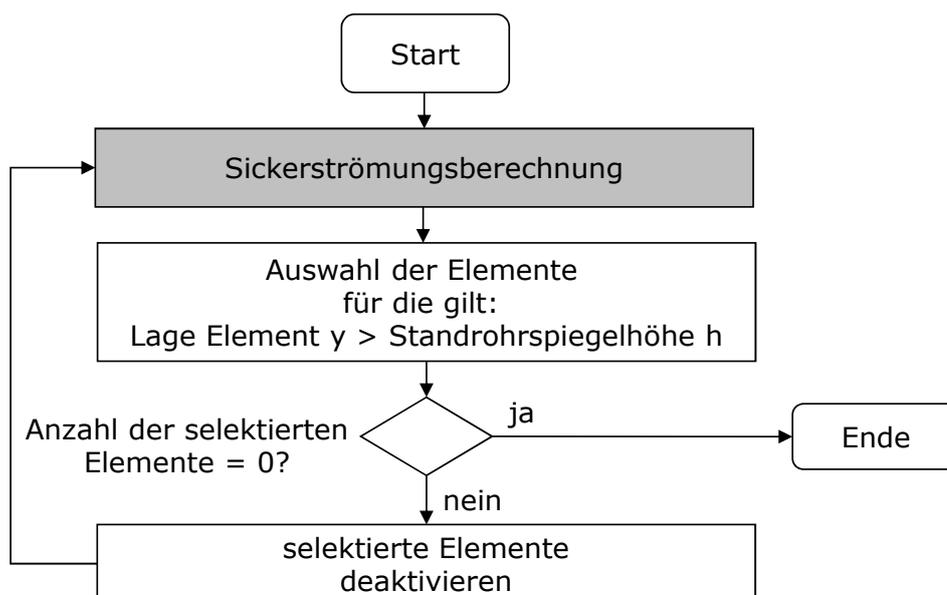


Abb. 6.1: Flussdiagramm zur Durchführung einer Sickerströmungsberechnung unter Berücksichtigung der Sickerlinie

Für die Knoten auf der Sickerlinie gilt, dass der Porenwasserdruck dem atmosphärischen Luftdruck entspricht BAW (2011a). Alle Elemente, deren Knoten eine größere geodätischen Höhe y als die dort befindliche Standrohrspiegelhöhe h aufweisen, liegen oberhalb der Sickerlinie und werden folglich selektiert und deaktiviert, um das Modellgebiet auf den durchströmten Bereich der Mauer zu begrenzen. Die Sickerströmungsberechnung wird daraufhin mit der aktualisierten Modellgeometrie wiederholt. Sofern das Berechnungsergebnis wieder Elemente mit Knoten liefert, für die $y > h$ gilt, erfolgt eine weitere Iterationsschleife. Am Ende der Iteration entspricht die Lage des neuen Modellrandes der Lage der Sickerlinie.

Als Ausgabedaten der Sickerströmungsberechnung liegen für den gesättigten Mauerbereich Potentialhöhen h und Strömungsgradienten I vor. Aus diesen Größen lassen sich nach Wittke (1984) für jedes Element die entgegen der Schwerkraft in y -Richtung wirkenden Auftriebskräfte A (vgl. Abb. 6.3) und in Fließrichtung orientierten Strömungskräfte S herleiten.

$$\{A\} = V \cdot \gamma_w \cdot \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (6.7)$$

mit:
 $\{A\}$ Auftriebskraft
 V Volumen des Elements
 γ_w Wichte des Wassers

$$\{S\} = V \cdot \gamma_w \cdot \{I\} \quad (6.8)$$

mit:
 $\{S\}$ Strömungskraft
 $\{I\}$ hydraulischer Gradient

Diese Kräfte bilden, gleichmäßig auf die in der Regel acht Knoten des jeweiligen Volumenelementes verteilt, die Einwirkungen für die im folgenden Abschnitt 6.1.6 beschriebene strukturmechanische Berechnung.

6.1.6 Strukturmechanische Berechnung

Die strukturmechanischen Berechnungen beruhen auf Differentialgleichungen, die die gesuchte Tragwerksverformung infolge von äußeren Einwirkungen (Kräfte, Temperaturen) unter Berücksichtigung der Materialeigenschaften und Geometrien beschreibt. Bekanntes Beispiel ist die Differentialgleichung der Biegelinie eines Balkens in Folge einer Streckenlast $q(x)$ (Merkel und Öchsner, 2015):

$$EI \frac{\partial^4 u(x)}{\partial x^4} = q(x) \quad (6.9)$$

mit:
 E Elastizitätsmodul
 I Flächenträgheitsmoment
 $u(x)$ Biegelinie (Verschiebung in Balkenquerrichtung)
 $q(x)$ Streckenlast
 x Längsrichtung des Balkens

Zwar handelt es sich bei Talsperren um massive dickwandige Bauwerke, die nicht mit Balkenelementen sondern mit Volumenelementen diskretisiert werden, doch lässt sich durch dieses Beispiel gut die Analogie zu der bei der FEM gebräuchlichen Matrixschreibweise erkennen:

$$[K] \cdot \{u\} = \{F\} \quad (6.10)$$

mit:

$[K]$	Gesamtsteifigkeitsmatrix, die die Geometrie- und Materialdaten beinhaltet
$\{u\}$	Verschiebungsvektor (Verschiebungen und Auflagerbedingungen)
$\{F\}$	Lastvektor (Kräfte)

Die Gesamtsteifigkeitsmatrix $[K]$ setzt sich aus Koeffizienten zusammen, die sich aus den Materialkennwerten (wie z. B. Elastizitätsmodul E , Poissonzahl ν) und den Geometriedaten (Querschnittsflächen A , Flächenträgheitsmomente I , etc.) ergeben. Der Verschiebungsvektor $\{u\}$ beinhaltet zum einen die als geometrische Randbedingungen definierten Verschiebungen und Einspannungen, zum anderen die gesuchten unbekanntenen Knotenverschiebungen. Im Lastvektor $\{F\}$ sind die an den Knoten wirkenden Kräfte zusammengefasst, die sich aus Addition der Einzelkräfte und anteilig wirkenden Linien-, Flächen-, und Volumenlasten berechnen (DVWK, 1996).

Nichtlineare Berechnungen

Bei nichtlinearem Materialverhalten oder der Berücksichtigung großer Deformationen liegt ein Gleichungssystem vor, welches iterativ zu lösen ist, da die Gesamtsteifigkeitsmatrix $K(u)$ nun vom Deformationszustand abhängig ist. Dabei wird der Vorgang programmgesteuert in kleine lineare Schritte unterteilt, für die jeweils eine tangentielle Steifigkeitsmatrix aufgestellt wird. Zur Lösung der nichtlinearen Problemstellung wird in dieser Arbeit das Newton-Raphson-Verfahren herangezogen (Schlegel, 2011). Dabei wird das Ziel verfolgt, die Differenz zwischen den äußeren und inneren Kräften, also die Ungleichgewichtskräfte, möglichst klein werden zu lassen. Durch die Vorgabe eines Konvergenzkriteriums wird definiert, wann die Iteration gestoppt wird und die nichtlineare Gleichung als gelöst gilt. Wird das Abbruchkriterium innerhalb einer definierten maximalen Anzahl von Iterationsschritten nicht erreicht, kann keine Lösung erzielt werden. Dies bedeutet, dass entweder das zugrunde liegende Modell bzw. die gewählten Steuerparameter Unzulänglichkeiten aufweisen oder die aufgebrachten Einwirkungen zu einer Überbeanspruchung des Tragwerks führen.

6.1.7 Kopplung der Sickerströmungsberechnung und der strukturmechanischen Berechnung zur Berücksichtigung der klaffenden Fuge

Die Vorgehensweise, zuerst die Einwirkungen zu ermitteln und anschließend daraus mittels strukturmechanischer Berechnung direkt die Bauwerksreaktion abzuleiten, ist nur möglich, wenn die Einwirkungen von der Bauwerksreaktion unbeeinflusst sind. Im Falle einer Materialüberbeanspruchung mit einhergehender Rissbildung trifft dies nicht zu. Der gerissene Beton bzw. Felsuntergrund weist eine deutlich erhöhte Systemdurchlässigkeit auf, so dass sich die Beanspruchung infolge der Auftriebs- und Strömungskräfte ändert. Der in den Rissen wirkende statische Wasserdruck begünstigt zudem eine weitere Zunahme der Rissbildung. Nach DIN

19700-11 (2004) ist dieser Mechanismus in den Standsicherheitsberechnungen von Talsperren zu berücksichtigen und wird als „klaffende Fuge“ bezeichnet.

Um die Rissentwicklung in der Simulation abzubilden, kommen grundsätzlich diskrete Rissmodelle oder verschmierte Rissmodelle in Frage (Könke u. a., 2002). Bei der diskreten Rissimulation stellt der Riss im Modell ein geometrisches Objekt dar. Dies lässt sich mit unterschiedlichen Verfahren realisieren. Relativ aufwändig ist die Vorgehensweise, bei fortschreitender Rissentwicklung die Modellgeometrie und das Berechnungsnetz kontinuierlich anzupassen. Andere Verfahren, wie die Extended Finite Element Method (X-FEM), nutzen zusätzliche Ansatzfunktionen, um die Diskontinuitäten im Verschiebungsfeld zu beschreiben und um somit eine adaptive Vernetzung umgehen zu können, siehe z. B. Jox (2009). Alternativ dazu existieren die sogenannten netzfreien Methoden. Die Struktur bzw. der Wasserkörper werden dabei nicht durch Elemente, sondern durch einzelne Partikel abgebildet, die jeweils über Kontaktkräfte zueinander in Verbindung stehen, sich aber im Raum frei bewegen können (vgl. Zöllner (2009)).

In dieser Arbeit wird aufgrund der einfacheren Handhabung dem verschmierten Rissmodell der Vorzug gegeben. Dabei wird den Elementen, deren zugehörige Materialfestigkeit infolge der äußeren Belastung überschritten wurde, eine geänderte Materialeigenschaften zugewiesen. Eine exakte Ermittlung der Rissgeometrie ist mit dieser Methode aufgrund der vorgegebenen Vernetzung zwar nicht möglich, die großräumigen Effekte der Rissbildung auf die Durchlässigkeit und Materialfestigkeit werden aber gut abgebildet.

Die mittels APDL implementierte Simulationsroutine zur Berücksichtigung der klaffenden Fuge im numerischen Modell ist in Abb. 6.2 dargestellt. Es wird die Sickerströmungsberechnung nach Abschnitt 6.1.5 mit der strukturmechanischen Berechnung aus Abschnitt 6.1.6 über eine Schleife gekoppelt. Führen die Auftriebs- und Strömungskräfte zu einer Zugbeanspruchung mit einhergehender plastischer Deformation, so wird bei Überschreitung der in Tab. 6.1 festgelegten Schwellenwerte für die plastische Dehnung ε_{pl_krit} die Materialdurchlässigkeit der betroffenen Bereiche der Mauer und des Untergrundes angepasst. Anschließend beginnt der Simulationslauf von vorne, um die geänderten hydraulischen Randbedingungen in der Strukturberechnung zu berücksichtigen. Die Simulationsschleife endet, sobald die plastische Deformation nicht mehr weiter zunimmt.

Tab. 6.1: Kriterien zur Anpassung der Materialdurchlässigkeit des FE-Modells beim Auftreten einer klaffenden Fuge

Materialbereich	Parameter	Kriterium 1	Kriterium 2	Kriterium 3
Sperrbeton Nr. 1-3, 11-13 nach Abb. 4.4	ε_{pl_krit}	0,0004	0,0025	$\varepsilon_{pl} \geq$ 0,0075
		$\leq \varepsilon_{pl} <$ 0,0025	$\leq \varepsilon_{pl} <$ 0,0075	
	Riss- / Kluftgeometrie nach Abb. 4.8	$2a_i = 0,1 \text{ mm},$ $d = 10 \text{ cm}$	$2a_i = 0,5 \text{ mm},$ $d = 10 \text{ cm}$	$2a_i = 1,0 \text{ mm},$ $d = 10 \text{ cm}$
	k_T nach Gl. 4.4	$6,3 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$	$7,9 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	$6,3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$

Materialbereich	Parameter	Kriterium 1	Kriterium 2	Kriterium 3
Felsuntergrund Nr. 4, 5, 9, 10 nach Abb. 4.4	ε_{pl_krit} Riss- / Kluftgeometrie nach Abb. 4.8 k_T nach Gl. 4.4	0,0004 $\leq \varepsilon_{pl} <$ 0,0025 $2a_i = 0,1 \text{ mm},$ $d = 10 \text{ cm}$ $1,1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$	0,0025 $\leq \varepsilon_{pl} <$ 0,0075 $2a_i = 0,5 \text{ mm},$ $d = 10 \text{ cm}$ $7,9 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	$\varepsilon_{pl} \geq$ 0,0075 $2a_i = 1,0 \text{ mm},$ $d = 10 \text{ cm}$ $6,3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$
Felsuntergrund Nr. 6-8 nach Abb. 4.4	ε_{pl_krit} Riss- / Kluftgeometrie nach Abb. 4.8 k_T nach Gl. 4.4	0,0004 $\leq \varepsilon_{pl} <$ 0,0025 $2a_i = 0,1 \text{ mm},$ $d = 10 \text{ cm}$ $6,8 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$	0,0025 $\leq \varepsilon_{pl} <$ 0,0075 $2a_i = 0,5 \text{ mm},$ $d = 10 \text{ cm}$ $7,9 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	$\varepsilon_{pl} \geq$ 0,0075 $2a_i = 1,0 \text{ mm},$ $d = 10 \text{ cm}$ $6,3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$

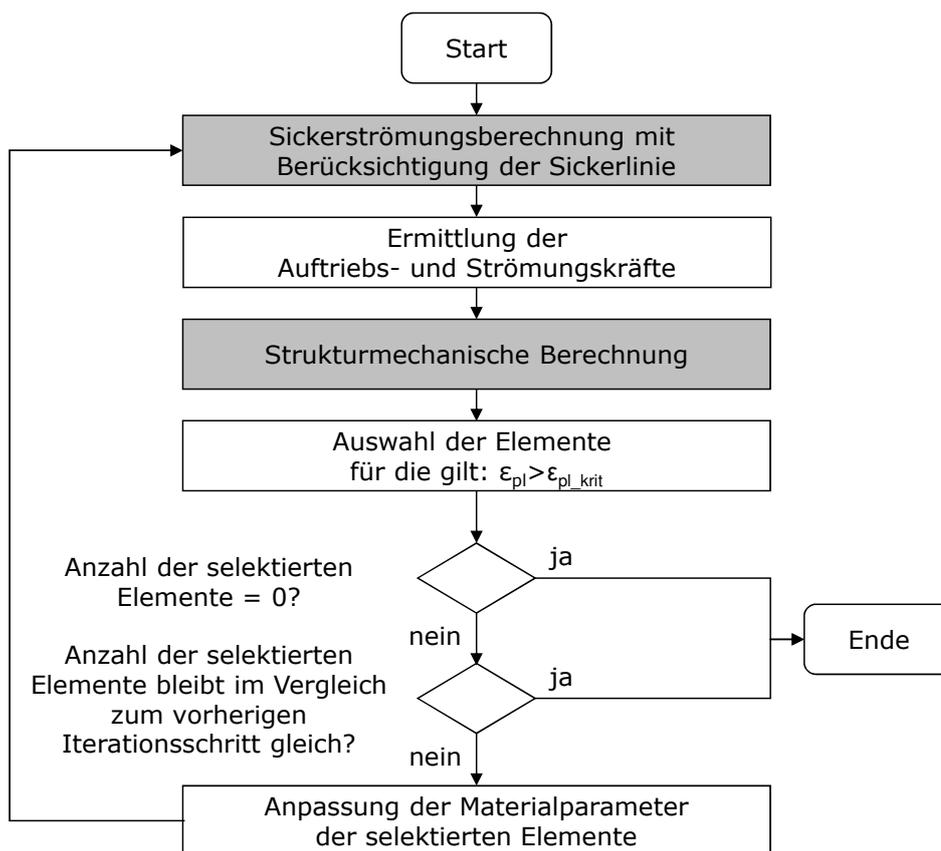


Abb. 6.2: Flussdiagramm zur Durchführung einer gekoppelten Sickerströmungsberechnung und strukturmechanischen Berechnung zur Berücksichtigung der klaffenden Fuge

6.2 Modellaufbau

Nachdem in Abschnitt 6.1 die Grundzüge der für die Simulation einer Gewichtsstaumauer relevanten Temperaturfeldbechnung, Sickerströmungsberechnung und strukturmechanische Berechnung vorgestellt wurden, wird im Folgenden der Aufbau des FE-Modells der idealisierten Gewichtsstaumauer dargelegt. So wird die Modellgeometrie und die gewählte Diskretisierung erläutert, die auf die Mauer wirkenden Wasser- und Temperaturlasten beschrieben und auf die Implementierung der Messeinrichtungen im Modell eingegangen.

6.2.1 Geometrie des Rechenmodells

Die Berechnungen erfolgen mit einem FE-Modell, das die Mauer gemeinsam mit dem Untergrund abgebildet. Der entsprechende Berechnungsausschnitt lässt sich Abb. 6.3 entnehmen. Die Abmessungen der Mauer einschließlich der zugehörigen Mauerkomponenten und Lage der Messeinrichtungen entspricht dem bereits in Abb. 4.3 dargestellten Querschnitt des idealisierten Referenzbauwerks.

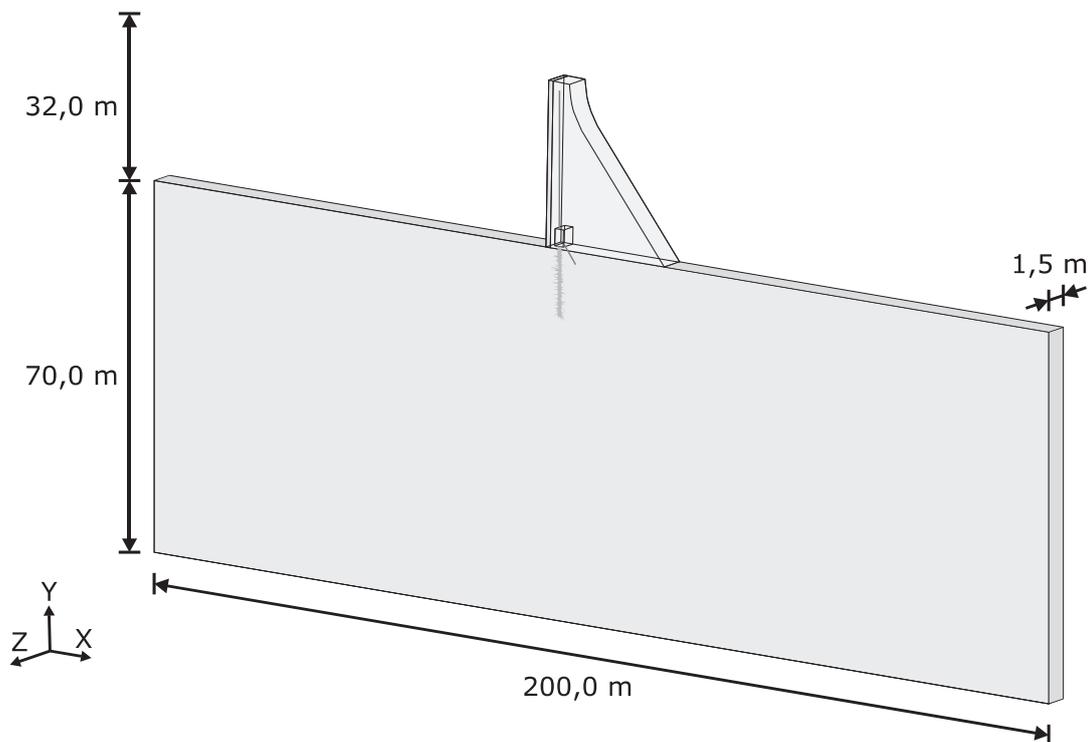


Abb. 6.3: Abmessungen des Berechnungsmodells

Wie aus Abb. 6.3 hervorgeht, handelt es sich um einen Mauerquerschnitt mit räumlicher Tiefe und somit um ein sogenanntes 2,5-D Modell. Da gemäß Abschnitt 4.3 für die idealisierte Mauer ein Drainagenabstand in Mauerlängsrichtung von 3 m zugrunde gelegt wird, beträgt unter Ausnutzung der Achsensymmetrie die Modelltiefe in z-Richtung 1,5 m.

Die Abmessung des Felsuntergrundes wird so festgelegt, dass die an den Modellrändern festgelegten Randbedingungen die Ergebnisse im Umfeld der Mauer, nicht beeinflussen. Entsprechende Vergleichsrechnungen zeigen, dass eine Untergrundtiefe von 70 m und eine Länge von 200 m dafür ausreichend sind.

6.2.2 Diskretisierung des Rechenmodells

Hinsichtlich des mit zunehmender Anzahl der Elemente steigenden Zeitbedarfs der Rechenläufe gilt es, bei der Wahl der Netzauflösung einen Kompromiss zu finden. Einerseits ist eine möglichst genaue Auflösung der Mauer- und Untergrundgeometrie sowie der Rechenergebnisse zu gewährleisten, andererseits sollte sich der Zeitaufwand für die hohe Anzahl der benötigten Simulationsläufe in Grenzen halten.

Um eine geeignete Netzauflösung festlegen zu können, werden zu Beginn vier Testläufe mit dem im Abschnitt 6.6 näher beschriebenen Simulationsablauf durchgeführt. Dabei wird die Anzahl der Elemente zwischen 1.000 und 27.000 variiert. Die Referenzsimulationen zeigen, dass ein nahezu exakter linearer Zusammenhang zwischen der Anzahl der Elemente und der erforderlichen Rechenzeit besteht ($R^2 = 0,999$). Des Weiteren ist jedoch eine gewisse Abhängigkeit zwischen der Netzauflösung und der berechneten kritischen Versagenshöhe der Mauer feststellbar. Um die jeweiligen Rechenergebnisse untereinander vergleichen zu können, ist daher für sämtliche Rechenläufe der zu simulierenden Schadensmechanismen das gleiche Netz zu verwenden.

Die Referenzsimulationen ergeben, dass das in Abb. 6.4 dargestellte FE-Netz eine, für die in dieser Arbeit zu untersuchenden Fragestellungen, ideale Diskretisierungsweite aufweist. Dabei werden für die Mauer und den Nahbereich im Untergrund des Absperrbauwerks kleinere Elemente gewählt. Zum Modellrand hin wird das Elemente-Netz zunehmend gröber, da hier wesentlich geringere Verformungen auftreten und eine gleichmäßige Spannungsverteilung vorliegt. Das FE-Modell besteht insgesamt aus 10.500 quaderförmigen Elementen, die jeweils 8 Knoten aufweisen. Wie der Detailausschnitt des Kontrollgangs in Abb. 6.4 oben rechts verdeutlicht, ist das Modell in z-Richtung aus drei Schichten zusammengesetzt.

6.2.3 Bewirtschaftung und Temperatureinwirkung der idealisierten Sperre

Der Wasserdruck und die Temperatureinwirkung sind die maßgebenden, auf eine Talsperre wirkenden Beanspruchungen. Für die numerische Simulation der idealisierten Mauern in Abschnitt 6.3 werden für diese Größen repräsentative Fünfjahresganglinien mit einem Zeitschritt von einem Tag erzeugt. Dieser Zeitraum entspricht auch in etwa der mittleren Länge der in der Betreiberumfrage zur Verfügung gestellten Zeitreihen.

Stauhöhe

Der auf das Absperrbauwerk wirkende Wasserdruck ist direkt von der Bewirtschaftung der Sperre abhängig. Je nach Nutzung der Talsperre unterliegt die Stauhöhe periodischen Tages-, Wochen- oder Jahresschwankungen.

Die in der Betreiberumfrage aus Abschnitt 5 zur Verfügung gestellten Messdaten des Wasserspiegels dienen als Grundlage für die Generierung einer repräsentativen Wasserstandsganglinie. Um die einzelnen Ganglinien einander gegenüberstellen zu können, werden diese vorab entsprechend der jeweiligen Mauerhöhe normiert. Die Lage 0 % befindet sich an der Beckensohle, die Lage 100 % auf Höhe der Mauerkrone.

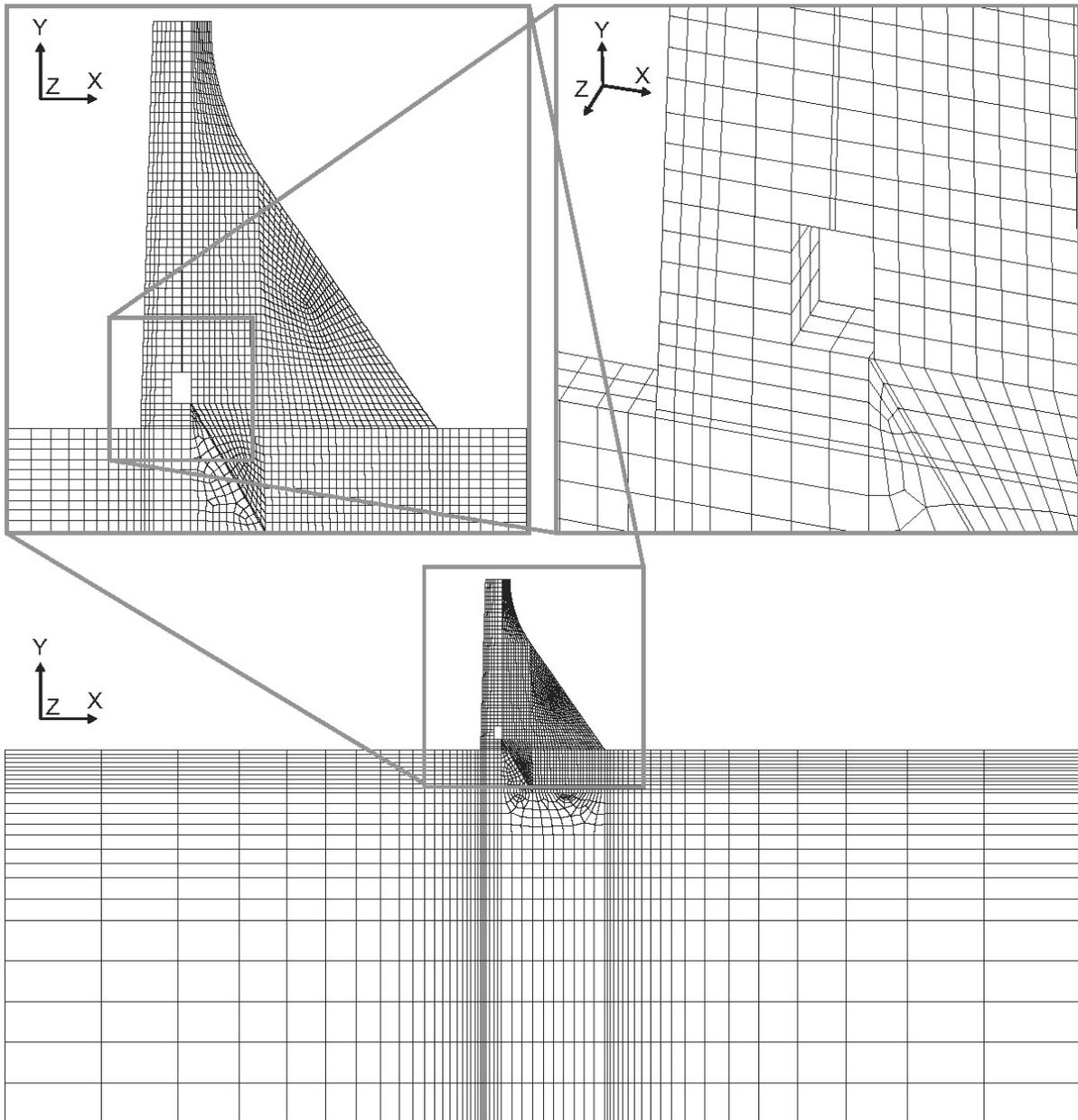


Abb. 6.4: Diskretisierung der Mauer und des Untergrundes

Mittels der im Abschnitt 2.3 erläuterten Zeitreihenanalyse werden in einem ersten Schritt die einzelnen sperrenspezifischen Ganglinien in ihre jeweiligen Komponenten zerlegt und deren zugehörige Parameter ermittelt. Anschließend werden diese gemittelt, um letztendlich eine repräsentative künstliche Zeitreihe generieren zu können.

Die Zeitreihe für die Speicherbewirtschaftung setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

$$Y(t) = Y_{Trend}(t) + Y_{Periode}(t) + Y_{Zufall}(t) \quad \text{mit } t = 1d \text{ bis } 1825d \quad (6.11)$$

Trendkomponente: Die Bewirtschaftung der idealisierten Talsperre bleibt über den Untersuchungszeitraum unverändert. Der normierte Wasserspiegel befindet sich im Mittel auf folgen-

dem Niveau:

$$Y_{Trend}(t) = \bar{Y} = 86\% \text{ bzw. } 27,8m \quad (6.12)$$

Periodische Komponente: Da der überwiegende Teil der Talsperren als Jahresspeicher fungiert, wird für die deterministische zyklische Komponente vereinfachend eine Sinusfunktion mit einer Periode von einem Jahr gewählt und deren Parameter durch Auswertung der aus der Betreiberumfrage stammenden Ganglinien ermittelt:

$$Y_{Periode} = 0,023 \cdot \sin(2\pi/365 \cdot (t - 16,20)) \quad (6.13)$$

Zufallskomponente: Zur Beschreibung der autokorrelierten Zufallskomponente der Wasserspiegelschwankungen werden zunächst unterschiedliche ARMA-Modelle anhand der realen Ganglinien aus der Umfrage ausgewertet (vgl. Abschnitt 2.3.2). Dabei erweist sich folgender AR(2)-Prozess zur Beschreibung der Zufallskomponente als gut geeignet:

$$Y_t = -1,565 \cdot Y_{t-1} + 0,574 \cdot Y_{t-2} + \varepsilon_t \quad (6.14)$$

mit

ε_t T-Location-Scale-verteilttes weißes Rauschen (vgl. Anhang A.2) und den zugehörigen Lageparameter $\mu = 0$; Skalierungsparameter $\sigma = 0,0009$ und Formparameter $\nu = 2,1$

Basierend auf diesen Komponenten wird die in Abb. 6.5 dargestellte 5-jährige Ganglinie für den Wasserstand generiert.

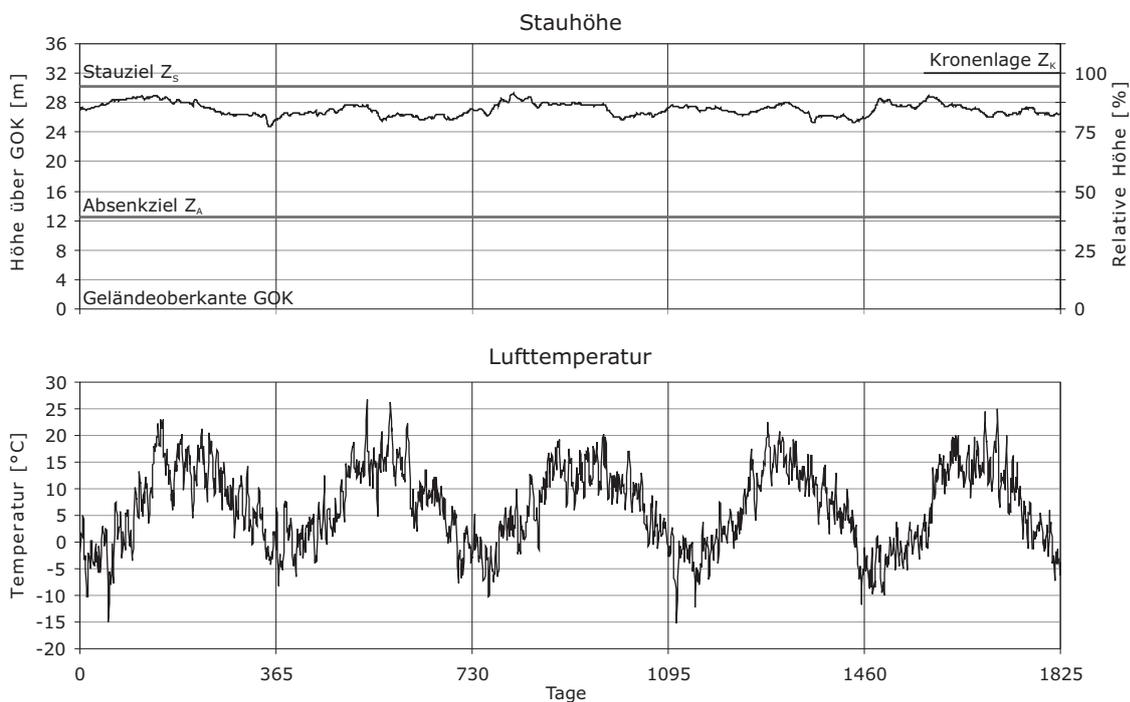


Abb. 6.5: Generierte repräsentative Zeitreihen für die Stauhöhe und die Lufttemperatur

Lufttemperatur

Der Deutsche Wetterdienst bietet zu einigen Wettermessstationen in Deutschland frei verfügbare Daten an (DWD, 2013). Wie bereits in Abschnitt 4.1 erläutert, konzentriert sich die

Lage der Gewichtsstaumauern auf die Mittelgebirge, so dass für die Analyse drei Stationen ausgewählt werden, die sich in der Nähe der Talsperrenstandorte befinden (vgl. Abb. 4.1). Dies sind die Wetterstationen Freudenstadt im Schwarzwald, Kahler Asten im Rothaargebirge und Gera-Leumnitz in Thüringen. Analog zur generierten Wasserstandsganglinie werden die Zeitreihen der drei Wetterstationen statistisch ausgewertet und die jeweiligen Parameter ermittelt. Die Zeitreihe für die Lufttemperatur lässt sich demnach aus folgenden Komponenten konstruieren:

$$Y(t) = Y_{Trend}(t) + Y_{Periode}(t) + Y_{Zufall}(t) \quad \text{mit } t = 1d \text{ bis } 1825d \quad (6.15)$$

Trendkomponente: Eine langfristige zeitabhängige mittlere Temperaturänderung wird auf Grund der kurzen Zeitreihe nicht angesetzt. Es gilt:

$$Y_{Trend}(t) = \bar{Y} = 6,86 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6.16)$$

Periodische Komponente: Die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen lassen sich durch folgende Sinusfunktion beschreiben:

$$Y_{Periode} = -8,72 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \sin(2\pi/365 \cdot (t + 66,37)) \quad (6.17)$$

Zufallskomponente: Die Zufallskomponente der Temperaturganglinien weist eine deutliche Autokorrelation auf, die sich mit folgendem ARMA(2,2)-Prozess gut erfassen lässt:

$$Y_t = 1,438 \cdot Y_{t-1} - 0,494 \cdot Y_{t-2} + \varepsilon_t - 0,486 \cdot \varepsilon_{t-1} - 0,227 \cdot \varepsilon_{t-2} \quad (6.18)$$

mit

ε_t Normalverteiltes weißes Rauschen (vgl. Anhang A.2) mit Erwartungswert $\mu = 0$ und Standardabweichung $\sigma = 2,36^\circ\text{C}$.

Die aus diesen Komponenten generierte Ganglinie für die Lufttemperatur ist in Abb. 6.5 dargestellt. Bei der Finite-Elemente Simulation in Abschnitt 6.3 wird diese Ganglinie als äußere Temperatureinwirkung auf sämtliche oberhalb des Wasserspiegels befindlichen Oberflächen angesetzt. Der Einfluss lokal unterschiedlicher Sonneneinstrahlung bzw. Beschattung wird somit vernachlässigt.

Wassertemperatur

Die Temperaturbeanspruchung der Staumauer resultiert aus der oberhalb des Wasserspiegels herrschenden Lufttemperatur und der tiefenabhängigen Wassertemperatur. Bei Talsperren befindet sich die größte Wassertiefe im Bereich vor dem Absperrbauwerk. Im Gegensatz zum flachen Stauwurzelbereich bildet sich dort in der Regel im Sommer und Winter, wie in Abb. 6.6 ersichtlich, eine vertikale Temperaturschichtung aus. Eine windinduzierte Zirkulation beschränkt sich dann lediglich auf das Epilimnion (Schönborn, 2003). Vor allem im Herbst kommt es zu einer Vollzirkulation, da das auf 4°C abgekühlte Wasser aufgrund seiner Dichte aus dem Epilimnion nach unten sinkt.

Der räumliche und zeitliche Temperaturverlauf im Stauraum wird durch diverse Faktoren beeinflusst. Eine untergeordnete Rolle spielen dabei die ober- und unterirdischen Zu- und

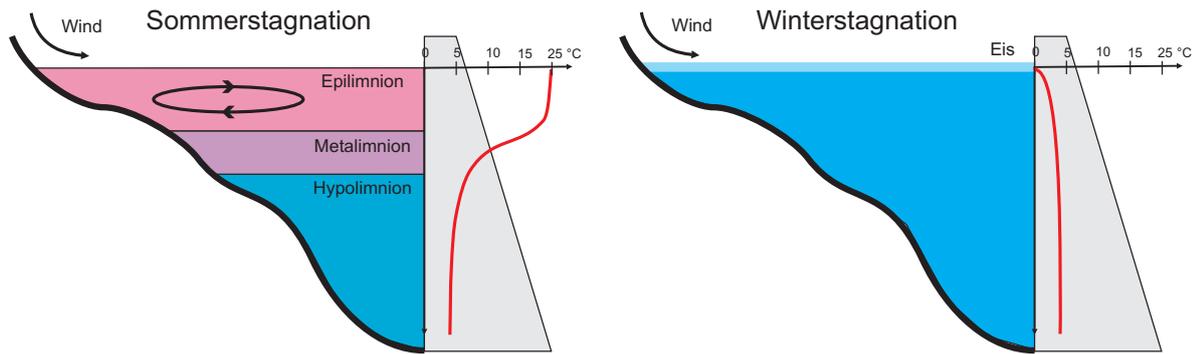


Abb. 6.6: Jahreszeitlich tiefenabhängige Temperaturschichtung in einer Talsperre

Abflüsse sowie die Speicherbewirtschaftung, die Wärmeleitung aus dem Erdinneren und der Niederschlag (Bloss und Grigull, 1974). Dagegen sind für die Bildung der Sprungschicht die Energieströme an der Seeoberfläche, wie die Konvektion, die Wärmestrahlung und die Verdunstung maßgeblich.

Für die in der vorliegenden Arbeit anzusetzende Temperaturbeanspruchung ist lediglich eine grobe Abschätzung der instationären Temperaturverteilung an der Wasserseite der Staumauer erforderlich, so dass folgender stark idealisierter Ansatz Anwendung findet:

- Das Epilimnion besitzt eine konstante Mächtigkeit von 6 m und die Sprungschicht (Metalimnion) von 4 m (vgl. Abb. 6.7),
- die Wasserentnahme und die Zuflüsse erfolgen aus dem untersten Staubereich, dem Hypolimnion. Die Mächtigkeit dieser Schicht variiert somit entsprechend der in Abschnitt 6.2.3 erläuterten Bewirtschaftung der Sperre,
- an der Wasseroberfläche herrscht die Lufttemperatur,
- zwischen 0,5 und 6,0 m unterhalb des Wasserspiegels entspricht die Temperatur dem mittleren Jahresgang der Lufttemperatur (Trendkomponente plus periodische Komponente aus Abschnitt 6.2.3),
- im Hypolimnion beträgt die Temperatur im Mittel konstant 5°C.

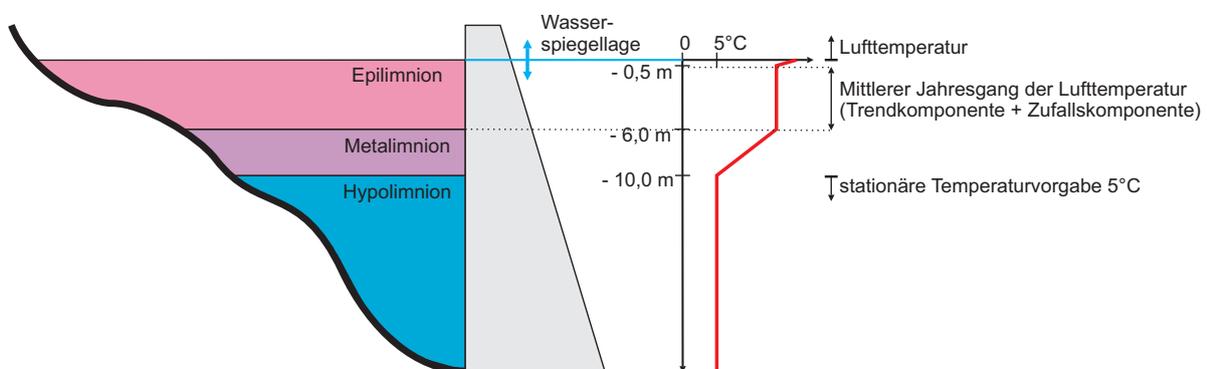


Abb. 6.7: Idealisierter Ansatz zur Festlegung der tiefenabhängigen Wassertemperatur

6.2.4 Implementierung der Messeinrichtungen

Die Ermittlung der künstlich generierten Messwerte der idealisierten Mauer erfolgt durch Auswertung der Ergebnisse der FE-Simulation. Diese Messgrößen werden dabei wie folgt bestimmt.

- Der **Wasserstand** wird als äußere Einwirkung auf das Modell aufgebracht. Diese Größe ist somit direkt verfügbar.
- Die Lage der Messstelle zur Beobachtung der **Mauertemperatur** befindet sich, wie aus Abb. 4.3 hervorgeht, in Kronennähe. Die Temperatur des dort befindlichen Knotens wird aus der Ergebnisdatei der Temperaturfeldberechnung ausgelesen.
- Für den **Gesamtsickerwasserabfluss** Q_{Siwa} der Sperre wird die Annahme getroffen, dass dieser direkt proportional zum anstehenden Wasserdruck ist, der an der idealisiert dreiecksförmigen benetzten wasserseitigen Mauerfläche A_m ansteht. Es seien L die Mauerlänge und h die Wassertiefe in Mauermitte. Somit gilt $A_m = \frac{1}{2} \cdot L \cdot h$. Beim zweidimensionalen FE-Modell handelt es sich um eine in Mauermitte befindlichen Scheibe der Dicke Δa . Der Sickerwasserabfluss q_{2D} im Modell wird durch Aufsummierung der Modellabflüsse der Sickerströmungsberechnung von sämtlichen an der Oberfläche des Kontrollgangs befindlichen Knoten gebildet. Der lokale Sickerwasserzufluss am Fußpunkt der Sperre q_{fp} beträgt aufgrund des dreiecksförmigen Druckverlaufs $q_{fp} = \frac{2}{h} \cdot \frac{q_{2D}}{\Delta a}$. Der Sickerwasserabfluss der gesamten Mauer leitet sich aus der Pyramidenformel ab:

$$Q_{Siwa} = \frac{1}{3} \cdot A_m \cdot q_{fp} = \frac{1}{3} \cdot L \cdot \frac{q_{2D}}{\Delta a} \quad (6.19)$$

- Die **Lotmessung** liefert Informationen über die Mauerdeformation. Folglich werden für die Ermittlung der künstlichen Lotmessdaten die Ergebnisse der Strukturberechnung ausgewertet. Für die Untersuchungen ist die Gewichtslotbewegung in Talrichtung von Interesse. Der gesuchte Messwert errechnet sich aus der Differenz der Lagekoordinaten des Aufhängepunktes in Kronennähe und des Ablesepunktes im Kontrollgang (vgl. Abb. 4.3). Die Messdaten für das Schwimmloch werden analog hergeleitet.
- Der an der Mauersohle wirkende Porenwasserdruck wird durch die Sickerströmungsberechnung bestimmt. Das in Abb. 4.3 dargestellte Referenzbauwerk verfügt über drei **Sohlpiezometer**. Der am unteren Ende der Piezometer befindliche Modellknoten liefert die zugehörige Druckhöhe der jeweiligen Messeinrichtung.

6.3 Validierung des Modells

Bevor das in den vorangegangenen Abschnitten beschriebene FE-Modell zur Simulation von Schadensfällen eingesetzt wird, erfolgt zunächst eine Validierung des Modells. Dabei wird eine instationäre Simulation der ungeschädigten Mauer unter normalen betrieblichen Bedingungen durchgeführt und die Modellergebnisse mit dem Verhalten der realen Mauern aus der Betreiberumfrage von Kapitel 5 verglichen. Dadurch lassen sich Rückschlüsse über die Eignung des FE-Modells ziehen und die Unterschiede zwischen den realen und generierten Messdaten werden deutlich.

6.3.1 Simulationsablauf der instationären Berechnung

Bei der instationären Berechnung werden der Speicherwasserstand und die Umgebungstemperatur der Talsperre berücksichtigt. Dabei wird auf die in Abschnitt 6.2.3 generierten Ganglinien zurückgegriffen. In Abb. 6.8 ist der Simulationsablauf der instationären Berechnung schematisch dargestellt.

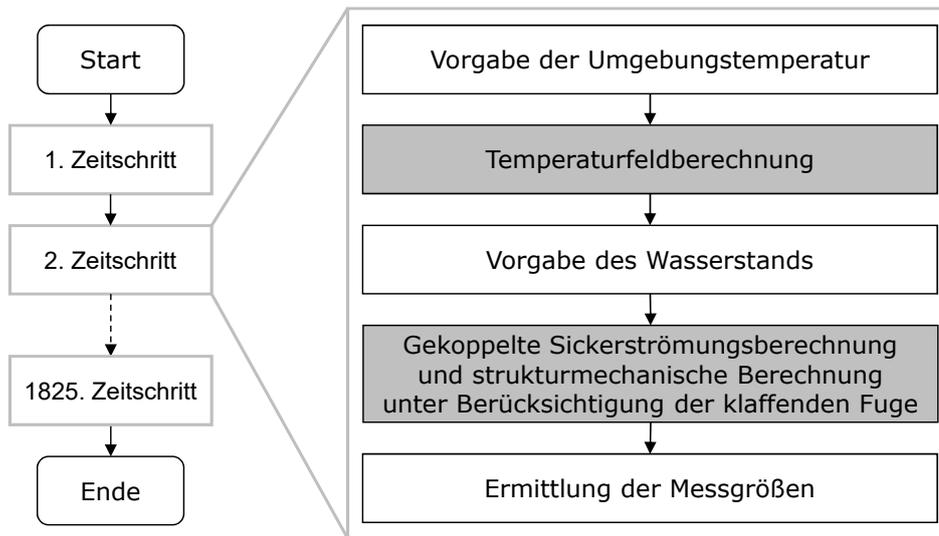


Abb. 6.8: Simulationsablauf der instationären Berechnung der Mauer unter normalen Bedingungen zur Validierung des FE-Modells

Für die Validierung des Modells wird ein Zeitraum von fünf Jahren betrachtet. Dabei beträgt die Zeitschrittlänge einen Tag, so dass insgesamt 1.825 Zeitschritte simuliert werden. Für jeden dieser Zeitschritte wird folgende Simulationsroutine zu Grunde gelegt:

- Zu Beginn eines jeden Zeitschritts wird die jeweils zugehörige Umgebungstemperatur als Randbedingung auf das Modell aufgebracht¹. Daraufhin erfolgt eine Temperaturfeldberechnung.
- Anschließend findet die in Abschnitt 6.1.7 erläuterte gekoppelte Sickerströmungs- und strukturmechanische Berechnung statt. Als Einwirkungen werden dafür die bereits berechnete Temperaturverteilung im Mauerquerschnitt und der für den Zeitschritt geltende Wasserstand angesetzt.
- Abschließend werden die generierten Ergebnisdateien der einzelnen FE-Berechnungen ausgewertet, um, wie bereits in Abschnitt 6.2.4 näher beschrieben, die Messgrößen Wasserstand, Mauertemperatur, Sickerwasserabfluss, Lotbewegung und Piezometerdruck zu ermitteln.

¹Beim ersten Zeitschritt wird zunächst eine Anfangstemperaturverteilung im Modellquerschnitt vorgegeben, die über eine vorgeschaltete instationäre Berechnung ermittelt wird (Temperatureinwirkung nach Gleichung 6.15, Zeitraum 96 Monate, Zeitschritt ein Monat, Simulationseende im Dezember).

6.3.2 Ergebnisse der instationären Berechnung

Die instationäre Simulation der idealisierten Mauer liefert für sämtliche Messeinrichtungen 5-jährige Ganglinien mit einem Messintervall von einem Tag. Diese Datenreihen lassen sich, wie in Kapitel 2 und 5 beschrieben, analog zu den realen Messdaten der Betreiberumfrage auswerten und entsprechende graphische Darstellungen erzeugen. So werden die Größenordnungen und der Schwankungsbereich der Messgrößen ausgewertet. Darüber hinaus wird anhand einer multiplen Regressionsanalyse die Stärke des Zusammenhangs zwischen den Messgrößen und den wesentlichen Einwirkungen von Wasserstand und Temperatur ermittelt. Die Ganglinien werden dafür in einen Kalibrierungszeitraum von 40 Monaten und einen Validierungszeitraum von 20 Monaten untergliedert. Die folgende Interpretation der Ergebnisse bezieht sich auf die im Anhang E abgebildeten Diagramme.

- Sickerwasserabfluss

Die Berechnungen bestätigen den deutlichen Einfluss der in den Kontrollgang entwässernden Sohl drainagen auf den Gesamtsickerwasserabfluss. Die Mauer mit Drainagen weist einen Median von 1,32 l/s auf, dagegen beträgt der Median der Gewichtsstau-mauer ohne Untergrund drainagen 0,04 l/s. Wie aus Abb. E.1 hervorgeht, stimmt diese Größenordnung mit den Werten realer Gewichtsstau-mauern gut überein. Im Gegensatz dazu ist die Standardabweichung der simulierten Messwerte sehr gering. Neben dem Wasserstand und der Temperatur führen weitere äußere Einflüsse zu Schwankungen des Sickerwasserabflusses. So wird beispielsweise über die Mauerschächte eindringen-des Niederschlagswasser im Modell nicht berücksichtigt.

- Lotmessung der Mauerbewegung

Die Untergrund drainagen wirken sich im Modell nur unwesentlich auf die Auslenkung der Lotanlage aus. Die Abb. E.2 zeigt, dass sowohl die Gewichtslotbewegung mit einer Spannweite von rund 10,9 mm (mit Drainage) bzw. 10,6 mm (ohne Drainage) als auch die Schwimmlobbewegung mit 1,2 mm bzw. 1,1 mm sehr gut zu den Werten der Mauern aus der Umfrage passt.

- Piezometermessung des Sohl druckverlaufs

Die Sohl drainagen haben die Funktion den Sohlwasserdruck an der Maueraufstands-fläche zu reduzieren. Die im Anhang befindliche Darstellung Abb. E.3 der maximalen Piezometerdrücke zeigt, dass die Drainagewirkung im Modell sehr gut abgebildet wird. Insbesondere der Druck des in der Nähe der Drainagebohrung befindlichen Piezometers P1 verringert sich dadurch um 3,5 m. Durch Kalibrierung des Grundwasserstandes im Unterwasser auf 4 m über Geländeoberkannte wurde der Verlauf des Potentialabbaus im FE-Modell auf die Messungen der realen Mauern abgestimmt. Während das Modell den Sohl druckverlauf der Mauer ohne Untergrund drainage sehr gut beschreibt, liegt der Grundwasserspiegel im Unterwasser der Mauer mit Untergrund drainage im Vergleich zu den realen Mauern etwas zu hoch.

- Abhängigkeit von den äußeren Einwirkungen

Die Regressionsberechnungen der generierten Überwachungsdaten zeigen, dass sich die Variation des Sickerwasserabflusses und der Piezometerdrücke nahezu vollständig durch die Eingangsgröße Wasserstand beschreiben lässt (vgl. Abb. E.4 bis Abb. E.7). Bei einer gewöhnlichen Speicherbewirtschaftung tritt selbst bei winterlichen Temperaturen wasserseitig keine klaffende Fuge auf. Daher besteht im Modell kein Zusammenhang

zwischen der Sickerströmung und der Temperatur. Wie aus Abb. 5.6 hervorgeht, ist auch bei den realen Mauern der temperaturbedingte Varianzanteil dieser Messgrößen mit durchschnittlich 4 % Prozent gering.

Die Auswertung zeigt, dass die Lotbewegung durch die Regressionsgleichung nicht vollständig beschrieben wird, obwohl die Mauerbewegung des FE-Modells durchweg vom Wasserstand und der Temperaturverteilung im Mauerkörper abhängt. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Regressionsberechnung lediglich die Temperaturdaten der einen Messstelle in Kronennähe berücksichtigt und nicht die Daten mehrerer, im ganzen Mauerquerschnitt verteilten Messstellen. Der restlich unerklärte Varianzanteil beträgt daher fast 10 % (vgl. Abb. E.6 und E.7). Wie Abb. 5.6 verdeutlicht, ist bei den realen Gewichtslot- bzw. Schwimmlotdaten dieser Varianzanteil mit 20 % bzw. 50 % größer, weil hier weitere Faktoren die Messungen beeinflussen. Da insbesondere die Schwimmlothe nur sehr kleine Bewegungen aufzeichnen, kann dies allein schon auf die Messgenauigkeit der Ableseeinrichtungen zurückzuführen sein. Des Weiteren verdeutlichen sowohl die realen als auch die künstlichen Daten, dass die Gewichtslotbewegung vornehmlich durch die Temperatur und die Schwimmlotbewegung durch den Wasserstand dominiert wird.

Die Validierung zeigt auf, dass die Auswirkung der äußeren Einflüsse Wasserstand und Temperatur auf die Sickerströmung, den Sohlwasserdruck und die Mauerdeformation gut abgebildet werden, da die Größenordnungen der generierten Messdaten realitätsnah sind. Das Modell ist daher grundsätzlich geeignet, die relevanten Prozesse richtig abzubilden.

Weitere untergeordnete Einflüsse bleiben dagegen unberücksichtigt, da die Varianz der simulierten Messdaten im Vergleich zu realen Daten zu gering ist. Dieser Umstand muss folglich bei der weiteren Auswertung der Rechenergebnisse in Kapitel 7 gesondert Berücksichtigung finden.

6.4 Simulation von Staumauerschäden

Durch eine Auswertung historischer Ereignisse wurde in Kapitel 3 bereits eine Auswahl von möglichen Staumauerschäden getroffen und ab S. 39 näher beschrieben. Diese werden im Folgenden mittels numerischer Simulation näher untersucht. Für die Schäden werden jeweils vier abgestufte Szenarien betrachtet und mit dem unbeschädigten Mauerzustand (Var 0) verglichen. Die Varianten reichen jeweils von Var A - leicht beschädigt bis Var D - sehr stark geschädigt bzw. vollkommener Ausfall der jeweiligen Bauwerkskomponente. Je nach Schadensbild werden dabei Materialparameter reduziert oder bestimmte Randbedingungen der Simulation angepasst. Die in dieser Arbeit getroffenen Annahmen werden im Folgenden erläutert.

6.4.1 Schädigung des Kernbetons

Der Beton bzw. das Mauerwerk von Talsperren ist auf Grund der Ausführung und den verwendeten Materialien nicht homogen und weist Fugen auf. Daher sind die Schäden in den jeweiligen Mauerbereichen unterschiedlich stark ausgeprägt. Vereinfachend werden in dieser Arbeit jedoch lediglich folgende zwei mögliche Schadensbilder eingehender betrachtet.

- Die Mauerschäden treten im gesamten Bereich des Kernbetons auf (Bereich 1 in Abb. 4.4 auf Seite 51).
- Die Schäden beschränken sich auf den der Witterung ausgesetzten Bereich des Kernbetons. In der Simulation werden somit Elemente mit einem Abstand von einem Meter zur luftseitigen Maueroberfläche selektiert und deren Materialparameter variiert.

Die in Abschnitt 3.3 beschriebenen Materialschäden führen einerseits zu einer Reduktion der Zug- und Druckfestigkeit des Betons, andererseits erhöht sich in Folge von Rissbildungen oder Auswaschungen die Materialdurchlässigkeit. In Anlehnung an Hunkeler u. a. (2007) und ICOLD (2008) werden für die jeweiligen Varianten die in Tab. 6.2 aufgeführten Materialkennwerte für die geschädigten Mauerbereiche angesetzt.

Tab. 6.2: Variierte Materialparameter des geschädigten Kernbetons

Materialparameter		Var 0	Var A	Var B	Var C	Var D
k_f -Wert	[m/s]	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$
f_{cm}	[N/mm ²]	16,0	16,0	14,0	11,0	8,8
f_{cm2}	[N/mm ²]	19,0	19,0	16,0	13,0	11,0
f_{ctm}	[N/mm ²]	1,20	1,10	0,96	0,78	0,60

6.4.2 Schäden an der Vorsatzschale

Schäden an der wasserseitigen Vorsatzschale werden für folgende zwei Szenarien analysiert.

- vollständige Schädigung der wasserseitigen Vorsatzschale (gesamter Bereich 2 in Abb. 4.4).
- Schäden im vorwiegend durch Witterung, Frost und Wellenschlag beanspruchten Bereich zwischen Krone und Wasserwechselzone (bis 7 m unterhalb der Mauerkrone).

Die Vorsatzschale schützt in erster Linie den Kernbeton vor äußeren Einwirkungen und hat eine Abdichtungsfunktion gegenüber eindringendem Speicherwasser. Der Mauerkernbereich dient dagegen zur Abtragung von angreifenden Lasten. In der Simulation wird daher auf eine Abminderung der Druck- und Zugfestigkeit der Vorsatzschale verzichtet und dementsprechend werden für die einzelnen Varianten gemäß Tab. 6.3 lediglich die Durchlässigkeitsbeiwerte variiert.

Tab. 6.3: Variierte Materialparameter der geschädigten Vorsatzschale

Materialparameter		Var 0	Var A	Var B	Var C	Var D
k_f -Wert	[m/s]	$1,0 \cdot 10^{-9}$	$3,2 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$3,2 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$

6.4.3 Schäden an den Mauerdrainagen

Wie bereits in Abschnitt 6.1.5 erläutert, werden die Drainagen im Modell nicht als gesonderte Materialbereiche definiert. Stattdessen werden den entlang der Drainagen liegenden Knoten bestimmte Randbedingungen für die Sickerströmungsberechnung zugewiesen. So gilt für die

Knoten der Mauerdrainagen, dass dort Atmosphärendruck herrscht und hier das Sickerwasser austreten kann.

Bei der Nullvariante Var 0 wird diese Randbedingung auf sämtliche entlang der Mauerdrainage liegende Knoten angewendet. Bei den Varianten A bis D werden entsprechend Tabelle 6.4 weniger Knoten selektiert. Die Drainagen stellen im Vergleich zur kaum durchlässigen Umgebung den maßgebenden Sickerweg dar. Erst eine merkliche Reduktion der selektierten Knoten wirkt sich erkennbar auf die Sickerströmungsberechnungen aus. Dies erklärt den großen Schritt zwischen der Nullvariante und der Variante A. Bei Variante D wird keine Randbedingung im Bereich der Mauerdrainagen vorgegeben und somit stellt diese den Fall dar, dass die Funktion der Drainagen vollständig ausfällt.

Tab. 6.4: Variierte Randbedingung für die Sickerströmungsberechnung zur Simulation der Schäden an den Mauerdrainagen

Randbedingung	Var 0	Var A	Var B	Var C	Var D
Anteil selektierter Knoten im Bereich der Mauerdrainagen	100 %	15 %	10 %	5 %	0 %

6.4.4 Schadensprozesse im Untergrund

Wie in Abschnitt 3.3.4 erläutert, werden als Schadensfall im Felsuntergrund Erosionsprozesse in den mit Feinmaterial gefüllten Klüften betrachtet. Eine Untergrunderosion tritt ein, wenn folgende beiden Voraussetzungen gegeben sind. Zum einen müssen die hydraulischen Strömungsgradienten im Untergrund groß genug sein, dass Bodenpartikel aus der Füllung ausgespült werden können. Zum anderen müssen im Umgebungsbereich der Klüfte Hohlräume oder freie Oberflächen existieren, in welche die erodierten Bodenpartikel eingetragen bzw. weiter abtransportiert werden können. Im Untergrund von Gewichtsstauwauern kommen daher folgende erosionsgefährdete Bereiche in Betracht:

- Die Untergrunderosion findet im Bereich des Mauerfußes statt (Bereich 4 in Abb. 4.4). Die erodierten Partikel werden hier in den Unterwasserbereich abtransportiert.
- Die Erosion findet im Umgebungsbereich der Untergrunddrainagen statt (Bereich 4 in Abb. 4.4). Das Füllmaterial der Klüfte wird in die Drainagen eingetragen.
- Der unterhalb des Dichtungsschleiers befindliche Felsbereich (Bereich 6 in Abb. 4.4) weist gefüllte Trennflächen auf, die Klüfte des darüber befindlichen Untergrundbereiches sind dagegen nicht gefüllt oder es existieren dort Hohlräume, so dass sich das erodierte Material dort einlagern kann.

Nach Stahlmann (1991) hängt die Größe des erosionsauslösenden kritischen Gradienten I_{krit} gemäß Gleichung 6.20 von der Geometrie der Trennflächen sowie den bodenmechanischen Eigenschaften der Füllung ab. Dabei gilt die Annahme, dass der Strömungsgradient und die Klüfte in die gleiche Richtung orientiert sind. Da in dieser Arbeit homogene Untergrundverhältnisse angesetzt werden, ist die Gleichung richtungsunabhängig ohne zusätzliche

Transformation anwendbar.

$$I_{krit} = \frac{\frac{1}{\gamma_w} (1 - n) (\gamma_s - \gamma_w) \frac{(1-n)}{n} C \frac{2a_i}{U \cdot d_w} + 9,0}{\frac{2a_i}{U \cdot d_w} - 2,3} \quad (6.20)$$

mit:

γ_w	Wichte von Wasser [10,0 kN/m ³]
γ_s	Kornwichte [angenommen 25,0 kN/m ³]
n	Porenanteil [angenommen 0,35 -]
C	Bodenkennwert [angenommen 0,28 -]
$2a_i$	Öffnungsweite der Klüfte (vgl. Abb. 4.8) [mm]
U	Ungleichförmigkeitszahl [angenommen 1,2 -]
d_w	wirksamer Korndurchmesser [angenommen 0,13 mm]

Die Strömungsgradienten im Untergrund von Gewichtsstauwauern sind bei gewöhnlichen Verhältnissen deutlich kleiner als I_{krit} , so dass die Erosionswahrscheinlichkeit sehr gering ist. Um diesen Schadensprozess im Modell dennoch abbilden können, werden der Füllung daher gemäß Gl. 6.20 sehr ungünstige Materialparameter zugewiesen. Auf Grund des geschichteten Aufbaus ergeben sich für die obere, durchlässigere Untergrundsicht andere Kenngrößen als für die darunter liegende Schicht. In Tab. 6.5 sind die Annahmen bezüglich der Kluftabmessungen und k_f -Werte der Füllung und die sich daraus ergebenden gemittelten Durchlässigkeitsbeiwerte der gefüllten und offenen Kluftschar sowie die zugehörigen Strömungsgradienten I_{krit} aufgeführt.

Tab. 6.5: Materialparameter und Kluftabmessungen für die Berechnung des Schadenszenarios Erosion im Untergrund

Parameter	Bereich 4 in Abb. 4.4	Bereich 6 in Abb. 4.4
Öffnungsweite der Klüfte $2a_i$	5,0 mm	3,0 mm
k_f -Wert der Kluftfüllung	$1,0 \cdot 10^{-3}$ m/s	$1,7 \cdot 10^{-4}$ m/s
Durchlässigkeitsbeiwert der gefüllten Kluftschar	$5,0 \cdot 10^{-6}$ m/s	$5,0 \cdot 10^{-7}$ m/s
k_T nach Gleichung 4.1 und 4.4		
Durchlässigkeitsbeiwert der offenen Kluftschar k_T nach Gleichung 4.2 und 4.4	$7,9 \cdot 10^{-2}$ m/s	$1,7 \cdot 10^{-2}$ m/s
kritischen Strömungsgradient I_{krit}	0,85	1,11

Mittels Sickerströmungsberechnungen werden die erosionsgefährdeten Bereiche im FE-Modell identifiziert. Wie aus dem Flussdiagramm in Abb. 6.9 hervorgeht, erfolgt die Simulation iterativ. In jeder Iterationsschleife erfolgt die Abfrage, ob (weitere) Untergrundbereiche existieren, bei welchen die in Tab. 6.5 aufgeführten kritischen Strömungsgradienten überschritten werden. Ist dies der Fall, so wird hier von einer Erosion ausgegangen und es werden für diesen Bereich die Durchlässigkeitsbeiwerte einer offenen Kluftschar angesetzt.

Je nach dem, ob die Mauer mit oder ohne Sohldrainagen ausgestattet ist, sind unterschiedliche erosionsgefährdete Bereiche vorhanden. Besitzt die Mauer keine Sohldrainage, so treten die höchsten Strömungsgradienten am Mauerfuß auf. Die Erosion beginnt dabei direkt an der Luftseite der Mauer und schreitet bei jedem Iterationsschritt in Richtung Wasserseite fort.

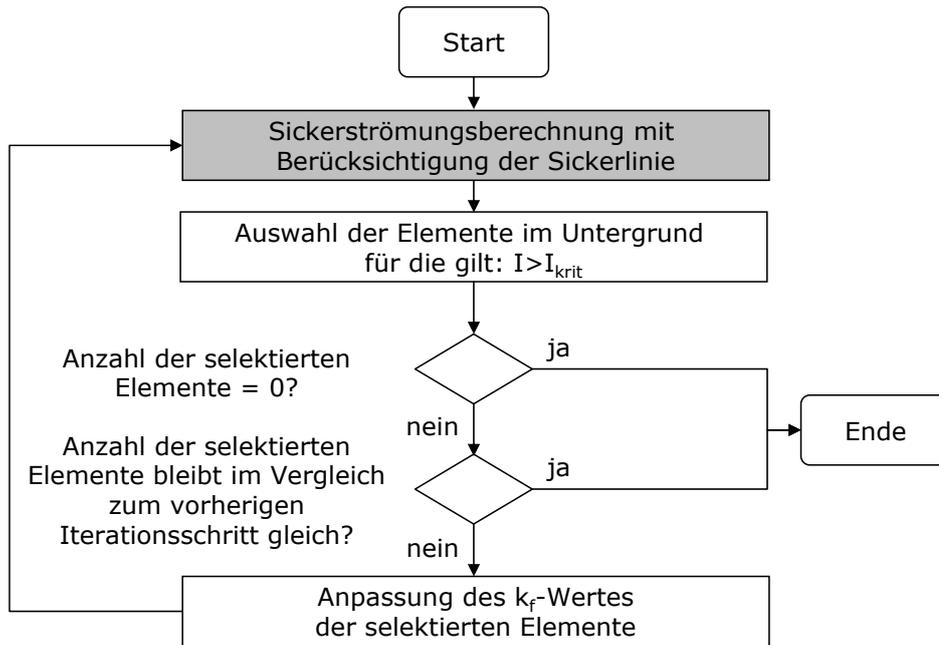


Abb. 6.9: Flussdiagramm zur Ermittlung der erosionsgefährdeten Bereiche im Untergrund

Mit zunehmender Fläche des erodierten Bereiches reduzieren sich die lokalen Strömungsgradienten, so dass der Prozess nach einigen Schritten zum Erliegen kommt. Der Endzustand der Simulation ist in Abb. 6.10 dargestellt. Dabei sind die Elemente der erodierten Untergrundbereiche rot markiert.

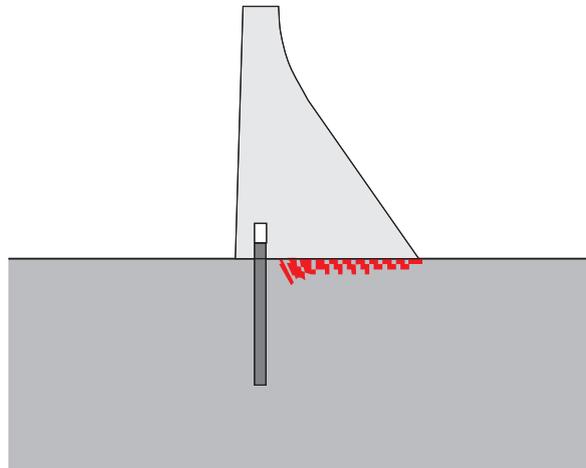


Abb. 6.10: Erosionsgefährdeter Untergrundbereich der Gewichtsstaumauer ohne Untergrunddrainage

Bei Mauern mit Untergrunddrainagen konzentriert sich die Strömung auf den drainierten Untergrundbereich hinter dem Dichtungsschleier, so dass hier eine Erosion der Klüfte in unmittelbarer Nähe der Untergrunddrainagen stattfinden kann (vgl. Abb. 6.11 links). Des Weiteren sind die Strömungsgradienten unterhalb des Dichtungsschleiers im Vergleich zur Mauer

ohne Untergrunddrainage höher, so dass zudem Erosionsprozesse in dem in Abb. 6.11 rechts kolorierten Bereich auftreten können, sofern Klüfte existieren, in welche sich das erodierte Material einlagern kann.

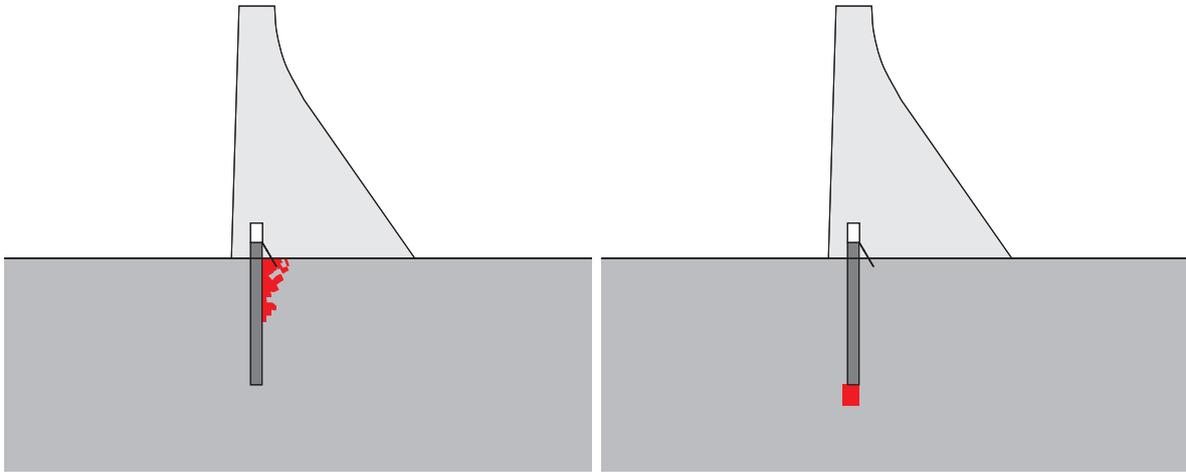


Abb. 6.11: Erosionsgefährdete Untergrundbereiche der Gewichtsstaumauer mit Untergrunddrainage

Um die Auswirkungen der Untergrunderosion analysieren zu können, werden in den FE-Berechnungen der folgenden Abschnitte 6.5 und 6.6 die Varianten A bis D mit für den erosionsgefährdeten Bereich modifizierten Materialparametern simuliert. Diese lassen sich den Tabellen 6.6 und 6.7 entnehmen.

Tab. 6.6: Variierte Materialparameter des geschädigten Felsuntergrundes im Bereich des Mauerfußes bzw. im Umgebungsbereich der Drainagen

Materialparameter		Var 0	Var A	Var B	Var C	Var D
k_f -Wert	[m/s]	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
c	[N/m ²]	0,20	0,20	0,16	0,12	0,08
φ	[°]	22,7	22,7	21,6	20,4	19,3

Tab. 6.7: Variierte Materialparameter des geschädigten Felsuntergrundes im Bereich unterhalb des Dichtungsschleiers

Materialparameter		Var 0	Var A	Var B	Var C	Var D
k_f -Wert	[m/s]	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$
c	[N/m ²]	0,35	0,35	0,28	0,21	0,14
φ	[°]	23,7	23,7	22,5	21,3	20,1

6.4.5 Schäden am Dichtungsschleier

Die wesentliche Aufgabe des Dichtungsschleiers ist die Durchströmung des Untergrundes zu verringern bzw. den Sickerweg zu verlängern und durch den auf die Wasserseite konzentrierten

Potentialabbau den Porenwasserdruck im Sohlbereich der Mauer zu reduzieren. Schäden am Dichtungsschleier führen folglich im Wesentlichen zu einer erhöhten Durchlässigkeit.

Um dieses Schadensbild zu charakterisieren, wird der Durchlässigkeitsbeiwert des Dichtungsschleiers (Materialbereiche 9 und 10 in Abb. 4.4) entsprechend Tab. 6.8 sukzessive erhöht. Variante D entspricht dem Fall, dass der Dichtungsschleier seine Funktionsfähigkeit vollständig verliert und somit die gleiche Durchlässigkeit wie der umgebende Felsuntergrund aufweist.

Tab. 6.8: Variierte Materialparameter des geschädigten Dichtungsschleiers

Materialparameter	Var 0	Var A	Var B	Var C	Var D
k_f -Wert [m/s]	$2,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$

6.4.6 Schäden an den Untergrunddrainagen

Die Untergrunddrainagen entwässern den Sohlbereich der Mauer und münden in den Kontrollgang. Die Drainagewirkung wird in das Modell implementiert, indem den an die Drainagen angrenzenden Knoten als Randbedingung die geodätische Höhe der Kontrollgangsohle zugewiesen wird.

Geringdurchlässige Ablagerungen an der Oberfläche der Drainagebohrung bewirken eine Verlängerung des Sickerweges und führen folglich zu einer Einschränkung der Drainagewirkung. Im Modell wird der Durchlässigkeitsbeiwert der Ablagerungen zu $5 \cdot 10^{-9}$ m/s abgeschätzt. Die für die jeweiligen Varianten variierende Mächtigkeit der Ablagerungsschicht lässt sich Tab. 6.9 entnehmen. Für die Modellierung der jeweiligen Varianten werden entsprechend die Druckrandbedingungen an den Untergrunddrainagen angepasst. Die Variante D stellt den Totalausfall der Drainagen dar, so dass im Modell keine Drainagerandbedingung angesetzt wird und der Porenwasserdruck somit unbeeinflusst bleibt.

Tab. 6.9: Variierte Randbedingung für die Sickerströmungsberechnung zur Simulation der Schäden an den Sohl drainagen

Randbedingung	Var 0	Var A	Var B	Var C	Var D
Mächtigkeit der Ablagerung [mm]	0	5	15	25	vollständig zugesetzt

6.5 Generierung von Talsperrenmessdaten der geschädigten Mauer

Um Talsperrenschäden möglichst frühzeitig registrieren zu können, werden an den Talsperren regelmäßig Messdaten erhoben und ausgewertet. Wie bereits eingangs in Kapitel 3 dargelegt, treten gravierende Schäden in der Praxis nur sehr selten auf. Demzufolge liegen für diese Fälle kaum Erfahrungswerte vor, mit welchem Betrag sich die unterschiedlichen Messgrößen im Vergleich zum Normalzustand verändern. Im Folgenden werden daher Schadensszenarien mittels FEM simuliert, um künstliche Talsperrenmessdaten zu generieren.

6.5.1 Simulationsablauf

Um den Aufwand für die Simulation und der Auswertung der Rechenergebnisse zu reduzieren, werden für die Szenarien mit Mauerschäden, im Gegensatz zur Modellvalidierung in Abschnitt 6.3, keine Ganglinien generiert, sondern für jedes Messgerät ein repräsentativer Wert ermittelt. Anstelle einer instationären Berechnung werden daher lediglich zwei gegensätzliche Extremzustände untersucht.

Zum Einen wird die gefüllte Talsperre bei winterlichen Temperaturen betrachtet, da hier eine maximale Kronenauslenkung in Richtung Luftseite auftritt. Die Wasserspiegellage wird dabei auf 28,54 m über Beckensohle festgelegt. Diese Höhenlage wird von 95 % der Werte der Wasserstandsganglinie aus Abbildung 6.5 unterschritten. Die Temperaturverteilung der Mauer im Winter wird durch eine vorab durchgeführte instationäre Simulationⁱⁱ bestimmt.

Zum andern wird der konträre Zustand mit maximaler Auslenkung in Richtung Wasserseite analysiert. Die niedrige Wassertiefe im Sommer beträgt 25,66 m (Unterschreitungswahrscheinlichkeit 5 %). Die Temperaturverteilung im Sommer entstammt ebenfalls einer instationären Simulationⁱⁱⁱ.

Das Flussdiagramm in Abb. 6.12 stellt den Simulationsablauf zur Ermittlung der Talsperrenmessdaten der geschädigten Mauer dar.

- Zunächst werden entsprechend dem zu betrachtenden Schadensmechanismus die bereits in Abschnitt 6.4 erläuterten zugehörigen Materialparameter bzw. Randbedingungen festgelegt.
- Anschließend erfolgt jeweils eine stationäre Berechnung für den Fall „Winter“ mit hohem Stau und den Fall „Sommer“ mit niedrigem Stau. Die dabei ausgeführten Arbeitsschritte sind analog zur instationären Berechnung aus Abschnitt 6.3 „Validierung des Modells“.
- Um für jedes Messgerät den gesuchten repräsentativen Messwert zu erhalten, werden abschließend die jeweiligen Werte aus den beiden Rechenläufen gemittelt.

6.5.2 Interpretation der generierten Talsperrenmessdaten

Die graphischen Darstellungen der berechneten Messdaten des Referenzbauwerks ohne bzw. mit Untergrunddrainage sind im Anhang F abgebildet. Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse der Simulation erörtert.

Schädigung des Kernbetons - gesamter Bereich

Infolge der Schädigung des Kernbetons, insbesondere bei auftretender Rissbildung, erhöht sich die Materialdurchlässigkeit im Mauerinneren. Dies wirkt sich wiederum maßgeblich auf die Sickerlinie im Mauerkörper und folglich auch auf die beobachteten Messgrößen aus.

ⁱⁱInstationäre Simulation mit Temperatureinwirkung nach Gleichung 6.15, Zeitraum 85 Monate, Zeitschritt ein Monat, Simulationsende im Januar

ⁱⁱⁱInstationäre Simulation mit Temperatureinwirkung nach Gleichung 6.15, Zeitraum 91 Monate, Zeitschritt ein Monat, Simulationsende im Juli

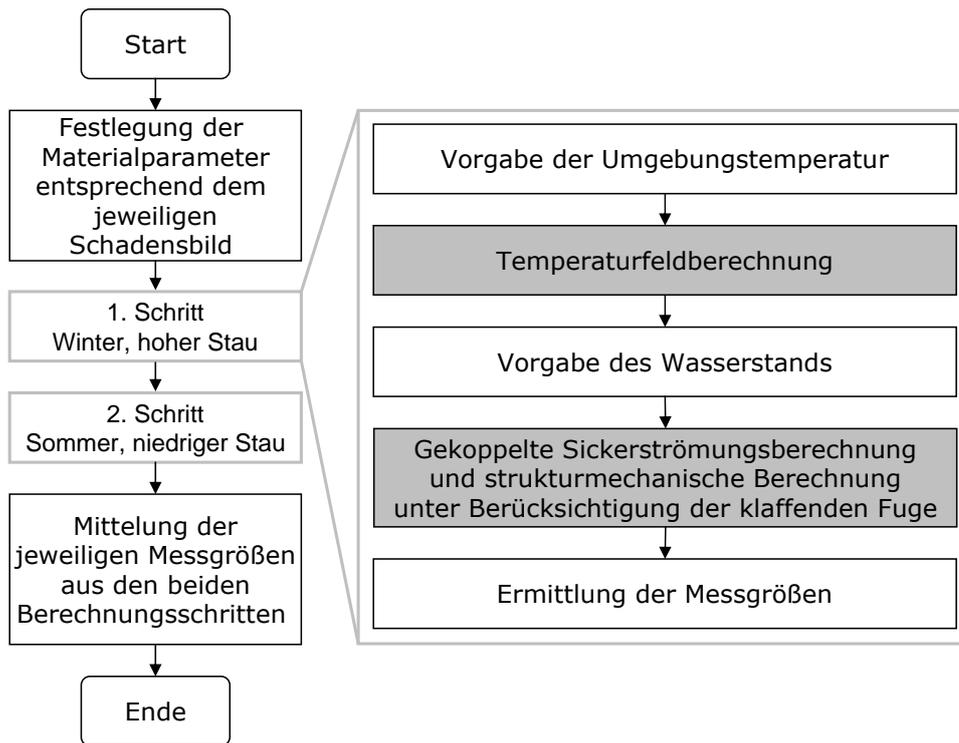


Abb. 6.12: Simulationsablauf der stationären Berechnung zu Ermittlung der Talsperrenmessdaten des geschädigten Referenzbauwerks

Die wasserseitige Vorsatzschale ist bei diesem Schadensbild nicht betroffen. Das relative Verhältnis der k -Werte wird somit größer, so dass der Potentialabbau noch stärker im wasserseitigen Bereich der Mauer stattfindet und die Sickerlinie abfällt. Die erhöhte Durchlässigkeit des Kernbetons bewirkt zudem eine Entwässerung des im Umfeld der Drainagen liegenden Mauerbereichs und führt zu einer Zunahme des Sickerwassers im Kontrollgang. Da bei Mauern mit Untergrunddrainagen der überwiegende Anteil des Sickerwasserabflusses aus den Untergrunddrainagen stammt, fällt hier der prozentuale Anstieg deutlich geringer aus.

Infolge der größeren Permeabilität wird darüber hinaus die Maueraufstandsfläche stärker entwässert. Demzufolge sind die Sohlpiezometerdrücke insbesondere im Bereich des Kontrollgangs niedriger. Dieser Effekt ist bei Mauern mit Untergrunddrainagen etwas weniger stark ausgeprägt.

Die Gewichts- und Schwimmotmessungen zeigen, dass sich die Mauer zunehmend in Richtung Wasserseite bewegt. Ursache dafür ist die Reduktion der Auftriebskräfte im wasserseitigen Mauerquerschnitt.

Schädigung des Kernbetons - luftseitiger Bereich

Die Schädigung der luftseitigen Maueroberfläche führt zu keiner merklichen Änderungen der generierten hydraulischen Messwerte. Sowohl bei der Mauer mit, als auch bei der Mauer ohne Untergrunddrainage bleiben die Sickerwasserabflüsse und Sohlwasserdrücke nahezu unverändert.

Infolge eines geringfügigen Abfalls der Sickerlinie im Bereich der luftseitigen Vorsatzschale bewegt sich die Mauer minimal in Richtung Luftseite.

Schäden an der Vorsatzschale - gesamter Bereich

Beim Referenzbauwerk ohne Untergrunddrainage führen Schäden im gesamten Bereich der Vorsatzschale zu einer offensichtlichen Zunahme des Sickerwasserabflusses. Beim Referenzbauwerk mit Untergrunddrainage fällt die relative Zunahme deutlich geringer aus, da der überwiegende Sickerwasseranteil aus dem Untergrund stammt.

Auf die Piezometerdrücke haben die Schäden an der Vorsatzschale keinen Einfluss.

Die erhöhte Durchlässigkeit der wasserseitigen Vorsatzschale führt zu einem deutlichen Anstieg der Sickerlinie im gesamten Bauwerk. Die damit verbundene Zunahme der Auftriebskräfte bewirkt eine leichte Drehbewegung der Mauer in Richtung Luftseite.

Schäden an der Vorsatzschale - im Bereich der Wasserwechselzone

Beschränken sich die Schäden an der Vorsatzschale lediglich auf den Bereich der Wasserwechselzone, so wirken sich diese nur unwesentlich auf den Sickerwasserabfluss, die Piezometerdrücke und die Lotbewegungen aus.

Schäden an den Mauerdrainagen

Die Schäden an den Mauerdrainagen führen bei der Mauer ohne Untergrunddrainage zu einer geringfügigen Reduktion des Gesamtsickerwasserabflusses. Bei der Mauer mit Untergrunddrainage sind die Änderungen noch weniger ausgeprägt.

Des Weiteren ist feststellbar, dass die Piezometerdrücke an der Aufstandsfläche von der Funktionstüchtigkeit der Mauerdrainagen nicht beeinflusst werden.

Bei eingeschränkter Wirksamkeit der Mauerdrainagen nimmt der unter Auftrieb stehende Kernbereich der Mauer zu. Folglich weist sowohl das Gewichts- als auch das Schwimmlot auf eine leichte Mauerrotation bzw. Bewegung in Richtung Luftseite hin.

Schadensprozesse im Untergrund - im Bereich des Mauerfußes

Dieser Schadensprozess ist nur für Mauern ohne Untergrunddrainagen relevant (vgl. Abschnitt 6.4.4).

Infolge der Untergrunderosion im Bereich des Mauerfußes tritt das Sickerwasser vermehrt an der Mauerluftseite aus. Infolge dessen reduziert sich die Sickerwassermenge im Kontrollgang geringfügig.

Durch die Erosionsprozesse im Bereich der Maueraufstandsfläche stellen sich dort ähnliche Porenwasserdrücke wie im Unterwasserbereich ein. Dies führt zu einem merklichen Abfall der gemessenen Piezometerwasserstände.

Eine stark ausgeprägte Erosion mit deutlich reduzierten Scherparametern im geschädigten Untergrundbereich führt zu einer geringfügigen gleitenden Bewegung der Mauer in Richtung

Luftseite, die durch das Schwimmlot bemerkbar wird. Auf die Gewichtslotbewegung wirken sich die Erosionsprozesse im Untergrund dagegen nicht aus.

Schadensprozesse im Untergrund - im Umgebungsbereich der Drainagen

Dieser Schadensprozess ist nur für Mauern mit Untergrunddrainagen relevant (vgl. Abschnitt 6.4.4).

Infolge einer Erosion der Kluftfüllungen in der Umgebung der Untergrunddrainagen wird dieser Bereich stärker entwässert. Dies führt zu einer deutlichen Zunahme der Sickerwassermengen. Zudem reduzieren sich die Porenwasserdrücke an der Aufstandsfläche und somit auch die Druckhöhen der Piezometer.

Auf die Lotbewegungen hat dieser Schadensprozess dagegen keine merklichen Auswirkungen.

Schadensprozesse im Untergrund - im Bereich unterhalb des Dichtungsschleiers

Dieser Schadensprozess ist nur für Mauern mit Untergrunddrainagen relevant (vgl. Abschnitt 6.4.4).

Aufgrund der Erosion der Klüfte unterhalb des Dichtungsschleiers erhöht sich die Unterströmung des Absperrbauwerks leicht und somit nimmt der Sickerwasserabfluss aus den Untergrunddrainagen etwas zu.

Des Weiteren bewirkt die zunehmende Unterströmung eine Erhöhung der Piezometerdrücke. Die Mauer- bzw. die Lotbewegung wird durch diesen Schädigungsmechanismus nicht signifikant beeinflusst.

Schäden am Dichtungsschleier

Schäden am Dichtungsschleier haben einen ähnlichen Effekt wie eine Erosion unterhalb des Dichtungsschleiers. Während bei der Mauer ohne Untergrunddrainage der Sickerwasserabfluss nur geringfügig zunimmt, erhöht sich der Sickerwasserabfluss bei der Mauer mit Untergrunddrainage deutlich.

Bei funktionstüchtigem Dichtungsschleier konzentriert sich der Potentialabbau im Untergrund vornehmlich auf den injizierten Bereich nahe der Wasserseite. Ohne Dichtungsschleier erfolgt der Potentialabbau dagegen gleichmäßig entlang der Sohle. Somit führen die Schäden am Dichtungsschleier zu einem starken Anstieg der Piezometerdrücke.

Bei eingeschränkter Wirksamkeit des Dichtungsschleiers ändert sich der Betrag und die Orientierung der Strömungskräfte im Untergrund. Dies führt zu einer geringfügigen durch das Schwimmlot aufgezeigten Mauerbewegung in Richtung Wasserseite. Die Gewichtslotbewegung bleibt dagegen von den Schäden unbeeinflusst.

Schäden an den Untergrunddrainagen

Eine eingeschränkte Funktionstüchtigkeit der Untergrunddrainagen hat starke Auswirkung auf die Unterströmung der Talsperre. Die Sickerwasserabflüsse nehmen deutlich ab und die Piezometerdrücke steigen stark an.

Die Gewichtslot- und Schwimmlobbewegungen bleiben dagegen nahezu unverändert.

6.6 Simulation des Staumauerversagens

Neben der Kenntnis darüber, inwiefern sich die Größenordnung der Messwerte infolge einer Schädigung an der Talsperre verändern, ist darüber hinaus von Interesse, welche Auswirkung die in Abschnitt 6.4 näher definierten Schäden auf die Standsicherheit der Mauer haben.

Eine Möglichkeit zur Beurteilung der Standsicherheit ist die Durchführung der in DIN 19700-11 (2004) aufgeführten maßgebenden Nachweise:

- Nachweis klaffender Fugen,
- Nachweis der Einhaltung der zulässigen Hauptdruckspannungen,
- Nachweis der Kraftübertragung in den Fugen des Bauwerks, der Aufstandsfläche und Trennflächen des Untergrundes (Gleitsicherheit).

Werden diese Tragsicherheitsnachweise als Bewertungsgrundlage gewählt, so besteht die Schwierigkeit, die einzelnen Nachweise wiederum untereinander zu werten. Es stellt sich dann beispielsweise die Frage, ob eine Gleitsicherheit an der Sohle von 0,9 ebenso kritisch zu bewerten wäre wie die Lage der Resultierenden außerhalb des Kernbereichs des Staumauerquerschnittes. Unter Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens ist darüber hinaus ein relativer Vergleich der auf den vorhandenen und zulässigen Spannungen basierenden Sicherheitsabstände schwierig.

Eine weitere Möglichkeit zur Beurteilung der unterschiedlichen Schadensszenarien ist die Anwendung probabilistischer Methoden, die beispielsweise von Tönnis (2002) für die Zuverlässigkeitsanalyse der Diemeltalsperre herangezogen wurden. Unter Zugrundelegung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Einfluss- und Widerstandsgrößen werden anhand von numerischen Berechnungen Versagenswahrscheinlichkeiten abgeleitet. Diese Vorgehensweise erfordert allerdings eine Vielzahl an Rechenläufen und ist daher mit einem erheblichen Aufwand verbunden.

Um die erläuterten Nachteile zu umgehen, wird in dieser Arbeit eine von den obigen Ansätzen abweichende Vorgehensweise gewählt. Auf Grund ihrer großen Sicherheitsreserven versagen Gewichtsstaumauern in der Regel erst wenn sie deutlich überströmt werden (vgl. Abb. 3.3). Als Kriterium zur Beurteilung der Talsperrrensicherheit wird die kritische Überstauhöhe h_{krit} eingeführt. Diese wird als Differenz zwischen der Wasserspiegellage, bei deren Überschreitung ein Versagen der Mauer im numerischen Modell eintreten würde, und der Lage der Mauerkrone definiert.

Ein Versagenszustand der Mauer wird in Anlehnung an Schlegel (2005) wie folgt definiert: Ab einer gewissen statischen Beanspruchung der Mauer treten infolge des elastisch-plastischen Materialverhaltens plastische Dehnungen und Kraftumlagerungen im Tragwerk auf. Eine weitere Laststeigerung führt dazu, dass in den besonders beanspruchten Bereichen deutliche Deformationen auftreten. Können nun die globalen Ungleichgewichtskräfte nicht mehr umgelagert werden, so wird in den Berechnungen keine Konvergenz mehr erreicht. Bei diesem Zustand wird von einem Versagen der Mauer ausgegangen.

Die kritische Höhe h_{krit} ist neben den äußeren Einwirkungen auch von den gewählten Modellansätzen, der Netzdiskretisierung und den modellinternen Steuerparametern abhängig. Diese

Größe ist daher als fiktive Größe zu interpretieren, die den Zweck erfüllt, die zu untersuchenden Schädigungsprozesse hinsichtlich der Standsicherheit vergleichen zu können. Eine reelle Mauer, die die im Modell angesetzten Materialparameter aufweist, könnte unter Umständen auch bei Wasserständen versagen, die von den Rechenergebnissen im Modell abweicht, insbesondere da hier vereinfachend die Temperatureinwirkung vernachlässigt wird.

6.6.1 Simulationsablauf

Der Simulationsablauf zur Ermittlung der kritischen Überstauhöhe des geschädigten Referenzbauwerks lässt sich Abb. 6.13 entnehmen. Dabei wird nur die Auswirkung des Wasserdrucks auf die Mauerstabilität analysiert.

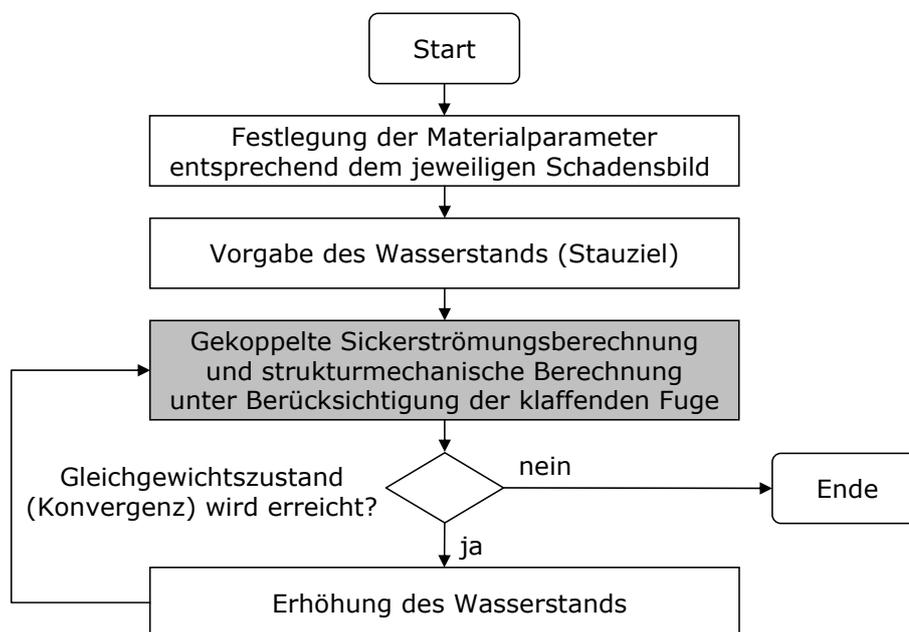


Abb. 6.13: Simulationsablauf der stationären Berechnung zur Ermittlung der kritischen Überstauhöhe des geschädigten Referenzbauwerks

- Zu Beginn werden, wie in Abschnitt 6.4 erläutert, die dem jeweiligen Schadensbild zugehörigen Materialparameter und Randbedingungen festgelegt.
- Im ersten Simulationsschritt befindet sich der Wasserspiegel auf Niveau des Stauziels. Es erfolgt eine gekoppelte Sickerströmungs- und strukturmechanische Berechnung nach Abschnitt 6.1.7.
- Konvergiert das Lösungsverfahren der numerischen Berechnung, so wird davon ausgegangen, dass die geschädigte Mauer diesem Wasserstand widerstehen kann. Der Wasserspiegel wird daraufhin um 10 cm erhöht und die Berechnung erneut durchgeführt.
- Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis sich die globalen Ungleichgewichtskräfte nicht mehr umlagern lassen und in Folge dessen die Simulation abbricht.
- Der letzte Wasserstand, der zu einer konvergierenden Lösung führt, dient daraufhin zur Festlegung der kritischen Überstauhöhe h_{krit} .

6.6.2 Ergebnisse der Simulation des Staumauerversagens für das Referenzbauwerk im Normalzustand

Wird bei der idealisierten Mauer ohne Untergrunddrainage sukzessive der Wasserstand erhöht, so wird ab einer kritischen Überstauhöhe von 4,6 m keine numerische Konvergenz mehr erreicht. Die während des Versagens auftretende Bewegung des Absperrbauwerks gegenüber dem Untergrund geht aus Abb. 6.14 hervor.

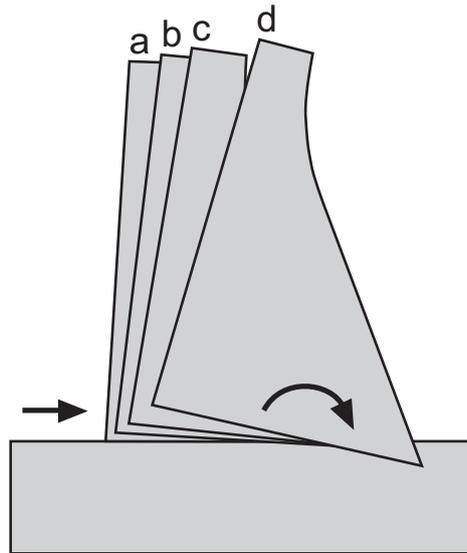


Abb. 6.14: Darstellung der Bewegung der Mauer ohne Untergrunddrainage für verschiedene Belastungszustände (a: Stauziel, b: Kronenstau, c: 2,0 m überstaute Krone, d: 4,6 m überstaute Krone)

Zur Veranschaulichung des dabei eintretenden Versagensmechanismus ist die plastische Dehnung infolge der Zugbeanspruchung für verschiedene Belastungszustände in Abb. 6.15 abgebildet. Um sowohl bei geringen als auch bei großen Stauhöhen die plastisch aktiven Bereiche darstellen zu können, wird eine exponentielle Skalierung gewählt.

Bei hoher hydrostatischer Belastung treten im luft- und im wasserseitigen Bereich der Sohl- fuge plastische Deformationen auf. Insbesondere der wasserseitige Bereich breitet sich bei zunehmender Belastung in Richtung Untergrund aus (klaffende Fuge). Darüber hinaus sind an der Kontaktfläche zwischen Mauer und Fels plastische Verformungen feststellbar. Sobald sich zwischen dem Absperrbauwerk und dem Untergrund eine durchgehend plastisch aktive Zone ausgebildet hat, kommt es zum Versagen der Mauer. Dabei vollzieht die Mauer zunächst eine gleitende Bewegung in Richtung Luftseite. Bei weiterer Lastzunahme ist zudem ein gewisser kippender Bewegungsanteil feststellbar.

6.6.3 Ergebnisse der Simulation des Staumauerversagens unter Berücksichtigung der Staumauerschäden

Im Folgenden werden die Auswirkungen der Staumauerschäden auf die kritische Überstauhöhe beschrieben. Die zugehörigen Werte lassen sich für das Referenzbauwerk ohne Untergrund-

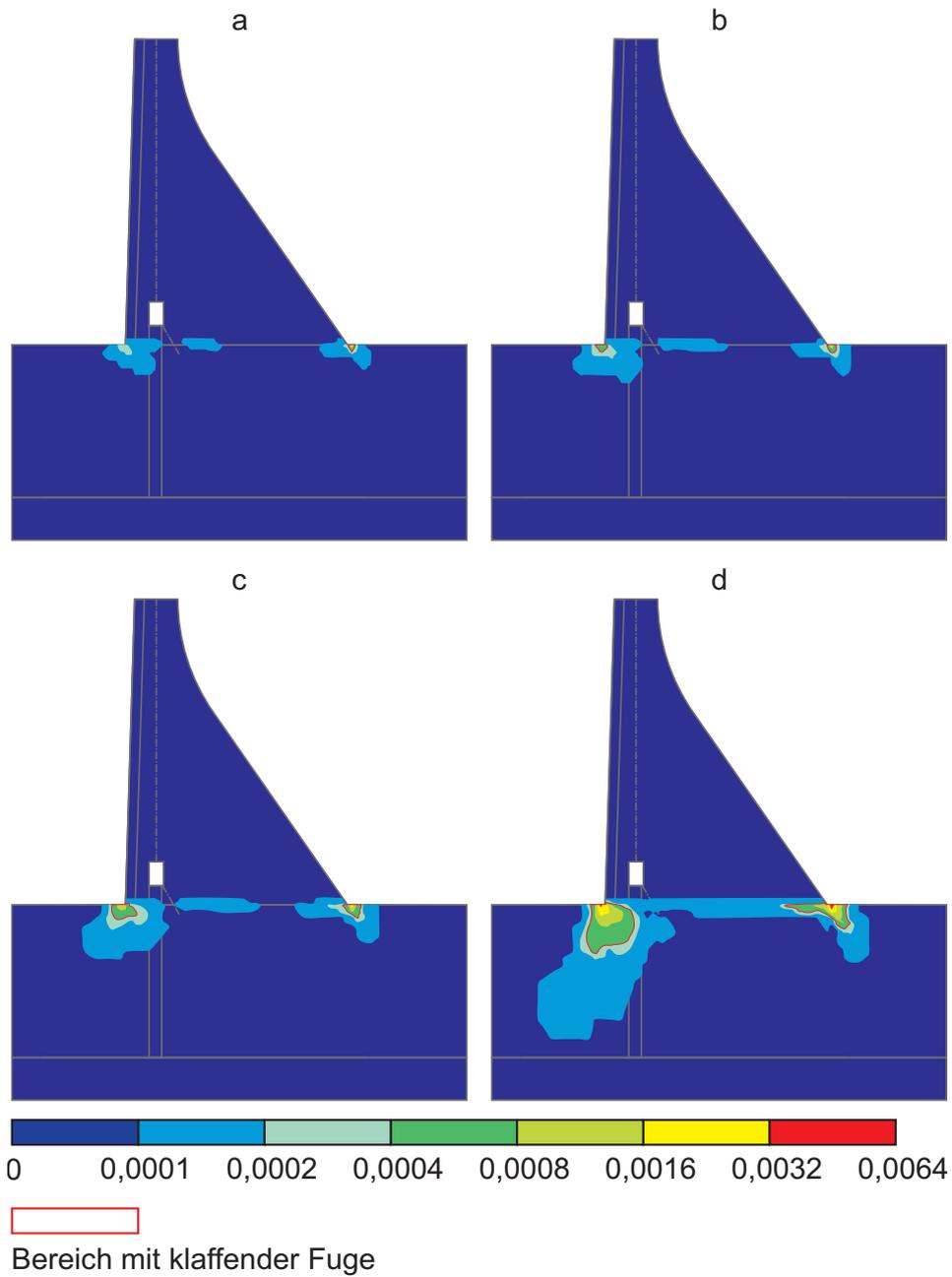


Abb. 6.15: Darstellung der plastischen Dehnung infolge der Zugbeanspruchung für verschiedene Belastungszustände der Mauer ohne Untergrunddrainage (a: Stauziel, b: Kronenstau, c: 2,0 m überstaute Krone, d: 4,6 m überstaute Krone)

drainage Abb. 6.16 entnehmen. Die Simulationsergebnisse der Mauer mit Untergrunddrainage sind in Abb. 6.17 dargestellt.

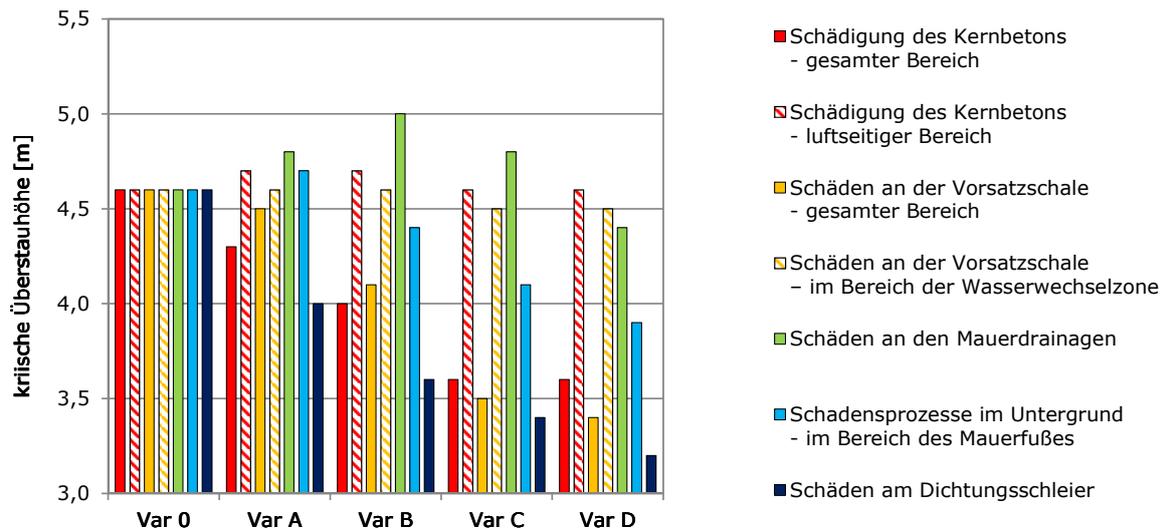


Abb. 6.16: Kritische Überstauhöhe des geschädigten Referenzbauwerks ohne Untergrunddrainage

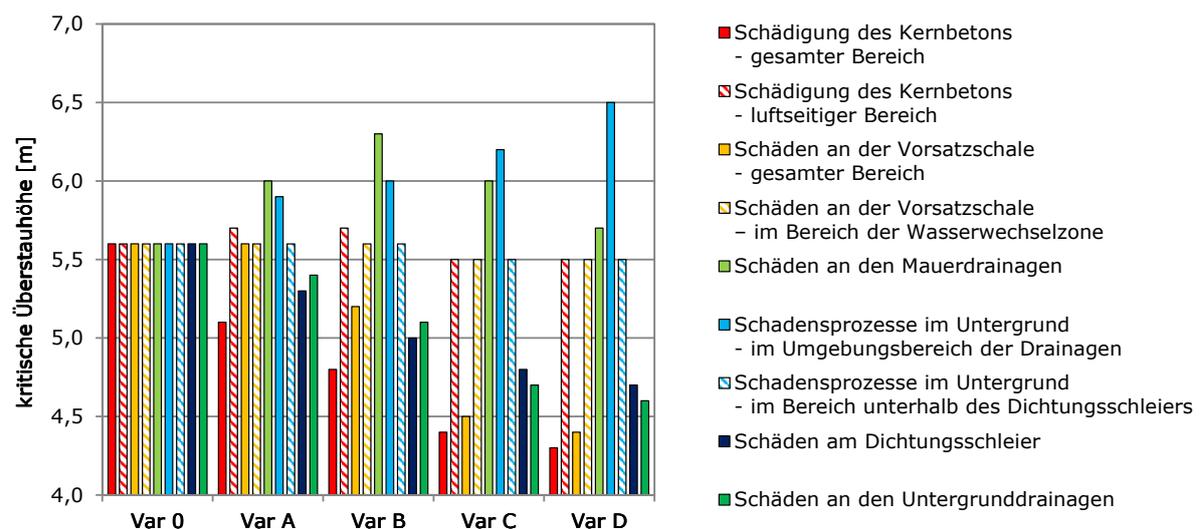


Abb. 6.17: Kritische Überstauhöhe des geschädigten Referenzbauwerks mit Untergrunddrainage

Schädigung des Kernbetons - gesamter Bereich

Der erhöhte Durchlässigkeitsbeiwert des Kernbetons bewirkt eine verbesserte Entwässerung der Mauer im Bereich der Drainagen, was sich auf Grund der reduzierten Auftriebskräfte positiv auf die Standsicherheit der Mauer auswirkt. Dagegen führen die mit der Schädigung verbundenen reduzierten Festigkeitsparameter zu einer deutlichen Zunahme der plastischen Verformungen am luftseitigen Mauerfuß. Im Vergleich zum Referenzzustand tritt daher bei geschädigtem Kernbeton ein Mauerversagen bei geringeren Wasserständen ein.

Schädigung des Kernbetons - luftseitiger Bereich

Auf den luftseitigen Mauerbereich begrenzte Betonschäden haben keine wesentliche Auswirkung auf die Standsicherheit der Mauer.

Schäden an der Vorsatzschale - gesamter Bereich

Großräumige Schäden an der Vorsatzschale führen zu einer stärkeren Bauwerksdurchströmung und einem deutlichen Anstieg der Sickerlinie. Die damit verbundene Zunahme der Auftriebskräfte insbesondere im wasserseitigen Mauerbereich reduziert die Standsicherheit der Mauer.

Schäden an der Vorsatzschale - im Bereich der Wasserwechselzone

Beschränken sich die Schäden an der Vorsatzschale der Mauer lediglich auf den Bereich der Wasserwechselzone, so reduziert sich die kritische Überstauhöhe nur geringfügig. Da die hydraulischen Gradienten im oberen Mauerbereich relativ gering sind, ist der Sickerwasserzutritt in die Mauer nur leicht erhöht. Über die Mauerdrainagen kann das eindringende Wasser ausreichend gut abgeführt werden, so dass sich die Sickerlinie und damit die Auftriebskräfte nicht wesentlich ändern.

Schäden an den Mauerdrainagen

Eine eingeschränkte Wirksamkeit der Drainagen führt zu einer großräumigeren Durchströmung der Mauer. Im Gegensatz zu den Schäden an der Vorsatzschale ändert sich die Lage der Sickerlinie bei leichten Schäden vornehmlich im luftseitigen Bereich der Mauer. Die hier auftretenden Auftriebskräfte wirken einer kippenden Bewegung der Mauer entgegen und führen folglich nicht zu einer Reduktion der Standsicherheit. Erst bei größeren Schäden ist auch der wasserseitige Teil der Mauer betroffen. Da nun weite Bereiche der Mauer unter Auftrieb stehen reduziert sich die Gleitsicherheit. Dennoch hat der Ausfall der Mauerdrainagen im Modell keine deutlichen Folgen auf die Versagenswahrscheinlichkeit der Mauer.

Schadensprozesse im Untergrund - im Bereich des Mauerfußes

Die infolge der Erosion im Bereich des Mauerfußes auftretende Erhöhung der Materialdurchlässigkeit hat eine positive Auswirkung auf die Standsicherheit der Mauer, da sich der Potentialabbau auf die Wasserseite konzentriert. Da jedoch die Erosion auch zu einer Reduktion der Scherfestigkeit führt, versagt die Mauer bei stärkerer Ausprägung dieses Schadensbildes im Vergleich zum Normalzustand schon bei einer geringeren Überstauhöhe.

Schadensprozesse im Untergrund - im Umgebungsbereich der Drainagen

Da sich infolge einer Erosion der Kluftfüllungen im Bereich der Untergrunddrainagen die Drainagewirkung verbessert und somit der Sohlwasserdruck reduziert wird, wirkt sich dieser Schadensprozess positiv auf die Standsicherheit der Mauer aus.

Schadensprozesse im Untergrund - im Bereich unterhalb des Dichtungsschleiers

Die Erosion im Bereich unterhalb des Dichtungsschleiers wirken sich nur schwach auf die Unterströmung des Absperrbauwerks aus. Folglich sind die negativen Auswirkungen auf Standsicherheit der Mauer nur minimal.

Schäden am Dichtungsschleier

Schäden am Dichtungsschleier und die damit verbundene Zunahme des Sohlwasserdrucks führen zu einer deutlichen Reduktion der Standsicherheit.

Schäden an den Untergrunddrainagen

Eine eingeschränkte Funktionstüchtigkeit der Untergrunddrainagen führt zu einer Zunahme der Sohlwasserdrücke. Ein Mauerversagen tritt daher schon bei einer deutlich geringeren kritischen Überstauhöhe ein.

Maßgebliche bauliche Einrichtungen der idealisierten Gewichtsstaumauer

Bei der Durchführung der Standsicherheitsberechnungen von Talsperren nach DIN 19700-11 (2004) kann bei der Tragwiderstandsbedingung B die eingeschränkte Wirksamkeit einer maßgeblichen baulichen Einrichtung bzw. bei der Tragwiderstandsbedingung C der Ausfall einer maßgeblichen baulichen Einrichtung angesetzt werden. Im Falle der idealisierten Talsperre zeigt sich, dass bei der Bauweise ohne Untergrunddrainage vor allem der Dichtungsschleier aber auch die wasserseitige Vorsatzschale eine maßgebliche Bauwerkskomponente ist. Bei der Mauer mit Untergrunddrainage ist die wasserseitige Vorsatzschale sehr wichtig. Darüber hinaus wirkt sich auch ein Ausfall der Untergrunddrainage oder des Dichtungsschleiers signifikant auf die Standsicherheit aus. Der Ausfall der Mauerdrainagen spielt dagegen bei beiden Bauformen kaum eine Rolle.

7 Bayessche Netze zur Interpretation von Talsperrenüberwachungsdaten

In diesem Kapitel werden die beiden Bayesschen Netze beschrieben, welche die Basis für die Interpretation von Talsperrenüberwachungsdaten bilden. Die hierfür zu Grunde liegenden statistischen Grundlagen sind in Abschnitt 2.5 erläutert.

7.1 Literaturbeispiele zu Bayesschen Netzen von Stauanlagen

Einführend werden in diesem Abschnitt einige Publikationen zu Bayesschen Netzen von Stauanlagen kurz vorgestellt, um einen Einblick in den aktuellen Stand der Wissenschaft in diesem Bereich zu geben.

Für die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit, insbesondere von Dämmen, werden immer häufiger Bayessche Netze herangezogen, da sich die dabei zu Grunde liegenden komplexen Zusammenhänge anschaulich visualisieren lassen und sich damit auch eine Auswertung von zusätzlichen Vorinformationen einfach realisieren lässt. Weitere Ziele sind dabei die Identifikation von Faktoren, die sich signifikant auf die Anlagensicherheit auswirken sowie die Bewertung der Effektivität denkbarer Instandsetzungsmaßnahmen, um daraus eine Priorisierung ableiten zu können.

Die Ursachen für ein Dammversagen sind vielfältig. Li und Liang (2016) fokussieren sich auf das Versagen eines Dammes in Folge einer Überströmung. Auslöser hierfür sind extreme Hochwasserereignisse, Hangrutschungen oder der Versagensfall einer oberstrom befindlichen Talsperre.

In Franke und Gebler (2012) wird ebenfalls ein Dammversagen infolge einer Überströmung, jedoch für ein Pumpspeicherbecken untersucht. Dabei stellen die Funktionstüchtigkeit diverser Entnahmeeinrichtungen, der Hochwasserzufluss, die Ausgangswasserspiegellage im Becken sowie die Stärke des Windes wesentliche Netzknoten dar, die die Überflutungssicherheit beeinflussen.

In Ma u. a. (2014) wird rein die Ausfallwahrscheinlichkeit der Verschlussorgane der Hochwasserentlastungseinrichtungen eines Dammes an Hand eines Bayesschen Netzes analysiert.

Bei Zhang u. a. (2017) und Rao und Babu (2015) wird als Versagensursache die innere Erosion des Dammkörpers und Sickerrohrenbildung näher analysiert. Die Eingangsknoten repräsentieren unter anderem die Dammbmessungen, den Dammaufbau, die Dammbaustoffe und verschiedene Überwachungsmerkmale.

Einige Autoren bilden oben genannte Dammversagensursachen in einem gemeinsamen Netz ab, um die Gesamtwahrscheinlichkeit für einen Dammbruch ermitteln zu können. Die Bandbreite reicht dabei von sehr einfachen Netzen mit wenigen Knoten, wie in Choi und Kwon (2014), Delgado-Hernández u. a. (2014) oder Li u. a. (2009), bis hin zu größeren Netzen (Smith (2006) und Zhang u. a. (2017)). In Franke (2013) wird die Versagenswahrscheinlichkeit einer ganzen Staustufe samt Stauhaltungsdämmen und Wehranlage untersucht. Dieses

komplexe Netz besteht aus 66 Knoten. Jong und Leu (2013) entwickeln ein Netz aus insgesamt 120 Knoten, um die Funktionsweise einer Wasserkraftanlage abzubilden. Dieses Bayessche Netz dient als Fehlerdiagnosesystem, um kritische Anlagenkomponenten zu identifizieren und um daraus geeignete Instandhaltungsstrategien abzuleiten.

Darüber hinaus werden Bayessche Netze auch verwendet, um die Auswirkung einer Talsperrenkatastrophe auf die unterstrom befindliche Bevölkerung oder Sachgüter bewerten zu können. Als Beispiel seien hier Zhang u. a. (2017), Delgado-Hernández u. a. (2014) und Straub (2008) genannt.

Wesentlich für die Aussagekraft der Berechnungsergebnisse von Bayesschen Netzen sind die in den Knotentabellen hinterlegten bedingten Wahrscheinlichkeiten. Diese werden auf unterschiedliche Weisen erhoben:

- Befragung von ausgewiesenen Fachexperten ((Delgado-Hernández u. a., 2014), Jong und Leu (2013)) oder durch Auswertung breit gestreuter Umfragebögen (Franke und Wieprecht, 2012),
- statistische Auswertungen von in Datenbanken hinterlegten historischen Versagensfällen (Rao und Babu (2015), Zhang u. a. (2017)),
- Verwendung von Literaturangaben zu Ausfallwahrscheinlichkeiten von Anlagenkomponenten (Franke, 2011) oder die Auswertung realer Betriebsdaten (Jong und Leu, 2013),
- Herleitung aus einfachen mathematischen oder statistischen Berechnungen bis hin zu aufwändigen Monte Carlo Simulationen (Li und Liang, 2016) oder der Verwendung von stetigen Knotenfunktionen basierend einer Copula-Statistik (Delgado-Hernández u. a., 2014).

Ziel dieser Arbeit ist es, unter Berücksichtigung der durch die Talsperrenüberwachung vorliegenden Messdaten, auf den Bauwerkszustand einer Gewichtsstaumauer zu schließen.

Die dafür in dieser Arbeit entwickelten Bayesschen Netze unterscheiden sich von den Netzen oben genannter Autoren durch folgende Gesichtspunkte:

- Es werden Gewichtsstaumauern und keine Dämme untersucht.
- Der Fokus liegt nicht auf dem Talsperrenversagen selbst, sondern es ist von Interesse ob ein Schaden vorliegt.
- Neben der statistischen Auswertung historischer Schadensfälle werden die bedingten Wahrscheinlichkeiten aus Rechenergebnissen von Finite-Elemente Simulationen hergeleitet.
- Es werden unterschiedliche Messgeräte berücksichtigt und konkrete Messwerte als Informationsquelle für den Anlagenzustand verwendet.

7.2 Netzaufbau

Wie in Abschnitt 5.3 beschrieben, unterscheiden sich Gewichtsstaumauern mit und ohne Untergrunddrainagen in Bezug auf den zu erwartenden Messwertbereich grundlegend voneinander. Daher werden diese beiden Ausführungsvarianten differenziert betrachtet und entsprechend zwei unterschiedliche Netze angelegt. Abb. 7.1 zeigt das Netz für eine Mauer ohne Untergrunddrainagen und Abb. 7.2 für eine Mauer mit Untergrunddrainagen.

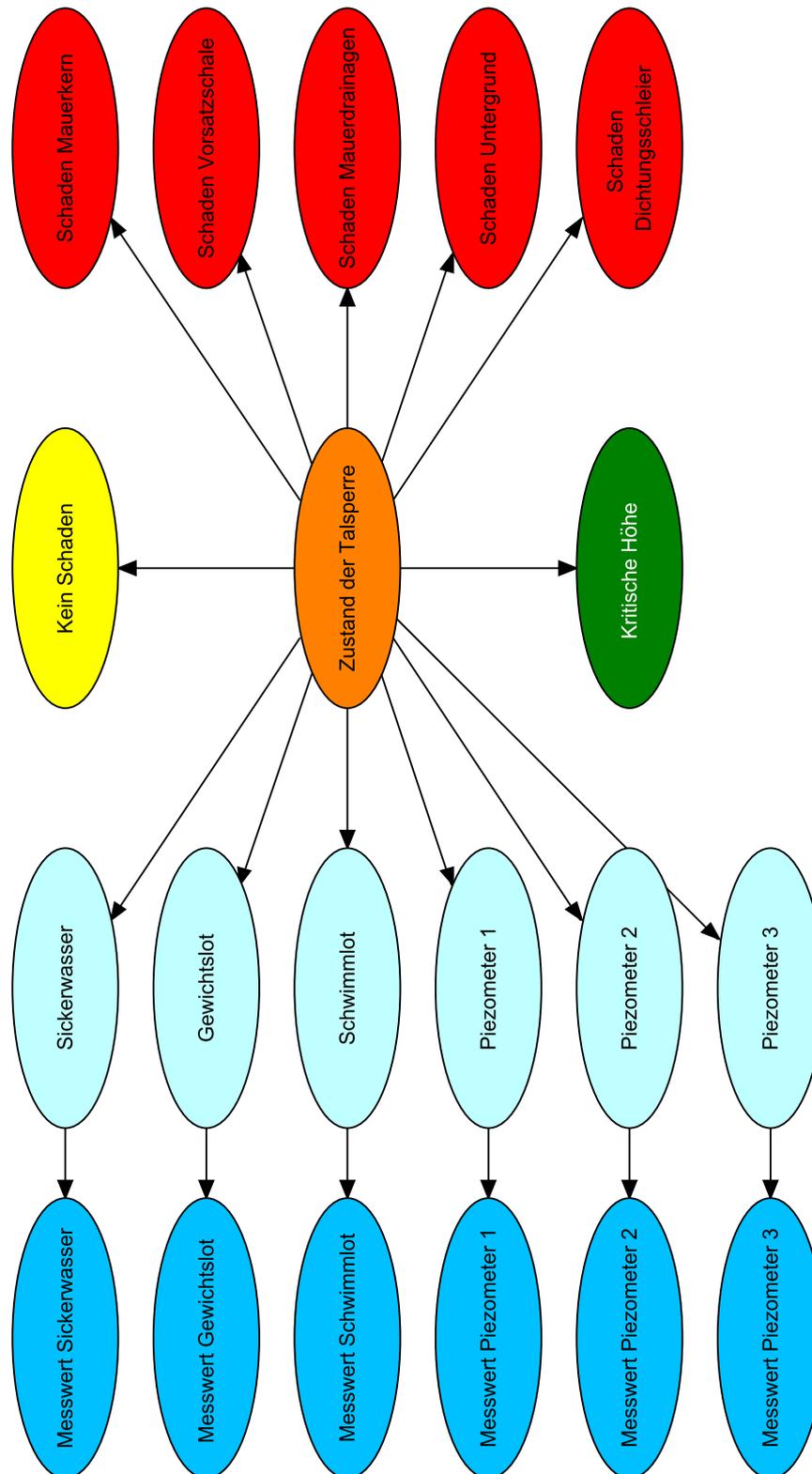


Abb. 7.1: Bayessches Netz zur Interpretation von Überwachungsdaten von Gewichtstaumauern ohne Untergrunddrainage

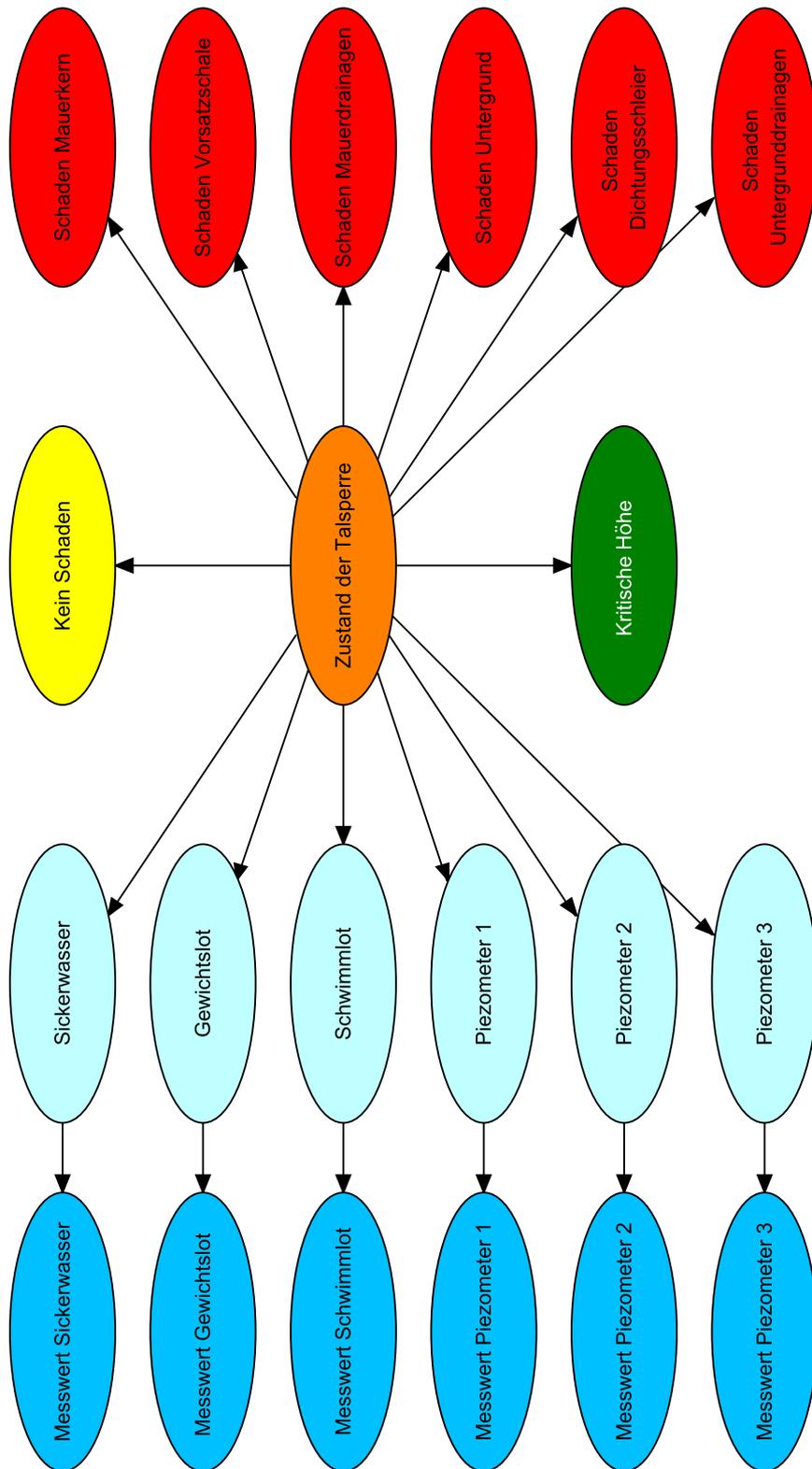


Abb. 7.2: Bayessches Netz zur Interpretation von Überwachungsdaten von Gewichtstaumauern mit Untergrunddrainage

7.3 Beschreibung der Variablen

Die Netze bestehen im Wesentlichen aus Knoten, die den Zustand der Talsperre beschreiben und Knoten, die das Verhalten der Talsperre anhand von Messdaten zeigen.

7.3.1 Knoten *Zustand der Talsperre*

Der Knoten *Zustand der Talsperre* ist in Abb. 7.1 und Abb. 7.2 in orange dargestellt. Dieser Knoten hat keine Elternknoten und bildet somit den zentralen Knoten des Bayesschen Netzes.

Die durch eine messtechnische Überwachung von Gewichtsstauwauern identifizierbaren Schadensszenarien sind in Abschnitt 6.4 beschrieben und werden im Finite-Elemente-Modell der idealisierten Talsperre analysiert. Diese Szenarien stellen mögliche geschädigte Zustände des Bauwerks dar. Alle anderen Zustände werden vereinfachend unter der Bezeichnung „kein Schaden“ zusammengefasst - auch wenn, wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben, weitere Schadensursachen für Talsperren existieren.

Bayessches Netz der Gewichtsstauwand ohne Untergrunddrainagen

Die im Knoten *Zustand der Talsperre* des Bayesschen Netzes der Gewichtsstauwand ohne Untergrunddrainage betrachteten Zustände sind in Tab 7.1 aufgeführt. Die jeweils zugehörigen Auftretenswahrscheinlichkeiten werden unter Anwendung von Gl. 2.39 in Anlehnung an die in Abschnitt 3.2 beschriebene statistische Auswertung historischer Schadensereignisse ermittelt.

Etwa 55 % der Gewichtsstauwauern in Deutschland besitzen keine Untergrunddrainagen (vgl. S. 50). Die Grundgesamtheit n_{tot} für diese Mauern leitet sich aus der auf S. 38 mit 172.300 festgelegten Anzahl der Betriebsjahre aller Talsperren ab.

$$n_{tot} = 0,55 \cdot 172.300 = 94.765 \quad (7.1)$$

Wie aus Tab. 3.2 hervorgeht, sind in der Vergangenheit 50 + 31 Schadensereignisse aufgetreten, die auf eine Schädigung des Mauerkerne zurückzuführen sind. Es wird die Annahme getroffen, dass bei 25 % der Talsperren der gesamte Mauerkerne betroffen ist (KG) und sich der Schaden bei 75 % der Mauern auf die luftseitige Maueroberfläche beschränkt (KL). Die zugehörigen Auftretenswahrscheinlichkeiten ermitteln sich somit wie folgt:

$$P(KG) = \frac{0,25 \cdot 81 \cdot 0,55}{n_{tot}} = 1,18 \cdot 10^{-4} \quad (7.2)$$

$$P(KL) = \frac{0,75 \cdot 81 \cdot 0,55}{n_{tot}} = 3,53 \cdot 10^{-4} \quad (7.3)$$

Rund 60 historische Schadensereignisse sind auf Mängel an der wasserseitigen Vorsatzschale zurückzuführen (vgl. Tab. 3.2). Es wird die Annahme getroffen, dass bei 25 % der Talsperren die gesamte Vorsatzschale und bei 75 % der Sperren lediglich der Bereich der Wasserwechselzone betroffen ist. Somit gilt:

$$P(VG) = \frac{0,25 \cdot 60 \cdot 0,55}{n_{tot}} = 8,71 \cdot 10^{-5} \quad (7.4)$$

Tab. 7.1: Auftretenswahrscheinlichkeit der im Netz für Gewichtsstaumauern ohne Untergrunddrainagen berücksichtigten Talsperrenschädigungen in Anlehnung an Douglas u. a. (1998)

Zustandsbeschreibung	Abkürzung	Auftretenswahrscheinlichkeit [1/a]
Schädigung des gesamten Mauerkerne	KG	1,18E-04
Schädigung der luftseitigen Maueroberfläche	KL	3,53E-04
Schädigung des gesamten Bereichs der wasserseitigen Vorsatzschale	VG	8,71E-05
Schäden an der wasserseitigen Vorsatzschale im Bereich der Wasserwechselzone	VW	2,61E-04
Schäden an den Mauerdrainagen	MD	1,86E-04
Schadensprozesse im Untergrund im Bereich des Mauerfußes	UF	3,13E-04
Schäden am Dichtungsschleier	DS	2,32E-05
Kein Schaden	KS	9,99E-01

$$P(VW) = \frac{0,75 \cdot 60 \cdot 0,55}{n_{tot}} = 2,61 \cdot 10^{-4} \quad (7.5)$$

Über Schäden an den Mauerdrainagen finden sich keine Angaben in der Auswertung von Douglas u. a. (1998). Es wird angenommen, dass diese doppelt so häufig geschädigt sind als Untergrunddrainagen, über die 16 Vorfälle dokumentiert sind. Somit ergibt sich:

$$P(MD) = \frac{2 \cdot 16 \cdot 0,55}{n_{tot}} = 1,86 \cdot 10^{-4} \quad (7.6)$$

Gemäß Tab. 3.2 sind 48 + 6 Ereignisse auf Schadensprozesse im Untergrund zurückzuführen. Bei Mauern ohne Untergrunddrainagen handelt es sich dabei vornehmlich um Erosionsprozesse im Bereich des Mauerfußes (vgl. Abb. 6.10). Es gilt:

$$P(UF) = \frac{54 \cdot 0,55}{n_{tot}} = 3,13 \cdot 10^{-4} \quad (7.7)$$

Nach Douglas u. a. (1998) traten bei 4 Talsperren Schäden am Dichtungsschleier auf. $P(DS)$ berechnet sich daher wie folgt:

$$P(DS) = \frac{4 \cdot 0,55}{n_{tot}} = 2,32 \cdot 10^{-5} \quad (7.8)$$

Alle anderen Mauerzustände werden als „kein Schaden“ deklariert. Die Wahrscheinlichkeit beträgt:

$$P(KS) = 1 - P(KG) - P(KL) - P(VG) - P(VW) - P(MD) - P(UF) - P(DS) = 9,99 \cdot 10^{-1}$$

(7.9)

In der FE-Simulation in Abschnitt 6.4 werden für jeden Schadensprozess jeweils vier Varianten A bis D mit unterschiedlichem Schädigungsgrad untersucht. Die in Tab. 3.2 aufgeführten Wahrscheinlichkeiten werden daher gleichmäßig auf die einzelnen Varianten verteilt. Die finale Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Zustand der Talsperre* des Bayesschen Netzes der Gewichtsstaumauer ohne Untergrunddrainagen ist im Anhang auf S. 193 in Tab. G.1 abgebildet.

Bayessches Netz der Gewichtsstaumauer mit Untergrunddrainagen

Die im Knoten *Zustand der Talsperre* des Bayesschen Netzes der Gewichtsstaumauer mit Untergrunddrainagen betrachteten Zustände sind in Tab. 7.2 aufgeführt. Die hierbei zugrundeliegende Grundgesamtheit ist:

$$n_{tot} = 0,45 \cdot 172.300 = 77.535 \quad (7.10)$$

Tab. 7.2: Auftretenswahrscheinlichkeit der im Netz für Gewichtsstaumauern mit Untergrunddrainagen berücksichtigten Talsperrenschädigungen in Anlehnung an Douglas u. a. (1998)

Zustandsbeschreibung	Abkürzung	Auftretenswahrscheinlichkeit [1/a]
Schädigung des gesamten Mauerkerne	KG	1,18E-04
Schädigung der luftseitigen Maueroberfläche	KL	3,53E-04
Schädigung des gesamten Bereichs der wasserseitigen Vorsatzschale	VG	8,71E-05
Schäden an der wasserseitigen Vorsatzschale im Bereich der Wasserwechselzone	VW	2,61E-04
Schäden an den Mauerdrainagen	MD	1,86E-04
Schadensprozesse im Untergrund im Bereich der Drainagen	UD	1,57E-04
Schadensprozesse im Untergrund im Bereich des Dichtungsschleiers	US	1,57E-04
Schäden am Dichtungsschleier	DS	2,32E-05
Schäden an den Untergrunddrainagen	DU	2,06E-04
Kein Schaden	KS	9,98E-01

Die jeweiligen Einzelwahrscheinlichkeiten für die unterschiedlichen Schadensszenarien errechnen sich analog zur Mauer ohne Untergrunddrainage. Unterschiede ergeben sich dadurch,

dass bei Erosionsprozessen im Untergrund zwischen dem Bereich der Untergrunddrainagen und dem Bereich des Dichtungsschleiers differenziert wird. Eine Erosion im Bereich des Mauerfußes ist für diesen Sperrtyp dagegen nicht zu erwarten (vgl. Abb. 6.11). Die 54 Ereignisse aus Tab. 3.2 werden dabei gleichmäßig auf diese beiden Szenarien aufgeteilt.

$$P(UD) = P(US) = \frac{54 \cdot 0,45 \cdot 0,5}{n_{tot}} = 1,57 \cdot 10^{-4} \quad (7.11)$$

Darüber hinaus ist auch eine Schädigung der Untergrunddrainagen möglich, die sich auf Basis der in Tab. 3.2 dokumentierten 16 Fälle wie folgt berechnet:

$$P(DU) = \frac{16}{n_{tot}} = 1,18 \cdot 10^{-4} \quad (7.12)$$

Die finale Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Zustand der Talsperre* des Bayesschen Netzes der Gewichtsstaumauer mit Untergrunddrainagen unter Berücksichtigung der 4 Variationen des Schädigungsgrades ist im Anhang auf S.210 in Tab.G.21 abgebildet.

7.3.2 Knoten *kein Schaden*

Der Knoten *kein Schaden* dient der Auswertung des Bayesschen Netzes und ist in den Abbildungen Abb. 7.1 und Abb. 7.2 in gelb dargestellt. Er besitzt die beiden Zustände *ja* und *nein*. Sein Vorgängerknoten ist der Knoten *Zustand der Talsperre*.

Liegen keine Vorinformation vor, so entspricht die Wahrscheinlichkeit, dass die Mauer nicht geschädigt ist, den in Tab. 7.1 bzw. in Tab. 7.2 angegebenen Werten für *KS*. Sind dagegen Informationen über Messwerte vorhanden, ändert sich die Knotenwahrscheinlichkeit im Netz.

Die dem Knoten zugehörige Wahrscheinlichkeitstafel ist für die Gewichtsstaumauer ohne Untergrunddrainagen im Anhang auf S. 193 in Tab. G.2 dargestellt. Für Gewichtsstaumauern mit Untergrunddrainagen ist diese im Anhang auf S. 210 in Tab. G.22 zu finden.

7.3.3 Knoten für Mauerschäden

Die Knoten, die die Schadensbilder der Gewichtsstaumauer repräsentieren, sind in Abb. 7.1 und Abb. 7.2 rot dargestellt. Sie weisen die Zustände *ja* und *nein* auf. Der Vorgängerknoten ist jeweils der Knoten *Zustand der Talsperre*.

Bayessches Netz der Gewichtsstaumauer ohne Untergrunddrainagen

Der Knoten *Schaden Mauerkerne* fasst die Schadensbilder *KG* und *KL* aus Tab. 7.1 zusammen. Die zugehörige Wahrscheinlichkeitstafel ist im Anhang auf S. 194 in Tab. G.3 dargestellt.

Der Knoten *Schaden Vorsatzschale* beinhaltet die Schadensbilder *VG* und *VW* aus Tab. 7.1. Die zugehörige Wahrscheinlichkeitstafel ist im Anhang auf S. 194 in Tab. G.4 aufgeführt.

Die bedingte Wahrscheinlichkeitstafel des Knotens *Schaden Mauerdrainagen* ist im Anhang auf S. 195 in Tab. G.5 abgebildet.

Die bedingte Wahrscheinlichkeitstabelle des Knotens *Schaden Untergrund* ist im Anhang auf S. 195 in Tab. G.6 abgedruckt.

Die bedingte Wahrscheinlichkeitstafel des Knotens *Schaden Dichtungsschleier* ist im Anhang auf S. 196 in Tab. G.7 dargestellt.

Bayessches Netz der Gewichtsstaumauer mit Untergrunddrainagen

Die bedingten Wahrscheinlichkeitstafeln der Knoten, die die Schadensbilder der Gewichtsstaumauer mit Untergrunddrainagen repräsentieren, sind im Anhang in den Tabellen Tab. G.23 bis Tab. G.28 abgebildet.

Unterschiede im Vergleich zur Mauer ohne Untergrunddrainage bestehen darin, dass der Knoten *Schaden Untergrund* die beiden Schadensbilder *UD* und *US* aus Tab. 7.2 zusammenfasst. Darüber hinaus besitzt das Netz den zusätzlichen Knoten *Schaden Untergrunddrainagen*.

7.3.4 Knoten *Kritische Höhe*

Der Knoten *Kritische Höhe* ist in Abb. 7.1 und Abb. 7.2 grün dargestellt und besitzt den Vorgängerknoten *Zustand der Talsperre*.

In Abschnitt 6.6 werden Simulationsläufe zur Berechnung des Versagens unterschiedlich geschädigter Gewichtsstaumauern durchgeführt. Dabei wird als Kriterium zur Beurteilung der Talsperrensicherheit die kritische Überstauhöhe h_{krit} eingeführt. Diese fiktive Größe wird als Differenz zwischen der Wasserspiegellage, bei deren Überschreitung ein Versagen der Mauer im numerischen Modell eintreten würde, und der Lage der Mauerkrone definiert. Die Rechenergebnisse sind auf S. 111 in Abb. 6.16 bzw. Abb. 6.17 dargestellt und bilden die Basis für die Belegung der Wahrscheinlichkeitstafel des Knotens *Kritische Höhe*.

Für den Knoten *Kritische Höhe* des Netzes für die Gewichtsstaumauern ohne Untergrunddrainagen werden 10 Zustände in 20 cm Schritten zwischen 3,15 m und 5,15 m kritischer Überstauhöhe definiert. Die bedingte Wahrscheinlichkeitstafel des Knotens basiert auf Finite-Elemente-Berechnungen und ist im Anhang auf S. 197 in Tab. G.8 dargestellt.

Gemäß den Berechnungen haben Gewichtsstaumauern mit Untergrunddrainagen ein etwas höheres Sicherheitsniveau. Für den Knoten *Kritische Höhe* werden für diesen Fall 12 Zustände in 20 cm Schritten zwischen 4,15 m und 6,55 m festgelegt. Die zugehörige Knotentabelle ist im Anhang auf S. 217 in Tab. G.29 zu finden.

7.3.5 Knoten für Messgeräte

Die Knoten, die die in der idealisierten Talsperre installierten Messeinrichtungen repräsentieren, sind in den Abb. 7.1 und Abb. 7.2 in hellblau dargestellt. Der Vorgängerknoten ist jeweils der Knoten *Zustand der Talsperre*.

Im Abschnitt 6.5 werden die FE-Berechnungen zur Generierung von Talsperrenmessdaten der geschädigten Mauer beschrieben und die wesentlichen Simulationsergebnisse erläutert. Die graphischen Darstellungen der berechneten Messdaten des Referenzbauwerks ohne bzw.

mit Untergrunddrainage sind im Anhang F abgebildet. Diese Resultate bilden die Informationsquelle für die Belegung der Wahrscheinlichkeitstafeln der Knoten für Messgeräte im Bayesschen Netz.

Beim Knoten *Sickerwasser* wird in Abhängigkeit des Schadensbildes der Talsperre der zu erwartende Sickerwasseranfall 10 verschiedenen Zuständen bzw. Intervallen zugeordnet. Die Intervallgröße orientiert sich dabei an den Rechenergebnissen der FE-Modellierung und nimmt mit zunehmendem Sickerwasseranfall zu. Wie aus der Wahrscheinlichkeitstafel für die Mauer ohne Untergrunddrainage im Anhang auf S. 198 in Tab. G.9 hervorgeht, wird hier der Bereich zwischen 0,028 l/s und 0,500 l/s abgedeckt. Die Mauern mit Untergrunddrainagen haben einen deutlich höheren Gesamtsickerwasseranfall, so dass die Intervalle größer gewählt sind und der Messbereich bis 3,0 l/s erweitert ist. Die zugehörige Wahrscheinlichkeitstafel für die Mauer mit Untergrunddrainagen ist im Anhang auf S. 218 in Tab. G.30 dargestellt.

Der Knoten *Gewichtslot* liefert Informationen über die Deformation der Mauerkrone gegenüber dem Ablesepunkt im Kontrollgang in Mauerquerrichtung. Je größer der Wert, desto stärker ist die Kippbewegung in Richtung Luftseite. Bei diesem Knoten wird die bedingte Wahrscheinlichkeitstabelle mit 10 Zuständen aufgestellt. Dabei sind die Intervalle im Erwartungsbereich der ungeschädigten Mauer am höchsten aufgelöst. Die zugehörigen Knotentabellen sind für die Mauer ohne Untergrunddrainagen im Anhang auf S. 199 in Tab. G.10 zu finden und für die Mauer mit Untergrunddrainagen im Anhang auf S. 219 in Tab. G.31 dargestellt.

Durch den Knoten *Schwimmlot* wird eine Verschiebung der Mauer entlang der Gründungssohle aufgezeigt. Je größer der Wert ist, desto stärker bewegt sich die Aufstandsfläche gegenüber dem Felsuntergrund in Richtung Luftseite. Die Wahrscheinlichkeitstafel dieses Knotens umfasst 9 Intervalle, die im Erwartungsbereich der ungeschädigten Mauer kleiner gewählt sind. Die bedingten Wahrscheinlichkeitstafeln sind für die Mauer ohne Untergrunddrainage auf S. 200 in Tab. G.11 bzw. für die Mauer mit Untergrunddrainage auf S. 220 in Tab. G.32 dargestellt.

Die Knoten *Piezometer 1*, *Piezometer 2* und *Piezometer 3* zeigen den Abbau des Sohlwasserdrucks von der Wasserseite in Richtung Luftseite. Der Messbereich wird dabei jeweils in 10 unterschiedlich große Intervalle untergliedert. Im Erwartungsbereich des Sohlwasserdrucks der ungeschädigten Mauer sind die Intervalle am kleinsten gewählt. Die bedingten Wahrscheinlichkeitstafeln der Knoten der Mauer ohne Untergrunddrainagen, sind im Anhang ab S. 201 in den Tabellen Tab. G.12 bis Tab. G.14 abgebildet. Für die Mauer mit Untergrunddrainagen finden sich die Tafeln ab S. 221 in den Tabellen Tab. G.33 bis Tab. G.35.

7.3.6 Knoten für Messwerte

Durch die Implementierung der Knoten für Messwerte wird der Bogen von den idealisierten Messwerten aus den FE-Berechnungen zu den Messdaten von realen Talsperren geschlagen. Wie in Abschnitt 6.3 dargelegt, ist der Varianzanteil der in der Umfrage erhobenen Messgrößen, der sich nicht durch die Einwirkungen aus Wasserlast und Temperatur erklären lässt, deutlich größer als der Varianzanteil der künstlichen Messdaten aus der FE-Analyse. Diese Unsicherheiten in den Messdaten wurden auf S. 74 mittels Residuenanalyse genauer untersucht. Die Residuen sind normalverteilt und weisen eine Autokorrelation auf.

Wie aus dAbb. 7.1 und Abb. 7.2 hervorgeht, werden im Bayesschen Netz dunkelblaue Knoten eingeführt, die die Messwerte darstellen. Der Vorgängerknoten ist jeweils der Knoten des zugehörigen Messgerätes.

Die Besonderheit der Knoten für Messwerte besteht darin, dass hier keine bedingte Wahrscheinlichkeitstafel mit diskreten Werten hinterlegt wird, sondern stattdessen eine statistische Verteilungsfunktion in Form einer Normalverteilung angesetzt wird. Der Lageparameter (Mittelwert) wird vom Vorgängerknoten übergeben. Der Streuparameter (Varianz) ist für den Knoten zu definieren und hängt von der Fragestellung ab.

Wird lediglich ein Messwert untersucht, können die quadrierten Standardunsicherheiten aus Tab. 5.1 verwendet werden. Werden längere Zeitreihen betrachtet, ist die Varianz mit Gl. 2.37 zu berechnen. Dabei ist n die Gesamtanzahl der Messwerte der zugrunde gelegten Zeitreihe. Der vom Überwachungsintervall abhängige Autoregressionsparameter ϕ ist Tab. 5.2 zu entnehmen.

Neben der Verteilungsfunktion sind für die Knoten noch Intervalle vorzugeben, die den gesamten Ereignisraum von $-\infty$ bis ∞ abdecken.

Die zugehörigen Knotentabellen sind für die Mauer ohne Untergrunddrainagen im Anhang ab S. 204 in den Tabellen G.15 bis G.20 zu finden und für die Mauer mit Untergrunddrainagen im Anhang ab S. 224 in den Tabellen G.36 bis G.41 dargestellt.

7.4 Nützlichkeitsknoten

Je nach Fragestellung werden bei der Berechnung mit Bayesschen Netzen Vorinformationen berücksichtigt, um deren Auswirkung untersuchen zu können. Wurde beispielsweise durch eine manuelle Messung der Sickerwasseranfall in der Talsperre bestimmt, lässt sich nun unter Berücksichtigung dieser Information im Knoten *Messwert Sickerwasser* im Knoten *Kein Schaden* ablesen, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Mauer keinen Schaden aufweist. Da die Messwertknoten auf Grund der sehr klein gewählten Intervallbreite sehr viele mögliche Zustände besitzen, ist diese Vorgehensweise jedoch sehr aufwändig.

Zur Erleichterung der Auswertung des Bayesschen Netzes werden hier sogenannte Nützlichkeitsknoten (engl. utility nodes) eingesetzt. Formal wird aus dem Netz dann ein Entscheidungsnetz und die Berechnung durch eine Nützlichkeitsfunktion ergänzt (Hugin, 2016). Für jeden Knotenzustand wird dann neben der bedingten Wahrscheinlichkeit auch der berechnete Nutzen angezeigt. Nützlichkeitsknoten werden im Programm Hugin Expert A/S durch Rauten symbolisiert. Diese Knoten müssen immer mindestens einen Elternknoten besitzen. In der Knotentabelle ist für jede Konfiguration der Zustände der Eltern ein Nützlichkeitswert anzugeben. Für jede Netzauswertung darf nur ein Nützlichkeitsknoten ergänzt werden, da sich die Nützlichkeitswerte sonst aufsummieren würden.

In Abb. 7.3 sind exemplarisch die Netzausschnitte für die Nützlichkeitsknoten *Ergebnis Kein Schaden* und *Ergebnis Kritische Höhe* dargestellt. Die Tabellen 7.3 und 7.4 zeigen die zugehörigen Knotentabellen mit den hinterlegten Nützlichkeitswerten.

Da die Nützlichkeitsknoten in diesem Anwendungsfall jedoch lediglich für die Auswertung der Netzberechnungen eingesetzt werden und weder das Ergebnis beeinflussen noch die Aussagekraft der Netzdarstellung verbessern, werden diese in den Abbildungen 7.1 und 7.2 nicht dargestellt.

Tab. 7.3: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Nützlichkeitsknoten *Ergebnis Kein Schaden* für Mauern ohne Untergrunddrainagen

Kein Schaden	ja	nein
Nützlichkeitswert [%]	100	0

Tab. 7.4: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Nützlichkeitsknoten *Ergebnis Kritische Höhe* für Mauern ohne Untergrunddrainagen

Kritische Höhe	3,2 & 3,3	3,4 & 3,5	3,6 & 3,7	3,8 & 3,9	4,0 & 4,1
Nützlichkeitswert [m]	3,25	3,45	3,65	3,85	4,05
Kritische Höhe	4,2 & 4,3	4,4 & 4,5	4,6 & 4,7	4,8 & 4,9	5,0 & 5,1
Nützlichkeitswert [m]	4,25	4,45	4,65	4,85	5,05

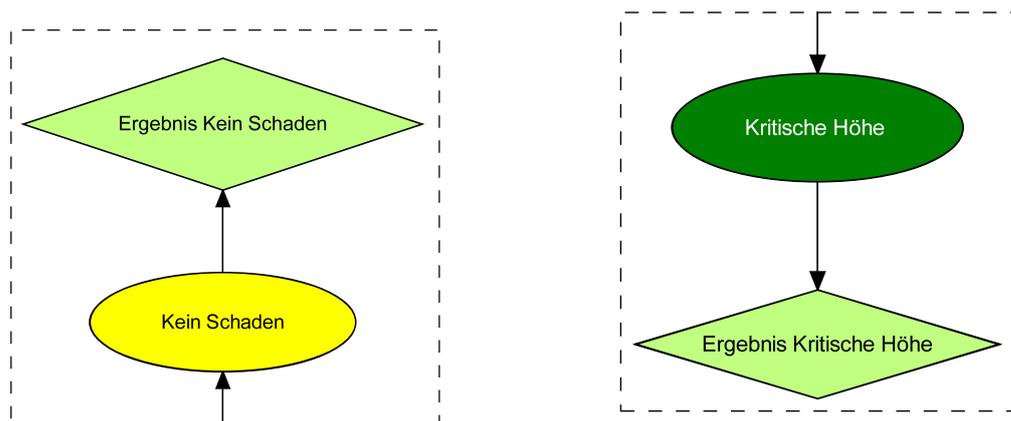


Abb. 7.3: Netzausschnitte für die Nützlichkeitsknoten *Ergebnis Kein Schaden* (links) und *Ergebnis Kritische Höhe* (rechts)

8 Auswertung der Bayesschen Netze

In diesem Kapitel werden die im vorherigen Kapitel 7 beschriebenen beiden Bayesschen Netze zur Interpretation von Talsperrenüberwachungsdaten für unterschiedliche Fragestellungen angewendet.

8.1 Auswertung einer Einzelmessung

Im ersten Schritt werden die beiden Netze herangezogen, um anhand einer Einzelmessung eine Aussage zu treffen, ob dieser Messwert auf einen außergewöhnlichen Zustand der Talsperre hindeutet. Darüber hinaus wird untersucht, welche Rückschlüsse sich aus dieser Information über das Sicherheitsniveau der Talsperre ziehen lassen.

Vorgehensweise bei der Anwendung der Bayesschen Netze

Vorab werden, wie in Abschnitt 7.3.6 beschrieben, an den sechs Messwertknoten des Bayesschen Netzes die Streuparameter (Varianz) für die hinterlegten Normalverteilungsfunktionen definiert. Da in diesem Abschnitt eine Einzelmessung ausgewertet wird, sind die quadrierten Standardunsicherheiten aus Spalte 2 der Tabelle 5.1 vorzugeben. An dieser Stelle sei nochmals betont, dass es sich bei der im Netz berücksichtigten Varianz ausschließlich um den nicht erklärbaren Anteil der Variabilität handelt, der sich somit nicht auf eine Änderung des Wasserstandes oder der Mauertemperatur zurückführen lässt.

Die Netzauswertung erfolgt über die in Abschnitt 7.4 beschriebene Vorgehensweise mit den Nützlichkeitsknoten an dem Knoten *Kein Schaden* beziehungsweise dem Knoten *Kritische Höhe*. Für jeden Zustand der Messwertknoten liefert die Berechnung Informationen mit welcher Wahrscheinlichkeit die Mauer einen Schaden aufweist bzw. bei welcher kritischen Überstauhöhe diese versagen würde.

Die Ergebnisinterpretation geschieht durch einen Vergleich des beobachteten Mauerzustandes mit dem erwarteten Mauerzustand. Um hierüber eine direkte Aussage treffen zu können, werden die Berechnungsergebnisse aus dem Bayesschen Netz auf den Normalzustand normiert. Der Erwartungswert für den Normalzustand resultiert aus der FE-Berechnung der ungeschädigten Mauer und bildet den Grundwert der Prozentrechnung. Stimmt der beobachtete Wert mit dem Erwartungswert überein, so wird ein Prozentsatz von 100 % festgelegt. Bei einer Verdopplung des beobachteten Messwertes gegenüber dem Erwartungswert beträgt der Prozentsatz folglich 200 %, halbiert sich dagegen der beobachtete Messwert, so liegt der Prozentsatz bei 50 %.

Das normierte Ergebnis der Netzberechnung für die Mauer ohne Untergrunddrainage ist in Abb. 8.1 exemplarisch für die Sickerwassermessung dargestellt. Das Ergebnis für die Mauer mit Untergrunddrainage lässt sich Abb. 8.2 entnehmen. Alle weiteren Darstellungen zu den anderen Überwachungseinrichtungen sind in der Anlage H.1 abgedruckt.

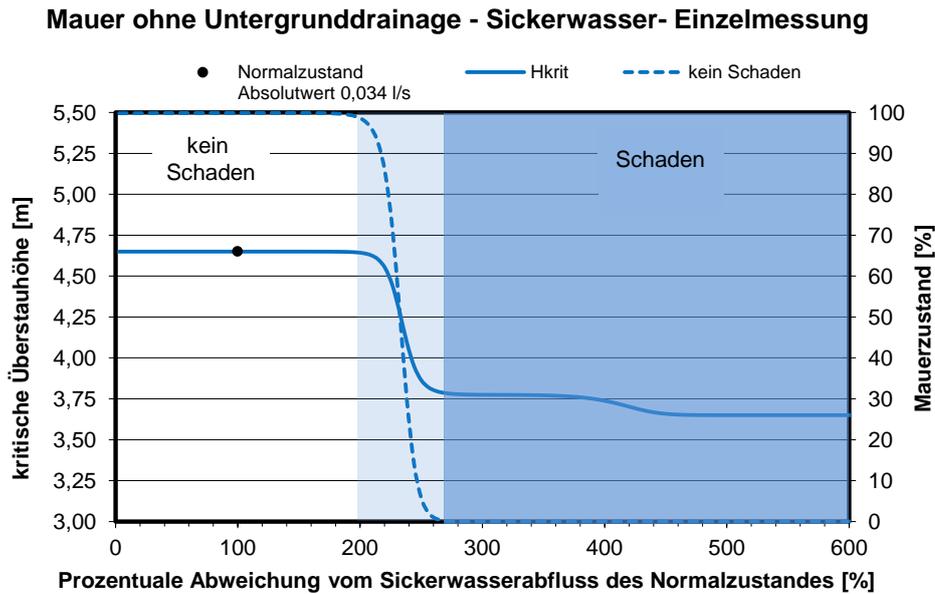


Abb. 8.1: Netzauswertung einer einzelnen Sickerwassermessung der Mauer ohne Untergrunddrainage

Erläuterungen zur Interpretation der Diagramme

Auf den x-Achsen der Diagramme ist der Prozentsatz aufgetragen. Im Fall der idealisierten Mauer ohne Untergrunddrainage beträgt beispielsweise der absolute Sickerwassermesswert für den Fall ohne Schaden 0,034 l/s. Dies ist der Grundwert der Prozentrechnung. Der Normalzustand ist in den Diagrammen als schwarzer Punkt gekennzeichnet, dessen Lage sich an der Position 100 % der x-Achse befindet. Die zugehörige kritische Überstauhöhe stammt aus den Berechnungsergebnissen des FE-Modells und liegt 4,65 m oberhalb der Mauerkrone.

Die Berechnungsergebnisse aus dem Bayesschen Netz sind als Linien in das Diagramm eingetragen. Die durchgezogene Linie ermöglicht eine Aussage über das Sicherheitsniveau der Talsperre, welches durch die kritische Überstauhöhe beschrieben wird (vgl. Abschnitt 6.6). Die zugrundeliegenden Daten entstammen folglich aus dem Knoten *Kritische Höhe*. Verdreifacht sich beispielsweise der beobachtete Sickerwasserabfluss der Mauer ohne Untergrunddrainage im Vergleich zum Normalzustand auf 0,102 l/s und liegt somit bei einem Prozentsatz von 300 %, so würde die Mauer theoretisch bereits bei einer Überfallhöhe von 3,77 m über dem Kronenniveau versagen.

Die gestrichelte Linie zeigt die Ergebnisse des Knotens *Kein Schaden* und liefert eine Aussage über den Mauerzustand. Für diese Linie ist die rechte y-Achse relevant. 100 % bedeutet, dass die Mauer intakt ist und 0 % bedeutet, dass die Mauer einen Schaden aufweist. Zur Verdeutlichung sind die jeweiligen Bereiche farblich hervorgehoben. Liegen die Messwerte im weißen Bereich, so ist der Zustand der Mauer normal. Dieser Bereich wird im Folgenden auch als Erwartungsbereich bezeichnet. Liegen die Werte jedoch im dunkelblauen Bereich, so liegt ein Schaden vor. Der Übergangsbereich ist hellblau markiert. An dieser Stelle sei nochmals betont, dass der Begriff Schaden nicht mit dem Versagen einer Mauer gleichgesetzt werden darf. Wie in den vorangegangenen Kapiteln erläutert, wird in dieser Arbeit unter Schaden eine Veränderung von Materialeigenschaften gegenüber dem ursprünglich geplanten Bauzustand

oder die eingeschränkte Wirksamkeit bzw. der Ausfall von Bauwerkskomponenten verstanden. Je nach Schadensausmaß kann dieser jedoch bei entsprechender Belastung der Mauer (i.R. große Stauhöhe) zu einem Versagen führen.

Die in den Diagrammen ersichtlichen Stufen hängen mit den gewählten Intervallen der Knotentabellen zusammen und dürfen nicht überinterpretiert werden. Dieser Effekt ist insbesondere dann stark ausgeprägt, wenn bei den Normalverteilungen der Messwertknoten kleine Streuparameter vorgegeben werden.

Ergebnis der Mauer ohne Untergrunddrainage

Gemäß Abb. 8.1 ist erst bei einem deutlichen Anstieg des Sickerwasserabflusses auf 270 % gegenüber dem Erwartungswert davon auszugehen, dass ein Schaden vorliegt. Die kritische Überstauhöhe nimmt dann merklich ab und somit erhöht sich im Umkehrschluss die Versagenswahrscheinlichkeit der Mauer.

Ergebnis der Mauer mit Untergrunddrainage

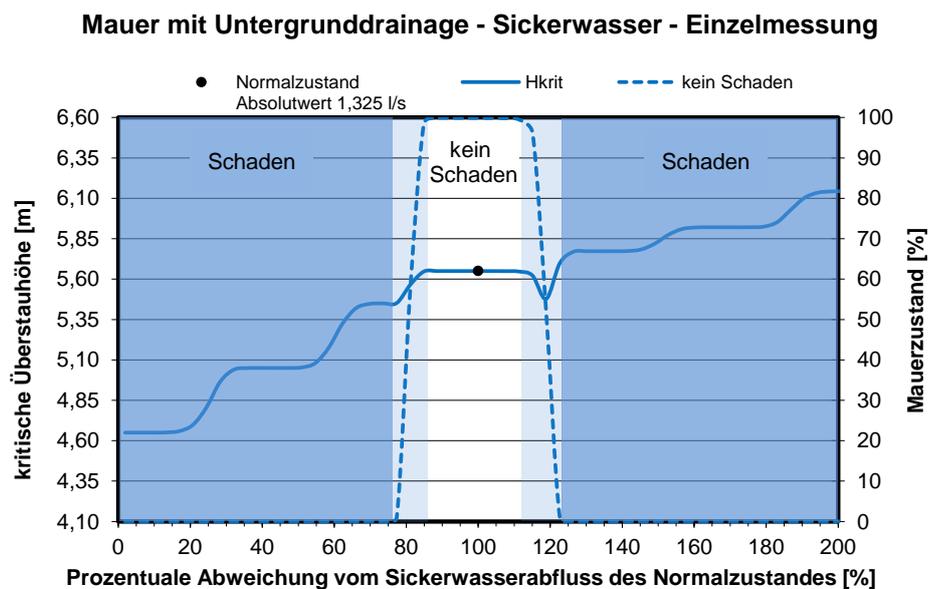


Abb. 8.2: Netzauswertung einer einzelnen Sickerwassermessung der Mauer mit Untergrunddrainage

Gemäß den Ergebnissen der FE-Berechnung haben die Mauern mit Untergrunddrainage ein höheres Sicherheitsniveau als die Mauern ohne Untergrunddrainage, so dass für die linke Ordinatenachse eine andere Skalierung gewählt wird.

Abb. 8.2 zeigt, dass im Vergleich zu den Mauern ohne Drainage sowohl niedrige Sickerwasserabflüsse als auch größere Sickerwasserabflüsse eine Schädigung der Mauer aufzeigen. Auffällig ist dabei insbesondere, dass bei größeren Sickerwassermengen die kritische Überstauhöhe zunimmt und somit das Sicherheitsniveau steigtⁱ.

ⁱUrsache ist, dass bei hohen Abflüssen das Schadensbild „Erosionsschäden im Bereich der Untergrund-

Allgemein zeigen die Ergebnisse, dass selbst bei einer relativ großen Abweichungen vom Erwartungswert von einem normalen Mauerzustand auszugehen ist und es sich bei der Messung um einen Ausreißer handelt, sofern sich diese im weißen Bereich befindet. Sowohl die für den Einzelmesswert geltende hohe Standardunsicherheit als auch die sehr geringe Auftretenswahrscheinlichkeit für Mauerschäden führen dazu, dass lediglich Schäden, die sich stark auf die Sickerwassermenge auswirken, im Netz als solche identifiziert werden. Diese Aussage lässt sich auch auf die Messwerte der anderen Überwachungseinrichtungen übertragen (vgl. Abbildungen in Anlage H.1).

8.2 Auswertung längerer Zeitreihen

In der Praxis steht dem Talsperrenbetreiber für die Interpretation von Überwachungsdaten eine größere Messdatenanzahl zur Verfügung, so dass sich genauere Aussagen über den Bauwerkszustand treffen lassen. Dieser Aspekt wird in diesem Abschnitt an Hand von vier unterschiedlich langen Zeitspannen näher betrachtet und deren Ergebnisse miteinander verglichen. Dabei wird jeweils auf tägliche Messwerte zurückgegriffen.

- Einzelwertmessung (Messwert eines Tages), z. B. im Rahmen einer Kontrollmessung
- Messwerte eines Monats, z. B. im Zuge der regelmäßigen Datenauswertung im Laufe eines Jahres
- Auswertung der Messwerte eines Jahres, z. B. im Rahmen der Erstellung eines jährlichen Sicherheitsberichtes durch den Talsperrenverantwortlichen
- Auswertung der Messwerte der letzten 15 Jahre, z. B. im Rahmen der Durchführung einer vertieften Überprüfung der Talsperre durch einen Experten

Bei der Bewertung des Langzeitverhaltens einer Talsperre werden beispielsweise die Messwerte eines definierten aktuellen Zeitraumes gemittelt und mit dem mittleren Erwartungswert einer Mauer im Normalzustand verglichen. Dieser Erwartungswert könnte beispielsweise das langjährige Mittel aus der Vergangenheit sein. Eine genauere Alternative wäre die Berechnung des Erwartungswertes der zu betrachtenden Messgröße an Hand einer Regressionsanalyse (vgl. Abschnitt 2.1), da mit diesem Verfahren die Einflussgrößen explizit berücksichtigt werden. In diesem Fall erfolgt dann die Bewertung des Mauerzustandes auf Basis des Mittelwertes der Residuen.

Wie aus Abschnitt 6.5 hervorgeht, werden in dieser Arbeit für die geschädigten Mauerzustände keine Ganglinien generiert, die statistisch ausgewertet werden könnten. Stattdessen wird mittels der FE-Simulation für jedes Messgerät vereinfachend ein repräsentativer Wert ermittelt. Die Länge der Zeitreihe wird hier jedoch indirekt durch die Definition der Normalverteilungsfunktion an den Messwertknoten berücksichtigt.

Wie auf S. 75 beschrieben, lassen sich die Residuen aus der Residualanalyse der Messdaten gut mit einem autoregressiven Prozess 1. Ordnung beschreiben. Die Standardunsicherheit des Stichprobenmittelwertes wird mit Gl. 2.37 ermittelt. Als Eingangsgrößen sind dabei die Anzahl der Messwerte n , der Autoregressionsparameter ϕ und die Standardunsicherheit des Einzelmesswertes $u(x_0)$ gemäß Tabellen 5.1 und 5.2 einzusetzen. Somit ergeben sich für die

drainagen“ dominiert. Wie aus Abb. 6.17 hervorgeht, kann die Mauer dann einer größeren kritische Überstauhöhe widerstehen.

gewählten Zeiträume die in Tab. 8.1 aufgeführten Standardunsicherheiten. Die quadrierten Standardunsicherheiten (Varianzen) sind für die Normalverteilungsfunktionen der Messwertknoten im Bayesschen Netz vorzugeben. Je länger die Zeitreihe ist, desto mehr Messdaten stehen für die Auswertung zur Verfügung, was zu einer geringeren Standardunsicherheit führt.

Tab. 8.1: Standardunsicherheiten des Stichprobenmittelwertes $u(y)$ täglicher Messdaten in Abhängigkeit der Zeitreihenlänge

Zeitreihenlänge		1 Tag	1 Monat	1 Jahr	15 Jahre
Sickerwasser Mauer ohne UD	l/s	0,0100	0,0027	0,0008	0,0002
Sickerwasser Mauer mit UD	l/s	0,0500	0,0249	0,0078	0,0020
Piezometer 1	m	0,4100	0,2697	0,0923	0,0241
Piezometer 2	m	0,3500	0,2302	0,0788	0,0206
Piezometer 3	m	0,3300	0,2171	0,0743	0,0194
Gewichtslot	mm	0,6500	0,4276	0,1464	0,0383
Schwimmlot	mm	0,2600	0,2061	0,0827	0,0219

Die Berechnungsergebnisse für die Mauer ohne Untergrunddrainage sind für die Sickerwassermessung in Abb. 8.3 und für die Messwerte der weiteren Überwachungseinrichtungen analog zur Auswertung des vorherigen Abschnittes in Anlage H.2 auf den Seiten 237 bis 239 dargestellt.

Für die Mauer mit Untergrunddrainage sind die zugehörigen Diagramme in Abb. 8.4 bzw. im Anhang H.2 auf den Seiten 240 bis 242 zusammengestellt.

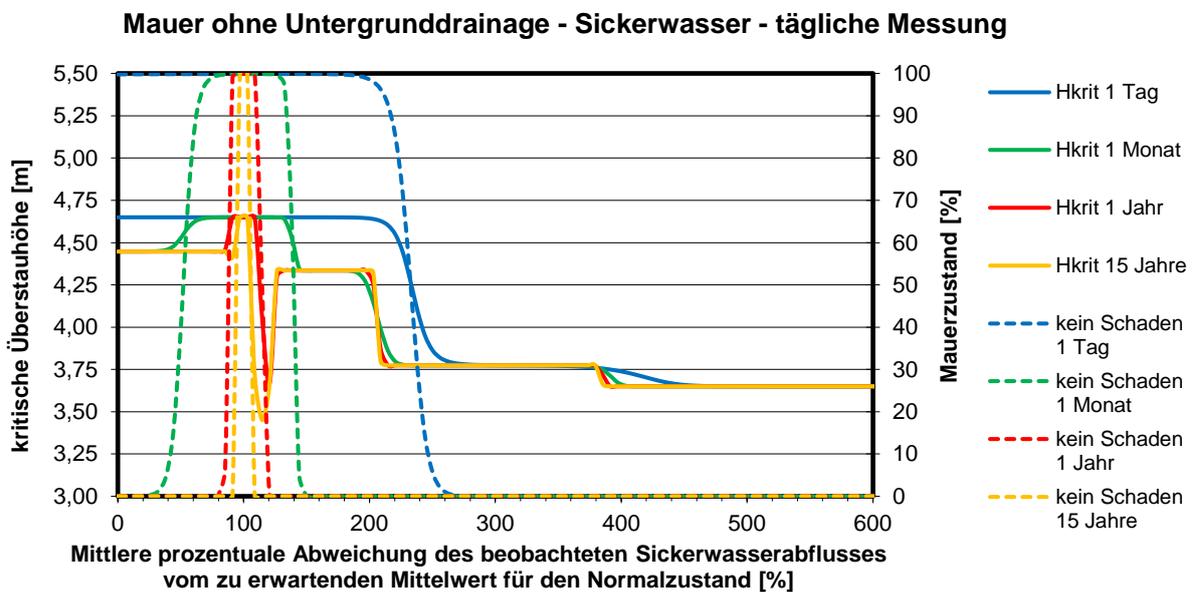


Abb. 8.3: Netzauswertung von unterschiedlich langen Zeitreihen täglicher Sickerwassermesswerte der Mauer ohne Untergrunddrainage

Je länger die für die Auswertung zur Verfügung stehende Zeitreihe ist, desto geringer ist der durch die gestrichelte Linie dargestellte Messwertebereich, der den Zustand der Mauer als nicht geschädigt charakterisiert (Mauerzustand 100%). Liegen die Messwerte außerhalb dieser Bandbreite, so ändert sich die kritische Überstauhöhe.

Ergebnis der Mauer ohne Untergrunddrainage

Bei der Sickerwassermessung, den Piezometern und dem Gewichtslot stimmen die roten (1 Jahr) und gelben Linien (15 Jahre) fast überein. Somit sind relativ genaue Aussagen über den Bauwerkszustand schon bei einer Datengrundlage von täglichen Messwerten eines Jahres möglich. Beim Schwimmlot sind dagegen längere Aufzeichnungen erforderlich.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Abnahme der Sickerwassermenge kaum das Sicherheitsniveau der Talsperre beeinflusst. Eine Zunahme ist jedoch kritisch zu bewerten, da die kritische Überstauhöhe dann deutlich abfällt.

Bei den Loten sind sowohl Bewegungen in Richtung Luft-, als auch in Richtung Wasserseite kritisch. Wie oben erwähnt, sind diese Effekte beim Schwimmlot jedoch lediglich bei einer längeren Datenbasis erkennbar.

Bei den Piezometern wirkt sich sowohl ein Druckanstieg, als auch ein Druckabfall negativ auf das Standsicherheitsniveau der Talsperre aus.

Für die Beurteilung der Talsperrensicherheit sind diejenigen Messeinrichtungen in besonderem Maße zweckdienlich, deren zugehöriger Linienvorlauf der kritischen Überstauhöhe auf einen relativ niedrigen Wert absinkt, da dann ein niedriges Sicherheitsniveau aufgezeigt wird. Dies trifft insbesondere auf die Piezometer 2 und 3 zu, da hier das Niveau von 4,65 m auf 3,35 m abnimmt. Dagegen erfolgt beim Sickerwasser lediglich ein Abfall auf 3,65 m. Bei den anderen Messeinrichtungen beträgt das Minimum 3,45 m.

Darüber hinaus haben die Messeinrichtungen eine hohe Relevanz, wenn im zugehörigen Diagramm bereits kleinere Abweichungen vom Erwartungsbereich für den Normalzustand zu einem Abfall der kritischen Höhe führen. Dies gilt für die Zunahme des Sickerwassers und die Messung eines Druckabfalls bei Piezometer 1 und Piezometer 2. Bei diesen Messgeräten ist eine ausreichende Datengrundlage besonders wichtig.

Ergebnis der Mauer mit Untergrunddrainage

Bei der Sickerwassermessung reicht bereits eine Datengrundlage von täglichen Messwerten eines Monats aus, um eine eindeutige Aussage über den Bauwerkszustand zu treffen, da der Verlauf der grünen Linie annähernd so genau wie der Verlauf der roten Linie ist. Bei den anderen Messeinrichtungen wäre eine Zeitreihenlänge von 15 Jahren ideal, um alle Effekte erkennen zu können.

Abb. 8.4 zeigt, dass sich eine geringe Zunahme des Sickerwassers negativ auf das Sicherheitsniveau der Talsperre auswirkt. Bei weiterer deutlicher Zunahme liegt die Ursache jedoch in einem Schadensbild, das keine Reduktion der kritischen Überstauhöhe bewirkt. Eine deutliche Abnahme der Sickerwassermenge ist dagegen kritisch zu bewerten.

Bei den Loten ähneln sich die Diagramme der Mauer mit und ohne Untergrunddrainage sehr. Sowohl Bewegungen Richtung Luft- als auch Richtung Wasserseite sind kritisch zu bewerten. Um diesen Effekt zu erkennen, ist jedoch eine Datenbasis von mindestens einem Jahr erforderlich.

Je höher die an den Piezometern vorherrschenden Drücke sind, desto geringer ist die kritische Überstauhöhe. Ein Druckanstieg bei den Piezometern 2 und 3 ist dabei bedenklicher als ein vergleichbarer prozentualer Anstieg beim wasserseitig angeordneten Piezometer 1. Lediglich

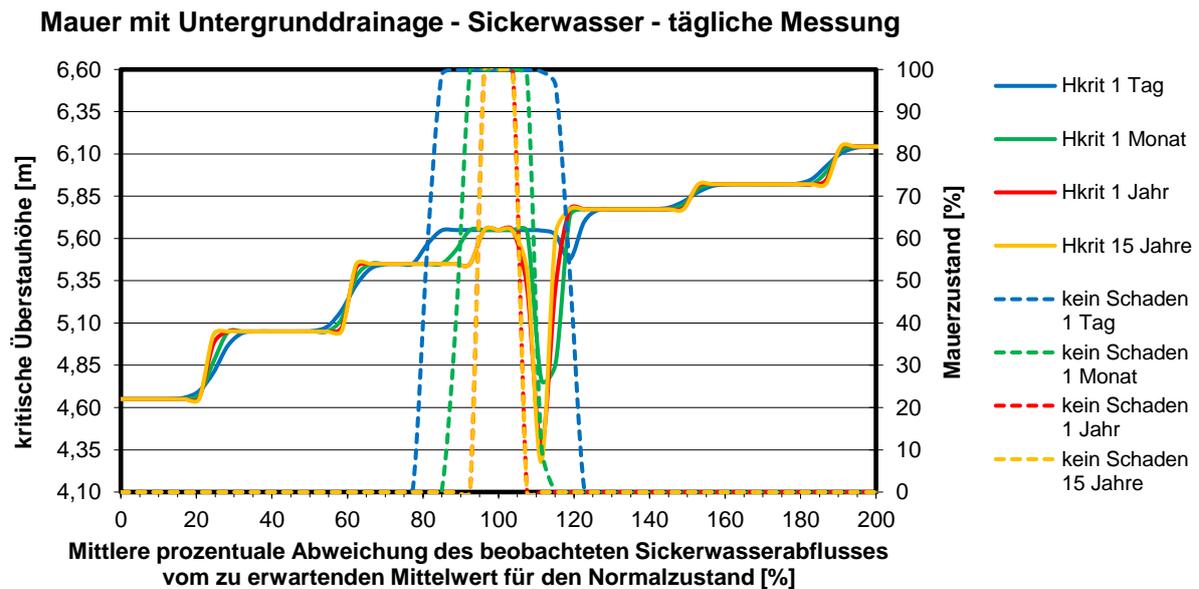


Abb. 8.4: Netzauswertung von unterschiedlich langen Zeitreihen täglicher Sickerwassermesswerte der Mauer mit Untergrunddrainage

bei einer Datenbasis von 15 Jahren wird bei den Piezometern zudem ein Effekt erkennbar, der bei einem geringfügigen Druckabfall eine Reduktion der Standsicherheit zeigt.

Bei Mauern mit Untergrunddrainagen ist die Sickerwassermessung die wichtigste Messeinrichtung, da bereits bei einer geringen Datengrundlage deutliche Aussagen über das Sicherheitsniveau getroffen werden können und bei einem Sickerwasseranstieg die kritische Überstauhöhe schnell auf ein niedriges Niveau absinkt.

Sofern eine lange Zeitreihe zur Verfügung steht, können auch die Piezometer 1 und 2 wichtige Information liefern. Ein geringer Druckabfall wirkt sich dann bereits signifikant auf das Sicherheitsniveau aus.

8.3 Auswertung mit unterschiedlichen Messintervallen

In diesem Abschnitt wird der Einfluss des gewählten Messintervalls auf die Aussagekräftigkeit der Langzeitanalyse der Überwachungsdaten untersucht. Als Bezugsgröße wird dabei die Erhebung von Daten eines Jahres gewählt. In diesem Turnus werden die jährlichen Sicherheitsberichte zu Talsperren erstellt, in welchen Aussagen über die aktuelle Sicherheit der Talsperre zu formulieren sind.

Es wird zwischen täglichenⁱⁱ, wöchentlichen, zweiwöchentlichen und monatlichen Messungen differenziert. Das Messintervall wird über die Definition der Standardunsicherheiten der

ⁱⁱAuf Grund des hohen personellen Aufwandes erfolgt die Erhebung von Tageswerten in der Regel automatisiert, so dass in diesem Fall ohne Weiteres auch stündliche Daten zur Auswertung herangezogen werden könnten.

Messwertknoten in den Netzen berücksichtigt. Die zugrunde gelegten Werte sind in Tab. 8.2 aufgeführt.

Tab. 8.2: Standardunsicherheiten des Stichprobenmittelwertes $u(y)$ von Messdaten eines Jahres mit unterschiedlichen Messintervallen

Messintervall		täglich	wöchentlich	2-wöchentlich	monatlich
Sickerwasser Mauer ohne UD	l/s	0,0008	0,0019	0,0025	0,0035
Sickerwasser Mauer mit UD	l/s	0,0078	0,0147	0,0165	0,0201
Piezometer 1	m	0,0923	0,1631	0,1549	0,1933
Piezometer 2	m	0,0788	0,1124	0,1235	0,1481
Piezometer 3	m	0,0743	0,0972	0,1092	0,1262
Gewichtslot	mm	0,1464	0,2088	0,2293	0,2613
Schwimmlot	mm	0,0827	0,1189	0,1148	0,1298

Die Ergebnisse der Netzberechnung sind für die Sickerwassermessung in den Abbildungen Abb. 8.5 bzw. Abb. 8.6 ersichtlich. Die zu den weiteren Überwachungseinrichtungen zugehörigen Darstellungen sind der Anlage H.3 für die Mauer ohne Untergrunddrainage ab Seite 243 und für die Mauer mit Drainage ab Seite 246 zu entnehmen.

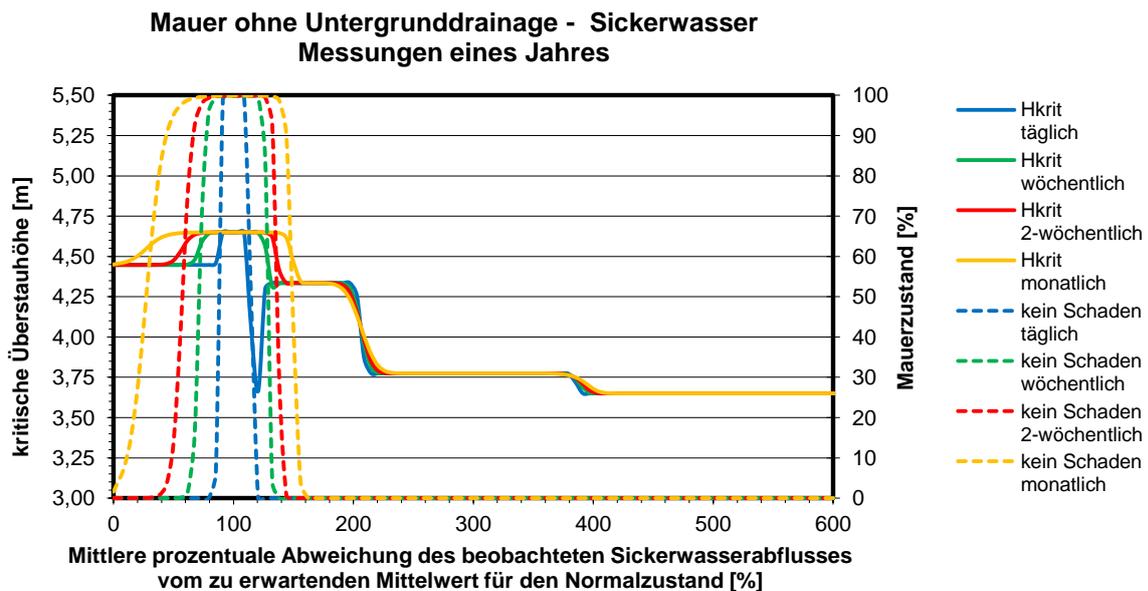


Abb. 8.5: Netzauswertung von Sickerwassermessdaten eines Jahres mit unterschiedlichen Messintervallen der Mauer ohne Untergrunddrainage

Für die Festlegung eines sinnvollen Messintervalls werden zwei Kriterien herangezogen. Zum einen soll der vom Messwert abhängige Verlauf der kritischen Überstauhöhe ausreichend genau abgebildet werden. Zum anderen hängt die Bewertung davon ab, ob direkt außerhalb des vom Messintervall abhängigen Erwartungsbereiches für den Normalzustand ein deutlicher Abfall des Verlaufs der kritische Überstauhöhe erfolgt. Führt eine geringe Veränderung der Messwerte bereits zu einem deutlichen Abfall des Sicherheitsniveaus, muss das Messintervall ausreichend klein gewählt sein, um diesen Umstand eindeutig identifizieren zu können.

Ergebnis der Mauer ohne Untergrunddrainage

Wie aus Abb. 8.5 hervorgeht, ist nur bei den täglich erhobenen Messdaten der Abfall der kritischen Überstauhöhe bei einer mäßigen Zunahme des Sickerwasserabflusses erkennbar (blaue Linie). Demnach ist für eine sichere Aussage über den Bauwerkszustand eine tägliche Erfassung des Sickerwasserabflusses erforderlich.

Beim Gewichtslot wird der Erwartungsbereich für einen normalen Mauerzustand durch ein kleiner gewähltes Messintervall zwar reduziert, auf den Verlauf der kritischen Überstauhöhe wirkt sich dies jedoch nicht wesentlich aus. Daher wird hier eine monatliche Messung als ausreichend erachtet.

Beim Schwimmlot sind dagegen tägliche Messungen erforderlich, um den Abfall der kritischen Überstauhöhe insbesondere bei zunehmenden Werten signifikant abbilden zu können.

Je näher sich der Piezometer an der Wasserseite befindet, desto geringer ist das Messintervall zu wählen, um den Verlauf der kritischen Überstauhöhe ausreichend genau abbilden zu können. Für den Piezometer 1 wird auf Basis der Ergebnisse eine tägliche Erfassung, für den Piezometer 2 eine 2-wöchentliche Erfassung und für den Piezometer 3 eine monatliche Erfassung empfohlen.

Ergebnis der Mauer mit Untergrunddrainage

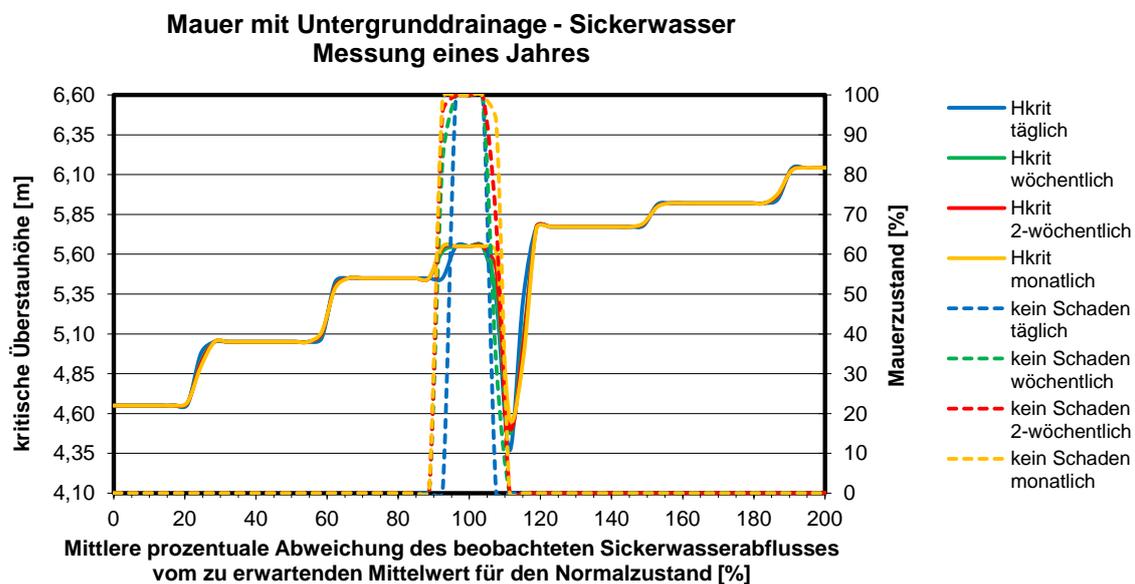


Abb. 8.6: Netzauswertung von Sickerwassermessdaten eines Jahres mit unterschiedlichen Messintervallen der Mauer mit Untergrunddrainage

Im Allgemeinen zeigen die Diagramme der Mauer mit Untergrunddrainage, dass die Kurven der wöchentlich, zweiwöchentlich und monatlich erhobenen Messdaten sehr eng beieinander liegen und nur die täglichen Messwerte zu einer signifikanten Verbesserung der Aussagekraft führen würden.

Da die Zunahme des Sickerwasserabflusses zu einer sehr deutlichen Abnahme der kritischen Überstauhöhe führt, ist hier eine tägliche Messung angemessen, um den Erwartungsbereich für den Normalzustand möglichst gering zu halten.

Analog zu den Ausführungen über die Mauer ohne Untergrunddrainage, sind für das Gewichtslot monatliche und für das Schwimmlot täglich erfasste Messdaten sinnvoll.

Die Diagramme der Piezometer zeigen, dass die kritische Überstauhöhe außerhalb des Erwartungsbereichs insbesondere am Piezometer 1 und 2 nur moderat abnimmt. Ein monatlicher Turnus zum Ablesen sämtlicher Piezometerdrücke ist daher verhältnismäßig.

8.4 Zusammenhang zwischen Messwert und Schadenstyp

In den vorangegangenen Abschnitten liegt der Fokus der Auswertung in einer Beurteilung, ob der Zustand der Talsperre als normal oder geschädigt einzustufen ist. Eine Bewertung, wie stark sich ein Schaden auf die Bauwerkssicherheit auswirkt, erfolgt durch die Betrachtung der kritischen Überstauhöhe.

In diesem Abschnitt erfolgt nun die Netzauswertung unter dem Aspekt, auf welche der in den Netzen berücksichtigten Schadensbilder die vom Erwartungsbereich abweichenden Messwerte hinweisen. Für die Auswertung werden dabei tägliche Messdaten eines Jahres zugrunde gelegt. Die zugehörigen Standardunsicherheiten sind bereits in Tab. 8.2 aufgeführt.

Die Berechnungsergebnisse für die Mauer ohne Untergrunddrainage sind für die Sickerwassermessung in Abb. 8.7 dargestellt. Aus dem Diagramm lässt sich ablesen, bei welchem Sickerwasserabfluss welcher Schadenstyp als Ursache wahrscheinlich ist. Für die potenziellen Schadensbilder werden in der Legende aus Platzgründen Abkürzungen verwendet. Der zugehörige Langtext ist Tab. 7.1 auf S. 120 zu entnehmen.

Im Regelfall entspricht der Sickerwasserabfluss zu 100 % dem erwartungsgemäßen Sickerwasserabfluss. Bei diesem Zustand ist zu 100 % davon auszugehen, dass kein Schaden vorliegt. Bei einer rund 10 prozentigen Abweichung vom Mittelwert fällt diese graue Linie deutlich ab. Folglich ist von einem Schaden auszugehen. Bei geringen Sickerwasserabflüssen beispielsweise liegt gemäß der Auswertung mit einer Wahrscheinlichkeit von 65 % ein Schaden im Bereich der Mauerdrainagen (MD) und zu 35 % ein Schaden im Untergrund vor (UF). Werden die möglichen Mauerzustände addiert, ergeben sich immer 100 %.

Die Diagramme für die weiteren Überwachungseinrichtungen sind in der Anlage H.4 auf den Seiten 249 bis 251 dargestellt.

Für die Mauer mit Untergrunddrainage sind die zugehörigen Diagramme in Abb. 8.8 bzw. im Anhang H.4 auf den Seiten 252 bis 254 zusammengestellt. Die Bedeutung der in der Legende verwendeten Abkürzungen ist in Tab. 7.2 auf Seite 121 beschrieben.

Wie im Abschnitt 7.3.5 ausgeführt ist, werden im Bayesschen Netz für die Knoten der Messgeräte Intervalle festgelegt, deren Wertebereich mit zunehmender Abweichung vom Messwert des Normalzustandes zunimmt. Dies führt in den Diagrammen, insbesondere bei sehr hohen oder sehr niedrigen Messwerten, zu einem stufigen Linienverlauf. Diese Sprünge dürfen nicht überinterpretiert werden.

Ergebnis der Mauer ohne Untergrunddrainage

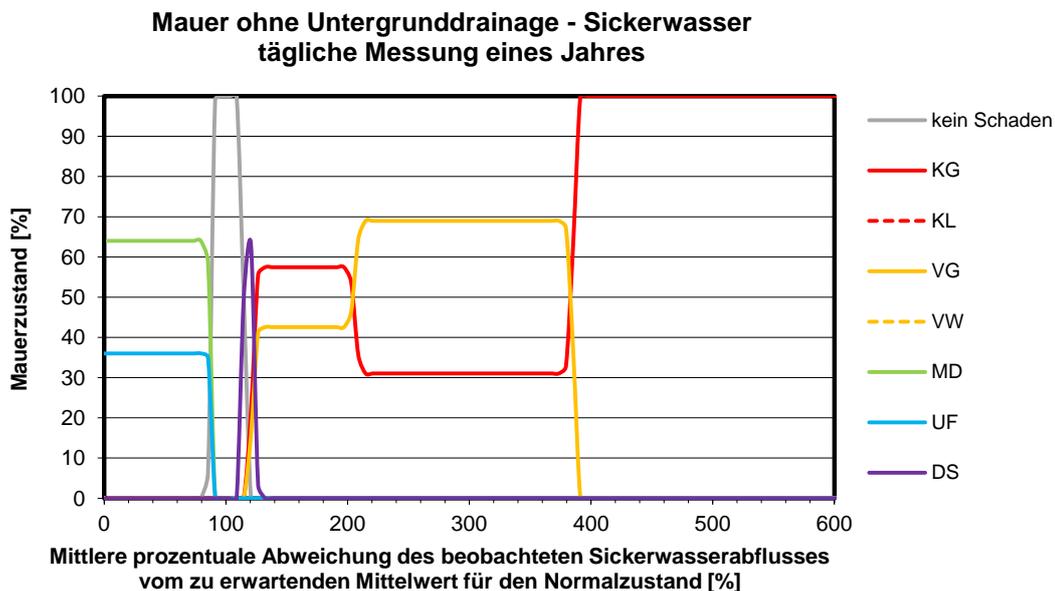


Abb. 8.7: Netzauswertung von täglichen Sickerwassermessdaten eines Jahres in Bezug auf mögliche Talsperrenschädigungen der Mauer ohne Untergrunddrainage

Wie aus der Abb. 8.7 hervorgeht, wirken sich die meisten Schadenstypen auf den Sickerwasserabfluss aus, was die Bedeutung dieser Messeinrichtung unterstreicht. Abnehmende Sickerwasserabflüsse deuten auf Schäden im Bereich der Mauerdrainagen (MD) oder des Untergrundes (UF) hin. Bei einer sehr starken Zunahme der Sickerwassermenge kommen lediglich Schäden im Bereich des Mauerkerne (KG) in Betracht. Bei einer moderaten Zunahme sind Schäden an der wasserseitigen Vorsatzschale (VG) als Ursache wahrscheinlich. Bei einer geringen Zunahme könnte darüber hinaus auch ein Schaden am Dichtungsschleier (DS) vorliegen.

Die Gewichtslotbewegung wird besonders durch Schäden im Bereich der Mauer beeinflusst. Schäden im Bereich des Mauerkerne (KG) führen zu Bewegungen der Mauerkrone Richtung Wasserseite. Eine Bewegung Richtung Luftseite (erhöhte Werte) deutet auf Schäden der Mauerdrainagen (MD) oder insbesondere der wasserseitigen Vorsatzschale (VG) hin. Unter Umständen könnten auch Schäden am luftseitigen Kernbeton (KL) die Ursache für leicht erhöhte Werte sein.

Niedrige Werte des Schwimmlotes zeigen eine Bewegung der Aufstandsfläche Richtung Wasserseite an. Diese stehen im Zusammenhang mit Schäden des Kernbetons (KG). Hohe Schwimmlotwerte weisen auf einen Schaden an der wasserseitigen Vorsatzschale (VG) hin. Gegenbefalls können aber auch Schäden im Bereich des Untergrundes (UF) oder der Mauerdrainagen (MD) die Ursache sein.

Änderungen der Piezometerdrücke deuten auf Schäden im Gründungsbereich der Talsperre hin. Da diese Schadensprozesse kaum bzw. nur mit erheblichem Aufwand durch Bauwerksuntersuchungen festgestellt werden können, sind diese Messeinrichtung besonders aufschlussreich. Während niedrige Drücke Anzeichen für Erosionsschäden im Bereich des Mauerfußes

(UF) geben, resultieren hohe Drücke aus Schäden am Dichtungsschleier (DS). Gegebenenfalls könnten reduzierte Drücke auch auf Schäden im Bereich des Mauerkerens (KG) hindeuten.

Ergebnis der Mauer mit Untergrunddrainage

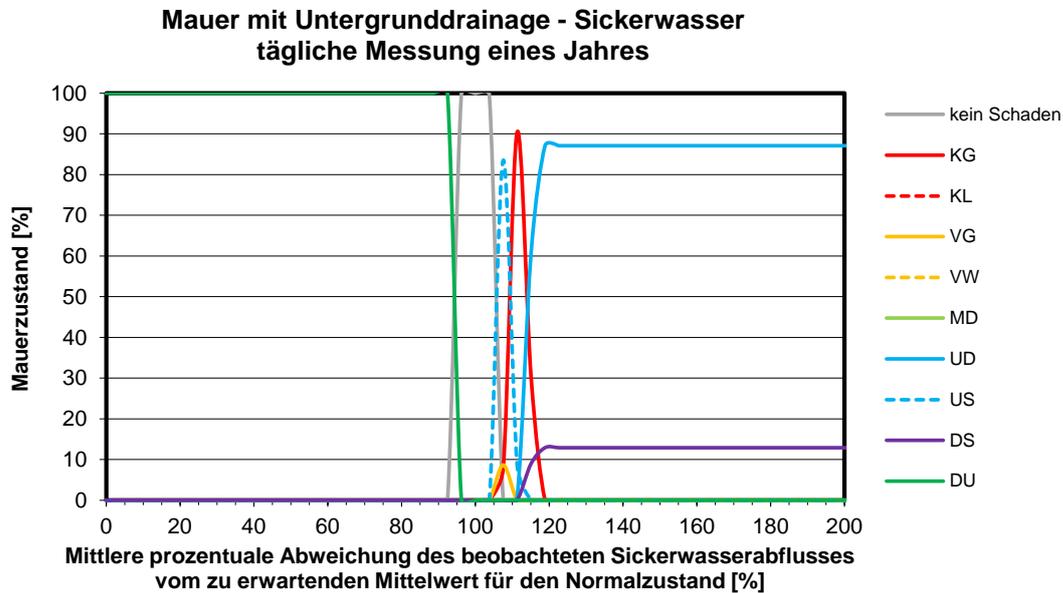


Abb. 8.8: Netzauswertung von täglichen Sickerwassermessdaten eines Jahres in Bezug auf mögliche Talsperrenschädigungen der Mauer mit Untergrunddrainage

Mauern mit Untergrunddrainagen haben einen deutlich höheren Gesamtsickerwasseranfall als Mauern ohne Untergrunddrainagen. Dies führt dazu, dass sich andere Schadensbilder signifikant auf die Messwerte auswirken. Eine Abnahme des Abflusses resultiert aus Schäden an den Untergrunddrainagen (DU). Bei einer sehr starken Zunahme der Sickerwassermenge kommen in erster Linie Erosionsschäden im Untergrund im Bereich der Drainagen (UD) in Betracht. Deutlich geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass als Ursache ein Schaden am Dichtungsschleier (DS) vorliegt. Bei einer moderaten Zunahme können darüber hinaus Schäden des Mauerkerens (KG) oder Erosionsschäden des Untergrundes im Bereich des Dichtungsschleiers (US) verantwortlich sein.

Die Diagramme für die Lote sind für die Mauern mit und ohne Untergrunddrainagen relativ ähnlich. Niedrige Werte des Gewichtslotes bedeuten eine Bewegung der Krone in Richtung Wasserseite und sind auf Schäden im Bereich des Mauerkerens (KG) zurückzuführen. Erhöhte Werte deuten insbesondere auf Schäden an der wasserseitigen Vorsatzschale (VG) hin. Gegebenenfalls können auch Schäden der Mauerdrainagen (MD) oder Schäden am luftseitigen Kernbeton (KL) die Ursache für leicht erhöhte Werte sein.

Wird am Schwimmloot eine Bewegung der Aufstandsfläche in Richtung Wasserseite beobachtet, so sind Schäden des Kernbetons (KG) die Ursache. Hohe Schwimmlootwerte weisen auf einen Schaden an der wasserseitigen Vorsatzschale (VG) hin.

Schäden im Gründungsbereichⁱⁱⁱ spiegeln sich in den Piezometermessungen wider. Niedri-

ⁱⁱⁱBei der Auswertung einer 15-jährigen Zeitreihe von täglichen Messdaten weisen leicht reduzierte Drücke

ge Drücke sind Anzeichen für Erosionsschäden des Untergrundes im Bereich der Drainagen (UD). Die Ursache hoher Drücke ist in erster Linie auf Schäden an den Untergrunddrainagen (DU) zurückzuführen, könnte aber auch an Schäden am Dichtungsschleier (DS) liegen. Zudem können bei einer moderaten Druckzunahme auch Erosionsschäden des Untergrundes im Bereich des Dichtungsschleiers (US) verantwortlich sein.

8.5 Limitierung der eingesetzten Bayesschen Netze und Verbesserungspotenzial

In den vorangegangenen Abschnitten wurde aufgezeigt, welche Informationen mit den beiden Bayesschen Netzen zur Interpretation von Überwachungsdaten gewonnen werden können. Im Folgenden werden mögliche Punkte aufgezeigt, die zu einer Verbesserung der Aussagekraft der gewonnenen Ergebnisse führen und wie die Netze für weiterführende Fragestellungen angepasst beziehungsweise erweitert werden könnten.

Im Kapitel 4 dieser Arbeit wird die idealisierte Gewichtsstaumauer beschrieben, die als Grundlage für die FE-Berechnungen dient. Durch Referenzsimulationen mit anderen Bauwerksabmessungen und Materialkennwerten könnte die Möglichkeit zur Übertragung der Ergebnisse auf andere Gewichtsstaumauern verbessert werden.

Bei der idealisierten Mauer werden für den Felsuntergrund der Mauer verallgemeinerte homogene Verhältnisse vorausgesetzt, da die Bedingungen von Mauer zu Mauer stark variieren. Im Einzelfall können Hauptkluftrichtungen, Trennflächen oder geologische Störzonen die Untergrundeigenschaften deutlich beeinflussen und sogar eine dreidimensionale Analyse erfordern. Auf Grund der getroffenen Vereinfachung ist der vornehmliche Versagensmechanismus im Modell eher eine horizontale Gleitbewegung. Gerade bei speziellen Untergrundverhältnissen können andere Deformationen auftreten. Um hier das Verhalten genauer beobachten zu können, ist eine ergänzende anlagenspezifische Messausstattung beispielsweise mit Extensometern oder Inklinometern angebracht.

Die im Zuge der Betreiberumfrage gewonnenen Überwachungsdaten werden in Kapitel 5 statistisch ausgewertet. Da die Automatisierung der Überwachungseinrichtungen stetig zunimmt und sich darüber hinaus die Möglichkeiten zur Archivierung der Messdaten stetig verbessern, könnte die Auswertung künftig auch um die Betrachtung stündlicher Messdaten erweitert werden. Zudem sind dann auch statistische Auswertungen über den in der Arbeit gewählten Zeitraum von 10 Jahren hinaus möglich, da die zur Verfügung stehende Datenbasis kontinuierlich wächst.

In der FE-Berechnung in Kapitel 6 werden die Temperaturfeld- und Sickerströmungsberechnung mit einfachen Ansätzen praktiziert. So könnte beispielsweise die Berücksichtigung weiterer Wärmeübertragungseffekte oder eine realitätsnähere Modellierung des Feuchttransportes in der Mauer genauere Rechenergebnisse liefern.

In dieser Arbeit wird als Kriterium für die Standsicherheit der Mauer ausschließlich die kritische Überstauhöhe herangezogen. In Risikobetrachtungen von Talsperren ist neben der Wasserlast aber auch die Erdbebeneinwirkung als extremer Lastfall zu berücksichtigen. Für den

auch auf eine Schädigung des Mauerkerne (KG) hin.

Erdbebenfall wäre als mögliches Kriterium die maximale horizontale Bodenbeschleunigung anwendbar, der die Mauer ohne zu versagen, widerstehen kann. In Zenz (2008) und Sauer u. a. (2017) werden die für diese Betrachtung möglichen Ansätze für FE-Erdbebenberechnungen zur Analyse des Langzeitverhaltens von Staumauern vorgestellt.

In Abschnitt 6.4 werden die Staumauerschäden jeweils mit vier abgestuften Szenarien simuliert. Alternativ wäre auf Grund der zunehmenden Leistungsfähigkeit von Computern auch eine auf der Monte-Carlo-Methode basierende Berechnung oder die Anwendung der Stochastischen Finite-Elemente-Methode (SFEM) möglich. Die Streuung der für den Schadensprozess relevanten Materialparameter oder Randbedingungen werden durch eine Verteilungsfunktion ausgedrückt. Als Berechnungsergebnis wird für den Knoten „kritische Überstauhöhe“ bzw. für die Knoten der Messgeräte ebenfalls eine Verteilungsfunktion generiert und kann im Bayesschen Netz anstelle der diskreten Knotenzustände eingesetzt werden. Der Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass die grafischen Darstellungen der Netzberechnungsergebnisse auf Grund der besseren Informationsdichte keine Sprünge aufweisen. Insbesondere bei deutlichen Abweichungen vom Erwartungswertebereich wird die Interpretation der Ergebnisse dadurch erleichtert.

Im Bayesschen Netz erfolgt die Bewertung, ob ein geschädigter Zustand der Talsperre vorliegt, durch eine Bewertung des Residualmittelwertes des aktuellen Betrachtungszeitraumes. Durch eine Trendbetrachtung ließe sich die Präzision der Aussage verbessern. Gerade bei der Interpretation des Langzeitverhaltens einer Talsperre ist es von Interesse, ob die Zu- oder Abnahme einer gewissen Messgröße stagniert oder sich linear bzw. exponentiell entwickelt.

Darüber hinaus kann das Bayessche Netz dieser Arbeit auf eine bestehende Gewichtsstau-mauer übertragen werden. Zunächst werden die FE-Berechnungen mit den Abmessungen, Bauwerkskomponenten und Materialparameter dieser Talsperre durchgeführt. Im nächsten Schritt lassen sich die realen Messwerte dieser Mauer statistisch auswerten, um die hier vorliegenden Streuungen in den Netzknoten zu berücksichtigen. Dieses individuell angepasste Netz ermöglicht es, eine sehr genaue Aussage über den Bauwerkszustand zu treffen und kann darüber hinaus für die Definition von sinnvollen Warn- und Alarmwerten herangezogen werden.

9 Fazit

Auf Grund ihrer bedeutungsvollen Aufgaben einerseits und ihres hohen Gefährdungspotenzials andererseits, werden an Talsperren höchste Zuverlässigkeitsanforderungen gestellt. Den gesetzlichen Rahmen bildet das WHG (2009) §36 Absatz 2. Demnach sind Stauanlagen nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik zu errichten, zu betreiben und zu unterhalten. Der Betreiber von Stauanlagen hat den ordnungsgemäßen Zustand und Betrieb zu überwachen. Sofern für die Anlagen voranstehende Anforderungen nicht ausreichend erfüllt sind, kann die zuständige Aufsichtsbehörde die Durchführung erforderlicher technischer Maßnahmen anordnen.

Neben der Planung und der Bauausführung spielt somit die Talsperrenüberwachung eine zentrale Rolle. Ein außergewöhnliches Bauwerksverhalten muss durch visuelle Kontrollen in Verbindung mit einer angemessenen Instrumentierung und einer zielgerichteten Messdatenauswertung rechtzeitig erkannt werden. Nur wenn die Anzeichen eines Mauerversagens frühzeitig festgestellt werden, bestehen Reaktionszeiten, um bestenfalls das Schadensausmaß zu begrenzen und um ein Versagensereignis zu verhindern. Zumindest besteht aber dann die Möglichkeit das Versagensausmaß zu reduzieren oder wenigstens durch Gewährleistung einer angemessenen Vorwarnzeit der Bevölkerung, die Schadensfolgen zu begrenzen (DWA u. a., 2017). Die Talsperrenüberwachung trägt somit maßgeblich zur Reduzierung des von einer Talsperre ausgehenden Restrisikos bei.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen Betreibern, Aufsichtsbehörden oder den mit der Sicherheitsbewertung von Gewichtsstaumauern betrauten Ingenieurbüros oder universitären Instituten eine Hilfestellung bei der Langzeitinterpretation von Überwachungsdaten von Gewichtsstaumauern geben. Die wesentlichen Schlussfolgerungen und zentralen Aussagen dieser Forschungsarbeit werden im Folgenden zusammengefasst.

In dieser Arbeit wird zwischen den Begriffen Schaden und Versagen differenziert. Unter Schaden wird hier eine Veränderung von Materialeigenschaften gegenüber dem ursprünglich geplanten bzw. ausgeführten Bauzustand oder die eingeschränkte Wirksamkeit bzw. der Ausfall von sicherheitsrelevanten Bauwerkskomponenten verstanden. Je nach Ausmaß kann dieser Schaden dann bei entsprechender Lasteinwirkung auf die Mauer zu einem Versagen führen.

Eine Auswertung historischer Versagensfälle von Gewichtsstaumauern zeigt, dass in der Regel gewisse Anzeichen für ein auffälliges Bauwerksverhalten vorlagen. Am Häufigsten kündigte sich ein solches Ereignis durch einen erhöhten Abfluss des Sickerwassers oder von Hangquellen an. Daneben traten auch außergewöhnliche Deformationen oder Rissbildungen im Bereich der Mauer oder den Talflanken auf (vgl. Abb. 3.2). Eine der maßgeblichsten Lasteinwirkungen auf die Mauer ist der Wasserdruck. Folglich traten die Versagensfälle überwiegend bei extremen Hochwasserereignissen oder schon bereits während des Ersteinbaus auf (vgl. Abb. 3.3).

Da bei Gewichtsstaumauern äußerst viele mögliche Schadensbilder existieren, fokussiert sich diese Arbeit auf Schädigungen, die in der Vergangenheit vielfach eingetreten sind. Am häufigsten traten Mängel an den Vorsatzschalen auf, gefolgt von einer mangelhaften Materialbeständigkeit des Kernbereichs der Gewichtsstaumauer, zu großen Sickerströmungen im Untergrund, einer nicht tolerierbaren Materialdurchlässigkeit des Absperrbauwerks, Schäden an den Untergrunddrainagen, unzulässige Verformungen des Untergrundes. Auf Grund der Dauerhaftigkeit traten Schäden am Dichtungsschleier am seltensten auf (vgl. Tab. 3.2).

Neben den statistischen Auswertungen von historischen Schadensereignissen greift diese Ar-

beit auf Ergebnisse einer vom Autor durchgeführten repräsentativen Umfrage zurück, an der sich verschiedene deutsche Talsperrenbetreiber beteiligt haben. Ein Schwerpunkt der Befragung liegt in der Auswertung des Messprogramms. Bei allen Anlagen wird der Wasserstand automatisiert gemessen und die Daten in der Regel permanent an eine Leitwarte übertragen. Auch eine Temperatur-, Sickerwasser- und Sohlpiezometermessung erfolgt bei nahezu allen Anlagen. Bei der Hälfte der Mauern erfolgt die Erfassung dieser Daten jedoch seltener als einmal pro Woche. Etwa 60 % der Anlagen verfügen darüber hinaus über mindestens ein Gewichts- und ein Schwimmot. Warnwerte sind bei rund 40 % der Überwachungseinrichtungen definiert (vgl. Abb. 5.1).

Im Zuge der Umfrage wurden von den Betreibern auch Messdaten zu den Mauern zur Verfügung gestellt, die einer umfangreichen statischen Auswertung in Form einer Regressionsanalyse, Zeitreihenanalyse und einer Varianzzerlegung unterzogen wurden. Der Wasserstand und die Temperatur repräsentieren dabei die wesentlichen Einwirkungen auf das Bauwerk. Die Messgrößen Sickerwasser, Gewichts- und Schwimmotbewegung sowie Piezometerdrücke zeigen die Reaktion des Bauwerks auf oben genannte Einwirkungen auf. Der Fokus der Auswertung liegt zum einen darin, den durch die Einwirkungen erklärbaren Varianzanteil der Reaktionsgrößen zu quantifizieren zum anderen aber auch den nicht erklärbaren Anteil statistisch zu erfassen. Während die Gewichtslotbewegung stark von der Temperatur abhängt, werden die anderen Größen maßgeblich durch den Wasserstand beeinflusst. Je nach Messgröße liegt der nicht durch diese beiden Einwirkungen erklärbare Varianzanteil zwischen 20 % und 60 % (vgl. Abb. 5.6).

Da es sich bei den Talsperren um Bauwerke mit höchsten Sicherheitsanforderungen handelt, treten Versagensfälle äußerst selten auf. Eine fundierte Aussage darüber, wie sich die Reaktionsgrößen einer geschädigten Gewichtsstaumauer verändern, ist daher auf Basis der historischen Aufzeichnungen nicht möglich. In dieser Arbeit werden daher Finite-Elemente-Simulationen mit einer idealisierten, standardisierten Mauer durchgeführt, die die Grundgesamtheit der in Deutschland errichteten Gewichtsstaumauern repräsentiert. Da sich das Sickerwasserströmungsverhalten und somit die Berechnungsergebnisse von Mauern mit und ohne Sohl drainagen grundlegend voneinander unterscheiden, werden beide Ausführungsvarianten getrennt betrachtet.

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass das Sicherheitsniveau insbesondere bei Schäden im Bereich des Mauerkerne, der wasserseitigen Vorsatzschale und am Dichtungsschleier deutlich abfällt. Sofern die Mauer über Untergrund drainagen verfügt, sind diese ebenfalls für die Standsicherheit wesentlich. Schadensprozesse im Untergrund oder an den Mauer drainagen wirken sich dagegen weniger kritisch aus (vgl. Abb. 6.16 und Abb. 6.17).

Bei Mauern ohne Untergrund drainagen nimmt der Sickerwasserabfluss insbesondere bei Schäden im Bereich des Mauerkerne und der wasserseitigen Vorsatzschale zu. Diese beiden Schadensbilder wirken sich darüber hinaus auf die Bewegung des Gewichtslotes aus. Schadensprozesse im Untergrund und am Dichtungsschleier machen sich insbesondere bei den Sohl piezometermessungen bemerkbar (vgl. Abbildungen im Anhang F.1).

Der Sickerwasserabfluss von Mauern mit Untergrund drainagen erhöht sich maßgeblich durch Schäden am Dichtungsschleier und Erosionsprozesse im Bereich der Drainagen. Sind dagegen die Untergrund drainagen defekt, reduzieren sich die Sickerwassermengen. Die Gewichts- und Schwimmotbewegungen werden hauptsächlich durch Schäden im Bereich des Mauerkerne beeinflusst. Eine untergeordnete Rolle spielen Schäden an der Vorsatzschale und an den

Mauerdrainagen. Schäden am Dichtungsschleier und an den Untergrunddrainagen führen zu einer Erhöhung des Sohlpiezometerdrücke. Erosionsprozesse im Bereich der Untergrunddrainagen können dagegen zu einer Druckabnahme führen (vgl. Abbildungen im Anhang F.2).

Den zentralen Kern dieser Arbeit bildet die Auswertung mit den Bayesschen Netzen zur Interpretation der Talsperrenüberwachungsdaten. Hier fließen die statistische Auswertung der historischen Schadensfälle und die Ergebnisse der Betreiberumfrage sowie der Finite-Elemente-Berechnung des idealisierten Bauwerks ein. Das Resultat sind Diagramme, die den Mauerzustand bzw. das Sicherheitsniveau in Abhängigkeit einer Abweichung vom zu erwartenden Normalmesswerte aus der Talsperrenüberwachung aufzeigen.

Je länger die für die Auswertung zur Verfügung stehende Zeitreihe ist, desto präzisere Aussagen können über den Mauerzustand getroffen werden. Die Ergebnisse der Netzberechnungen sind für das Beispiel von täglichen Messungen in den Abb. 8.3, Abb. 8.4 und in der Anlage H.2 zu finden. Diese Diagramme zeigen auf, welche Messinstrumente besonders geeignet sind, um kritische Bauwerksschäden frühzeitig erkennen zu können. Unabhängig vom Mauertyp stellt sich die Sickerwassermessung als die wichtigste Messeinrichtung heraus. Bei Mauern ohne Untergrunddrainage spielen darüber hinaus die Sohlpiezometer eine bedeutende Rolle. Eine redundante Ausstattung beziehungsweise manuelle Vergleichsmessungen sind für diese Messgrößen besonders wertvoll.

Eine weitere Zielsetzung dieser Arbeit ist eine Bewertung, welches Überwachungsintervall für die jeweiligen Messgeräte angemessen ist. Auf Basis der Berechnungsergebnisse wird empfohlen, die Überwachungsintervalle nach Tabelle 9.1 einzuhalten, um eine ausreichende Datengrundlage zur Analyse des Langzeitverhaltens der Talsperrenmessdaten zu schaffen. In der rechten Spalte dieser Tabelle sind zum Vergleich die empfohlenen Messhäufigkeiten nach dem Merkblatt DWA-M 514 (2011) gegenübergestellt.

Im Allgemeinen stimmen die Empfehlungen des Merkblatts DWA-M 514 (2011) mit den Ergebnissen dieser Arbeit überein. Ein Unterschied besteht darin, dass auf Basis der Auswertung des Bayesschen Netzes für das Gewichtslot lediglich ein monatliches Intervall, für das Schwimmloot dagegen ein tägliches Messintervall als sinnvoll erachtet wird. Dies lässt sich damit begründen, dass auf Grund der relativ großen Standardunsicherheit dieser Messgröße für die Formulierung von signifikanten Aussagen eine ausreichende Anzahl von Messdaten erforderlich ist. Darüber hinaus wird zwischen Mauern mit und ohne Untergrunddrainagen differenziert. Bei Mauern ohne Untergrunddrainagen sind Messungen an den wasserseitig angeordneten Piezometern häufiger durchzuführen, um auch nachteilige Veränderungen im Bereich des Mauerkerne eindeutig erfassen zu können.

Voraussetzung für die Regressionsanalyse der Mauerreaktionsgrößen sind außerdem Wasserstandsmesswerte und Mauertemperaturdaten an mindestens einer repräsentativen Stelle, z. B. im Bereich der Mauerkrone. Diese Messgrößen müssen daher entsprechend dem kleinsten Intervall in Tab. 9.1 als Tageswerte verfügbar sein. Aufgrund der Wichtigkeit dieser Größen zur Interpretation der anderen Messdaten ist eine redundante Ausstattung sinnvoll.

Weichen bei der Talsperrenüberwachung die Messwerte vom Erwartungsbereich ab, so ist von Interesse, welches Schadensbild als mögliche Ursache in Frage kommen könnte. Auf Basis dieser Information kann dann ein zielgerichtetes Bauwerksmonitoring oder eine tieferegehende Bauwerkszustandsanalyse erfolgen. In Abb. 8.7, Abb. 8.8 bzw. in Anlage H.4 sind für die jeweiligen Messgeräten Diagramme zusammengestellt, die in Abhängigkeit der Messwerte aufzeigen, welcher Schadenstyp mit welcher Wahrscheinlichkeit vorliegen könnte.

Tab. 9.1: Empfohlene Überwachungsintervalle für verschiedene Messgrößen auf Basis der Berechnungsergebnisse des Bayesschen Netzes im Vergleich zu den Empfehlungen nach DWA-M 514 (2011)

Messgröße	Mauer ohne Untergrunddrainage	Mauer mit Untergrunddrainage	Empfehlung nach DWA-M 514 (2011)
Sickerwasser	täglich*	täglich*	wöchentlich bzw. permanent
Gewichtslot	monatlich	monatlich	wöchentlich
Schwimmlot	täglich	täglich	wöchentlich
Piezometer Wasserseite	täglich*	monatlich	monatlich
Piezometer Mauermitte	zweiwöchentlich	monatlich	monatlich
Piezometer Luftseite	monatlich	monatlich	monatlich
* Da die Erhebung von täglichen Messdaten einen erheblichen personellen Aufwand bedeutet, ist eine permanente automatisierte Erfassung sinnvoll. In größeren Abständen sind die automatisiert erhobenen Messwerte durch den Vergleich mit manuellen Messungen auf Plausibilität zu prüfen.			

Die Arbeit zeigt Methoden auf, um durch statistische Auswertungen von Talsperrenmessdaten das Langzeitverhalten der Gewichtsstaumauern beurteilen zu können. Ein weiterer wichtiger Punkt ist unter Berücksichtigung der spezifischen örtlichen Verhältnisse die Festlegung von Warn- und Alarmwerten. Zum einen muss gewährleistet werden, dass eine Überschreitung bzw. Unterschreitung dieser Werte zeitnah erkannt wird, zum anderen sind insbesondere die dann erforderlich werdenden Maßnahmen zu definieren.

Einige Schäden, wie beispielsweise Vernässungen in den Talflanken oder das Auftreten von Rissen lassen sich aufgrund der immensen Bauwerksabmessungen messtechnisch nicht mit vertretbarem Aufwand erfassen. Daher spielen die visuellen Beobachtungen im Zuge der regelmäßigen Kontrollgänge durch das Sperrenpersonal und des den Sicherheitsbericht erstellenden Ingenieurs eine wichtige Rolle. Auch die Funktionskontrollen von Entnahmeeinrichtungen sind wesentlich, um im entscheidenden Fall eine unschädliche Abfuhr von Hochwässern oder eine Entleerungen der Talsperren in angemessener Zeit sicherstellen zu können.

"Prediction is very difficult, especially if it's about the future."

Dieses humorvolle Zitat von Nils Bohr soll dem Leser vor Augen führen, dass eine Vorhersage immer mit Unsicherheiten behaftet ist. Expertensysteme, wie Bayessche Netze, bilden zwar eine wertvolle Hilfestellung um komplexe Zusammenhänge aufzuzeigen, sie werden aber niemals die Personen ersetzen können, die persönlich mit den komplexen Bauwerken vertraut sind und wichtige Entscheidungen zu treffen und zu verantworten haben.

Literaturverzeichnis

- [ANSYS 2011] ANSYS: *ANSYS mechanical APDL programmers manual*. release 14.0. USA: , 2011
- [ASCE 2000] SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, American: *Guidelines for Instrumentation and Measurements for Monitoring Dam Performance*. ASCE, 2000
- [Backhaus u. a. 2011] BACKHAUS, K. ; ERICHSON, B. ; WEIBER, R.: *Fortgeschrittene multivariate Analysemethoden: eine anwendungsorientierte Einführung*. Springer, 2011. – ISBN 978-3-642-15248-1
- [BAW 2011a] BAW: *Mitteilungen Nr. 94: Geohydraulische Aspekte bei Bauwerken der WSV*. Karlsruhe : Bundesanstalt für Wasserbau, 2011
- [BAW 2011b] BAW: *Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV)*. Bundesanstalt für Wasserbau, Mai 2011
- [Böcker 2005] BÖCKER, D.: *Statistische Analyse von Messwerten der Talsperrenüberwachung*, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Hydrologie, Wasserwirtschaft und Umwelttechnik, Diplomarbeit, Dezember 2005. – unveröffentlicht
- [Bergmeister u. a. 2009] BERGMEISTER, K. ; FINGERLOOS, F. ; WÖRNER, J.-D.: *Beton Kalender - Konstruktiver Hochbau : Aktuelle Massivbaunormen*. Bd. 1. Ernst & Sohn, 2009
- [Betten 2003] BETTEN, J.: *Finite Elemente für Ingenieure 1: Grundlagen, Matrixmethoden, Elastisches Kontinuum*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003. – ISBN 978-3-642-62443-8
- [Betten 2004] BETTEN, J.: *Finite Elemente für Ingenieure 2: Variationsrechnung, Energiemethoden, Näherungsverfahren, Nichtlinearitäten, Numerische Integrationen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 3-540-20447-4
- [Bettzieche 2010] BETTZIECHE, V.: 100 Jahre technische Entwicklung des Talsperrenbaus in Deutschland. In: *Wasserwirtschaft* 1-2 (2010), S. 67–72
- [BGR 2007] BGR: *Geologische Karte der Bundesrepublik Deutschland 1:1000000 der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe*. 2007. – URL <http://geoviewer.bgr.de>. – <http://geoviewer.bgr.de>; Stand: 01.01.2013
- [Bühner und Ziegler 2009] BÜHNER, M. ; ZIEGLER, M.: *Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*. München [u.a.] : Pearson Studium, 2009. – ISBN 978-3-8273-7274-1
- [Bibel u. a. 2013] BIBEL, W. ; ERTEL, W. ; KRUSE, R. ; NEBEL, B.: *Grundkurs Künstliche Intelligenz: Eine praxisorientierte Einführung*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. – ISBN 9783834821577
- [Billeter und Vlach 1981] BILLETTER, E. P. ; VLACH, V.: *Zeitreihen-Analyse: Einführung in die praktische Anwendung*. Physica-Verlag, 1981. – ISBN 3-7908-0257-3

- [Bloss und Grigull 1974] BLOSS, S. ; GRIGULL, U.: Temperaturverteilung in Seen. In: *Zeitschrift für Wasser- und Abwasser-Forschung: WAF* 4 (1974), S. 121 – 127
- [Bollmann 2000] BOLLMANN, K.: *Ettringitbildung in nicht wärmebehandelten Betonen*, Hochschulschrift Bauhaus-Universität Weimar, Diplomarbeit, 2000
- [Box u. a. 2008] BOX, G. E. P. ; JENKINS, G. M. ; REINSEL, G. C.: *Time series analysis: forecasting and control*. 4. ed. Wiley, 2008. – ISBN 978-0-470-27284-8
- [Chatterjee und Price 1995] CHATTERJEE, S. ; PRICE, B.: *Praxis der Regressionsanalyse*. 2. Aufl. Oldenbourg, 1995. – ISBN 3-486-22920-6
- [Choi und Kwon 2014] CHOI, B. H. ; KWON, H. H.: Development of Bayesian Network Based Dam Risk Analysis and its Application to Rockfill Dam in South Korea. In: *Dams in a Global Environmental Challenges*. Bali, Indonesia, Juni 2014
- [Cowell u. a. 1999] COWELL, R. G. ; DAWID, A. P. ; LAURITZEN, S. L. ; SPIEGELHALTER, D. J.: *Probabilistic Networks and Expert Systems*. Springer Verlag New York, 1999. – ISBN 0-387-98767-3
- [Dachroth 2002] DACHROTH, W.: *Handbuch der Baugeologie und Geotechnik*. 3. Springer, 2002. – ISBN 3-540-41353-7
- [Dankert 2014] DANKERT, J.: *Numerische Methoden (Vorlesung und Praktikum, Skript)*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2014
- [Delgado-Hernández u. a. 2014] DELGADO-HERNÁNDEZ, David-Joaquín ; MORALES-NÁPOLES, Oswaldo ; DE-LEÓN-ESCOBEDO, David ; ARTEAGA-ARCOS, Juan-Carlos: A continuous Bayesian network for earth dams risk assessment: an application. In: *Structure and Infrastructure Engineering* 10 (2014), Nr. 2, S. 225–238. – URL <http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2012.731416>
- [DIN 1045-1 2008] DIN 1045-1: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion*. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im Deutschen Institut für Normung e.V., 2008
- [DIN 1319-3 1996] DIN 1319-3: *Grundlagen der Messtechnik - Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße, Messunsicherheit*. Normenausschuss Technische Grundlagen (NATG) im Deutschen Institut für Normung e. V., 1996
- [DIN 19700-10 2004] DIN 19700-10: *Stauanlagen - Teil 10: Gemeinsame Festlegungen*. Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im Deutschen Institut für Normung e. V., 2004
- [DIN 19700-11 2004] DIN 19700-11: *Stauanlagen - Teil 11: Talsperren*. Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im Deutschen Institut für Normung e. V., 2004
- [DIN 4030-1 2008] DIN 4030-1: *Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase - Teil 1: Grundlagen und Grenzwerte*. Normenausschuss Bauwesen (NaBau) im Deutschen Institut für Normung e.V., 2008
- [DIN 4048 Teil 1 1987] DIN 4048 TEIL 1: *Wasserbau - Begriffe: Stauanlagen*. Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im Deutschen Institut für Normung e.V., 1987

- [DIN ISO 5168 2004] DIN ISO 5168: *Durchflussmessung von Fluiden - Unsicherheitsermittlung*. Normenausschuss Technische Grundlagen (NATG) im Deutschen Institut für Normung e. V., 2004
- [Douglas u. a. 1999] DOUGLAS, K. ; SPANNAGLE, M. ; FELL, R.: Estimating the probability of failure of concrete and masonry gravity dams. In: *ANCOLD Bulletin* 112 (1999), S. 53–63
- [Douglas u. a. 1998] DOUGLAS, K. J. ; SPANNAGLE, M. ; FELL, R.: Analysis of Concrete and Masonry Dam Incidents / University of New South Wales, School of Civil and Environmental Engineering. 1998 (R-373). – Forschungsbericht
- [DTK 2003] DTK: *Journalistenhandbuch zum Wasserbau*. Deutsches Talsperren Komitee, 2003
- [Dunnicliff 1993] DUNNICLIFF, J.: *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. John Wiley & Sons, New York, 1993
- [DVWK 1996] DVWK: *Berechnungsverfahren für Gewichtsmauern - Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Untergrund*. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V., 1996 (242)
- [DWA u. a. 2017] DWA ; DTK ; DGGT: *DWA-Themen: Stauanlagensicherheit und Folgen bei der Überschreitung der Bemessungsannahmen nach DIN 19700*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., 2017
- [DWA-M 506 2006] DWA-M 506: *Injektionen mit hydraulischen Bindemitteln in Wasserbauwerken aus Mass beton*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 2006
- [DWA-M 512-1 2012] DWA-M 512-1: *Dichtungssysteme im Wasserbau - Teil 1: Erdbauwerke*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., 2012. – ISBN 978-3-942964-14-2
- [DWA-M 514 2011] DWA-M 514: *Bauwerksüberwachung an Talsperren*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., 2011. – ISBN 978-3-941897-81-6
- [DWD 2013] DWD: *Freie Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes*. Website. 2013. – <http://www.dwd.de>; Stand: 01.01.2013
- [Engesser u. a. 1993] ENGESSER, H. ; CLAUS, V. ; SCHWILL, A.: *Duden Informatik: ein Sachlexikon für Studium und Praxis*. Dudenverlag, 1993. – ISBN 9783411052325
- [Engl u. a. 2009] ENGL, D. A. ; FELLIN, W. ; ZANGERL, C.: Scherfestigkeiten von Scherzonen-Gesteinen - Ein Beitrag zur geotechnischen Bewertung von tektonischen Störungen und Gleitzonen von Massenbewegungen. In: *Bulletin für angewandte Geologie* Bd. 13(2), 2009, S. 63–81
- [Ertel 2009] ERTEL, Wolfgang: *Grundkurs Künstliche Intelligenz - Eine praxisorientierte Einführung*. Vieweg Verlag, 2009. – ISBN 978-3-8348-0783-0

- [Fahland 2004] FAHLAND, S.: *Verformungsverhalten einer kombinierten Bogen-Gewichtsmauer unter Betriebsbedingungen*, Technische Universität Clausthal, Dissertation, 2004
- [Franke u. a. 2007] FRANKE, J. ; BLIEFERNICHT, J. ; GEBLER, T. ; NEUSCHITZER, F. ; WIEPRECHT, S.: Elektronische Messdaten - statistische Analysen bei einem Staudamm mit Asphaltoberflächendichtung. In: *Wasserwirtschaft* 97 (2007), Nr. 1-2, S. 21–24
- [Franke 2011] FRANKE, Jörg: *Einfluss der Überwachung auf die Versagenswahrscheinlichkeit von Staustufen*, Mitteilungsheft des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart, Nr. 202, Promotionschrift, 2011
- [Franke 2013] FRANKE, Jörg: Sicherheitsbewertung von Stauanlagen mit Bayesschen Netzen. In: *Wasserwirtschaft* (2013), Nr. 5
- [Franke und Gebler 2012] FRANKE, Jörg ; GEBLER, Tobias: Sicherheitsbewertung von Wasserbauwerken mit Bayesschen Netzen. In: *5. Erfahrungsaustausch Talsperren Süd-West*. Laufenburg, Juni 2012
- [Franke und Wieprecht 2012] FRANKE, Jörg ; WIEPRECHT, Silke: Bewertung der Versagenswahrscheinlichkeit von Staustufenstandorten mit Bayesschen Netzen. In: *Wasserwirtschaft* (2012), Nr. 1-2
- [Franke und Giesecke 2001] FRANKE, P. ; GIESECKE, J. ; DTK (Hrsg.): *Dams in Germany*. Essen : Verlag Glückauf GmbH, 2001. – 495 S. S. – ISBN 3-7739-5957-5
- [Gebler 2005] GEBLER, T.: *Talsperrenüberwachung - Stand der Technik und Messdatenanalyse des österreichischen Hochwurtendamms*, Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau, Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft in Kooperation mit KELAG - Kärntner Elektrizitätsaktiengesellschaft, Klagenfurt, Diplomarbeit, Dezember 2005. – unveröffentlicht
- [Gebler u. a. 2010] GEBLER, T. ; WIEPRECHT, S. ; MARX, W.: Arch Effect of Curved Gravity Dams. In: *78th ICOLD Annual Meeting in Hanoi, Vietnam* International Commission on Large Dams (Veranst.), Mai 2010
- [Giesecke und Soyeaux 1990] GIESECKE, J. ; SOYEAUX, R.: Unterströmung von Talsperren auf klüftigem Untergrund - hydraulische Berechnung mit Berücksichtigung laminarer und turbulenter Strömung. In: *Wasserwirtschaft* 80 (1990), Nr. 1, S. 20–28
- [Girmscheid u. a. 2003a] GIRMSCHIED, G. ; GAMISCH, T. ; MEINLSCHMIDT, A.: Versinterung von Tunnel drainagen - Empfehlungen für die Instandhaltung von Tunneln. In: *Bauingenieur* 78 (2003), 12
- [Girmscheid u. a. 2003b] GIRMSCHIED, G. ; GAMISCH, T. ; MEINLSCHMIDT, A.: Versinterung von Tunnel drainagen - Empfehlungen für die Planung und Bauausführung von Tunneln in deszendente Wässern. In: *Bauingenieur* 78 (2003), 10
- [Groth und Müller 2009] GROTH, C. ; MÜLLER, G.: *FEM für Praktiker: Temperaturfelder : Basiswissen und Arbeitsbeispiele zu FEM-Anwendungen der Temperaturfeldberechnung*. expert-Verlag, 2009. – ISBN 9783816927143

- [Hamfler 1988] HAMFLER, H.: *Berechnung von Temperatur-, Feuchte- und Verschiebungsfeldern in erhärtenden Betonbauteilen nach der Methode der finiten Elemente*. 1. Aufl. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 1988
- [Hartung u. a. 2005] HARTUNG, J. ; ELPELT, B. ; KLÖSENER, K.-H.: *Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. 14., unwesentlich veränd. Aufl. München : Oldenbourg, 2005. – ISBN 3486578901
- [Hedderich und Sachs 2012] HEDDERICH, J. ; SACHS, L.: *Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R*. 14. Aufl. Berlin : Springer, 2012. – ISBN 3-642-24400-9
- [Herzog 1998] HERZOG, M. A. M.: *Elementare Talsperrenstatik: mit 26 Zahlenbeispielen von ausgeführten Talsperren im Vergleich zum gemessenen Verhalten*. 1. Aufl. Düsseldorf : Werner, 1998. – ISBN 3-8041-2070-9
- [Hildebrandt 2006] HILDEBRANDT, A. B.: *Talsperrenversagen und -sanierung - Theorie und Anwendung am Beispiel der Sanierung eines PSW Oberbeckens*, Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft, Diplomarbeit, 2006
- [Hugin 2016] HUGIN: *Hugin Graphical User Interface*. Explorer. <http://download.hugin.com/webdocs/manuals/Htmlhelp/index.html>: Hugin Expert A/S (Veranst.), 2016. – Stand:01.09.2016
- [Hunkeler u. a. 2007] HUNKELER, F. ; MERZ, C. ; KRONENBERG, P.: *Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) Grundlagen und Maßnahmen bei neuen und bestehenden Kunstbauten*. Bundesamt für Straßen ASTRA, 2007
- [Hyndman und Koehler 2006] HYNDMAN, R. J. ; KOEHLER, A. B.: Another look at measures of forecast accuracy. In: *International Journal of Forecasting* 22 (2006), Nr. 4
- [ICOLD 1973] ICOLD: *Lessons from dam incidents*. Reduced ed. Paris : International Commission on Large Dams - Central Office, 1973
- [ICOLD 1983] ICOLD: *Deterioration of Dams and Reservoirs ; Examples and Their Analysis*. International Commission on Large Dams - Central Office, 1983
- [ICOLD 1995] ICOLD: *Dam failures statistical analysis*. International Commission on Large Dams - Central Office, 1995 (ICOLD bulletin)
- [ICOLD 2008] ICOLD: *The physical properties of hardened conventional concrete in dams*. International Commission on Large Dams, 2008
- [ICOLD u. a. 2012] ICOLD ; ICID ; IHA ; IWRA: *World Declaration - Water Storage for Sustainable Development*. Kyoto : International Commission On Large Dams, International Commission on Irrigation and Drainage, International Hydropower Association, International Water Resources Association, 05. Juni 2012
- [ICOLD EC 2004] ICOLD EC ; RUGGERI, Giovanni (Hrsg.): *Working Group on Sliding Safety of Existing Gravity Dams*. International Commission of Large Dams European Club, 2004

- [Jansen 1988] JANSEN, R. B.: *Advanced dam engineering for design, construction, and rehabilitation*. van Nostrand Reinhold, 1988. – ISBN 0-442-24397-9
- [Jarque und Bera 1987] JARQUE, C. M. ; BERA, A. K.: A Test for Normality of Observations and Regression Residuals. In: *International Statistical Review / Revue Internationale de Statistique* 55 (1987), Nr. 2, S. pp. 163–172
- [Jensen und Nielsen 2001] JENSEN, F. V. ; NIELSEN, T. D.: *Bayesian Networks and Decision Graphs*. Springer, 2001. – ISBN 9780387682815
- [Jong und Leu 2013] JONG, C. G. ; LEU, S. S.: Bayesian-Network-Based Hydro-Power Fault Diagnosis System Development by Fault Tree Transformation. In: *Journal of Marine Science and Technology* 21 (2013), Nr. 4, S. 367–379
- [Jox 2009] JOX, S.: *3D hygromechanische Modellierung von Rissbildung in Verbindung mit Feuchtetransport in Betonstrukturen auf Basis der Extended Finite Element Method*, Institut für konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 2009
- [Kühme u. a. 2006] KÜHME, M. ; BURKERT, W. ; SCHATTSCHEIDER, H.: Betontechnologie für das Absperrbauwerk der Talsperre Leibis/Lichte. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 101 (2006), S. 268–276
- [Kjaerulff und Madsen 2008] KJAERULFF, U. B. ; MADSEN, A. L.: *Bayesian Networks and Influence Diagrams: A Guide to Construction and Analysis*. Springer, 2008. – ISBN 978-0-387-74100-0
- [Klebsattel 2012] KLEBSATTEL, G.: Vorstellung der Anlagen der Schluchseewerk AG. In: *5. Erfahrungsaustausch Talsperren Südwest*, Juni 2012
- [Knothe und Wessels 1999] KNOTHE, K. ; WESSELS, H.: *Finite Elemente: Eine Einführung für Ingenieure*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999. – ISBN 978-3-662-07236-3
- [Könke u. a. 2002] KÖNKE, C. ; BETTZIECHE, V. ; KÖNIG, C.: Standsicherheitsuntersuchungen an Talsperren. In: *8. Fachtagung Baustatik-Baupraxis in Braunschweig*, 2002
- [Leiner 1991] LEINER, B.: *Einführung in die Zeitreihenanalyse*. Oldenbourg R. Verlag GmbH, 1991. – ISBN 9783486219067
- [Li u. a. 2009] LI, D. ; H., Liu ; S., Wu: Reliability analysis of embankment dams using Bayesian network. In: *2nd International Symposium on Geotechnical Risk and Safety*. Gifu, Japan, Juni 2009
- [Li und Liang 2016] LI, Ping ; LIANG, Chuan: Risk Analysis for Cascade Reservoirs Collapse Based on Bayesian Networks under the Combined Action of Flood and Landslide Surge. In: *Mathematical Problems in Engineering* (2016). – URL <http://dx.doi.org/10.1155/2016/2903935>
- [Lilliefors 1967] LILLIEFORS, H. W.: On the Kolmogorov-Smirnov Test for Normality with Mean and Variance Unknown. In: *Journal of the American Statistical Association* 62 (1967), Nr. 318, S. 399–402

- [Louis 1967] LOUIS, C.: *Strömungsvorgänge in klüftigen Medien und ihre Wirkung auf die Standsicherheit von Bauwerken und Böschungen im Fels*. Bd. Heft 30. Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der TH Karlsruhe, 1967
- [Ma u. a. 2014] MA, Guodong ; PENG, Hui ; JIANG, Qiangqiang ; LI, Mi ; ZHANG, Jinlai ; WU, Shengliang: The risk analysis of dam gate based on Bayesian Network and Hydraulic mechanics. In: *Advanced Research on Energy, Chemistry and Materials Application* Bd. 848, Trans Tech Publications, 2 2014, S. 112–116
- [Maniak 2010] MANIAK, U.: *Hydrologie und Wasserwirtschaft: eine Einführung für Ingenieure*. 6. Berlin : Springer, 2010. – ISBN 978-3-642-05395-5
- [Melbinger 2005] MELBINGER, R.: Dam Safety - General Aspects. In: *2nd Experts Seminar Dam Surveillance Practice, 30.05.-02.06.2005, Kaprun, Österreich*, 2005
- [Merkel und Öchsner 2015] MERKEL, M. ; ÖCHSNER, A.: *Eindimensionale Finite Elemente: Ein Einstieg in die Methode*. Springer Berlin Heidelberg, 2015. – ISBN 9783642544828
- [Mittelsdorf 2007] MITTELSDORF, H.: *Die Geschichte der Saale-Talsperren (1890-1945)*. Vopelius, 2007. – ISBN 9783939718031
- [Möller 2013] MÖLLER, G.: *Geotechnik - Bodenmechanik*. 2. Ernst, 2013. – ISBN 978-3-433-02996-1
- [Morgenschweis 2010] MORGENSCHWEIS, G.: *Hydrometrie: Theorie und Praxis der Durchflussmessung in offenen Gerinnen*. Berlin : Springer, 2010. – XIV, 582 S. S. – ISBN 978-3-642-05389-4
- [Moss 2005] MOSS, T. R.: *The Reliability Data Handbook*. Professional Engineering Publishing Limited, London and Bury St Edmunds, UK, 2005. – ISBN 1-86058-444-6
- [Möser u. a. 2012] MÖSER, M. ; HOFFMEISTER, H. ; MÜLLER, G. ; STAIGER, R. ; SCHLEMMER, H. ; WANNINGER, L.: *Handbuch Ingenieurgeodäsie - Grundlagen*. 4., völlig neu bearb. Aufl. Heidelberg : Wichmann Verlag, 2012. – XII, 628 S. S. – ISBN 978-3-87907-504-1
- [Mulenga 2002] MULENGA, D. M.: *Zum Sulfatangriff auf Beton und Mörtel einschließlich der Thaumasitbildung*. Berlin, Hochschulschrift Bauhaus-Universität Weimar, Diplomarbeit, 2002
- [Müller und Groth 2007] MÜLLER, G. ; GROTH, C.: *FEM für Praktiker: Grundlagen : Basiswissen und Arbeitsbeispiele zu FEMAnwendungen*. expert-Verlag, 2007 (Edition expertsoft). – ISBN 9783816926856
- [Neapolitan 2004] NEAPOLITAN, R.E.: *Learning bayesian networks*. Pearson Prentice Hall, 2004
- [Neumann 1964] NEUMANN, R.: *Geologie für Bauingenieure*. Berlin, München : Ernst & Sohn, 1964
- [Prinz und Strauss 2011] PRINZ, H. ; STRAUSS, R.: *Ingenieurgeologie*. 5. Auflage. Berlin : Springer, 2011

- [Rao und Babu 2015] RAO, V.V.S. ; BABU, G.L.S.: *Forensic Geotechnical Engineering*. Springer India, 2015 (Developments in Geotechnical Engineering). – 103–111 S. – URL <https://books.google.de/books?id=Q2J1CgAAQBAJ>. – ISBN 9788132223771
- [Rissler 1998] RISSLER, P.: *Talsperrenpraxis*. Oldenbourg Verlag GmbH, München, 1998
- [Roch 2015] ROCH, C.: *La digue apres la rupture*. 2015. – Bouzey; <http://www.chalet-bouzey.com/Bouzey1/album/slides/bouzey3.html>; Stand: 18.12.2015
- [Rowe 2001] ROWE, R. K.: *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook*. 1. Aufl. Bosten : Kluwer Academic Publishers, 2001
- [Ruffert 1999] RUFFERT, G.: *Lexikon der Betoninstandsetzung*. Fraunhofer-IRB-Verl., 1999. – ISBN 3-8167-4710-8
- [Rust 2011] RUST, W.: *Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen, Kontakt, Geometrie, Material*. Vieweg Teubner Verlag, 2011. – ISBN 978-3-8348-1491-3
- [Sachs 1971] SACHS, L.: *Statistische Auswertungsmethoden*. Kiel : Springer Verlag, 1971. – ISBN 3-540-05520-7
- [Sauer u. a. 2017] SAUER, K. ; GÖRTZ, J. ; TERHEIDEN, K.: Bestimmung der Erdbbensicherheit von Gewichtsmauern: Ansätze im Vergleich. In: *Wasserwirtschaft* 4 (2017), S. 48–52
- [Saxena und Sharma 2005] SAXENA, K. R. ; SHARMA, V. M.: *Dams: incidents and accidents*. Balkema, 2005. – ISBN 90-5809-701-3
- [Schlegel 2004] SCHLEGEL, R.: *Numerische Berechnung von Mauerwerkstrukturen in homogenen und diskreten Modellierungsstrategien*, Bauhaus-Universität Weimar, Dissertation, 2004
- [Schlegel 2005] SCHLEGEL, R.: Nichtlineare Berechnung von Beton und Stahlbetonkonstruktionen nach DIN 1045-1 mit ANSYS. In: *23rd CADFEM Users Meeting*, November 2005
- [Schlegel 2006] SCHLEGEL, R.: Materialmodelle für das Bauwesen und die Geotechnik in ANSYS. In: *24th CADFEM Users Meeting*, 2006
- [Schlegel 2011] SCHLEGEL, R.: Dynardos material library multiPlas for ANSYS. In: *Schulung Uni Stuttgart*, 04 2011
- [Schlegel und Will 2009] SCHLEGEL, R. ; WILL, J.: *multiPlas - Elastoplastic Material Models for ANSYS*. Version 6. Weimar: dynardo (Veranst.), 9 2009
- [Schlittgen 2001] SCHLITTFEN, R.: *Angewandte Zeitreihenanalyse*. München : Oldenbourg, 2001. – ISBN 3-486-25805-2
- [Schmitz 1989] SCHMITZ, B.: *Einführung in die Zeitreihenanalyse: Modelle, Softwarebeschreibung, Anwendungen*. 1. Aufl. Huber, 1989. – ISBN 3-456-81793-2

- [Schön 1983] SCHÖN, J.: *Petrophysik - physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen*. Stuttgart : F. Enke, 1983
- [Schönborn 2003] SCHÖNBORN, W.: *Lehrbuch der Limnologie*. Stuttgart : Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 05 2003. – ISBN ISBN 978-3-510-65204-4
- [Schnell u. a. 2011] SCHNELL, R. ; HILL, P. B. ; ESSER, E.: *Methoden der empirischen Sozialforschung*. 9., aktualisierte Aufl. München : Oldenbourg, 2011. – XIV, 577 S. S. – ISBN 978-3-486-59106-4
- [Smith 2006] SMITH, Marc: Dam Risk Analysis Using Bayesian Networks. In: *ECI Conference on Geohazards, Lillehammer, Norway*, URL <http://services.bepress.com/eci/geohazards/10>, 2006
- [Smoltczyk 2001a] SMOLTCZYK, U.: *Grundbau-Taschenbuch Teil 1 - Geotechnische Grundlagen*. 6. Auflage. Berlin : Ernst & Sohn, 2001. – ISBN 3-433-01445-0
- [Smoltczyk 2001b] SMOLTCZYK, U.: *Grundbau-Taschenbuch Teil 2 - Geotechnische Verfahren*. 6. Auflage. Ernst & Sohn, 2001. – ISBN 3-433-01446-9
- [Soyeaux 1991] SOYEAX, R.: *Unterströmung von Stauanlagen auf klüftigem Untergrund unter Berücksichtigung laminarer und turbulenter Fließzustände*. Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart, 1991. – ISBN 3-921694-72-8
- [Stahlmann 1991] STAHLMANN, J.: *Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Erosionsstabilität von gefüllten Trennflächen im Untergrund von Talsperren*, Inst. für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau der RWTH Aachen, Hochschulschrift, 1991
- [Steinke 2015] STEINKE, P.: *Finite-Elemente-Methode: Rechnergestützte Einführung*. Springer Berlin Heidelberg, 2015. – ISBN 9783642539374
- [STK 2005a] STK: *Messanlagen zur Talsperrenüberwachung - Messanlagen und Messmethoden*. Bd. Teil 2. Schweizerisches Talsperrenkomitee, 2005
- [STK 2005b] STK: *Messanlagen zur Talsperrenüberwachung - Messgeräte/Messmethoden*. Bd. Teil 3. Schweizerisches Talsperrenkomitee, 2005
- [Straub 2008] STRAUB, Daniel: *Information Updating in Infrastructure Systems Subject to Multiple Hazards*. Invited lecture, University of Washington, Seattle. April 2008. – URL http://www.era.bv.tum.de/pdfs/Presentations/2008_Straub_UW.pdf
- [Streit 2007] STREIT, U.: *Einführung in die Geostatistik*. 2007. – html-Skript Version 2.4; <http://ifgivor.uni-muenster.de/vorlesungen/Geostatistik/index.html>; Stand:01.01.2013
- [Tönnis 2002] TÖNNIS, B.: *Zuverlässigkeitsanalyse für die Staumauer der Diemeltalsperre*, Hochschulschrift der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Diplomarbeit, 2002

- [Trujillo-Ortiz u. a. 2007] TRUJILLO-ORTIZ, A. ; HERNANDEZ-WALLS, R. ; BARBAROJO, K. ; CASTRO-PEREZ, A.: *Anderson-Darling test for assessing normality of a sample data*. 2007. – URL <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/loadFile.do?objectId=14807>. – MATLAB file; <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/loadFile.do?objectId=14807>
- [Tschirk 2014] TSCHIRK, W.: *Statistik: Klassisch oder Bayes*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. – ISBN 978-3-642-54384-5
- [Urban 2006] URBAN, G.: *80 Jahre Schwarzenbachwerk*. EnBW, 2006
- [Vogel 1983] VOGEL, A.: *Mathematische und statistische Tabellen*. Wittwer, 1983. – ISBN 3-87919-597-8
- [Weber 2009] WEBER, S.: *Betoninstandsetzung: Baustoff, Schadenfeststellung, Instandsetzung*. 1. Vieweg + Teubner, 2009. – ISBN 978-3-8351-0184-5
- [WHG 2009] WHG: *Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz)*. letzte Änderung 18. Juli 2017. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2009
- [Wieprecht u. a. 2015] WIEPRECHT, S. ; STOLZ, D. ; GÖRTZ, J.: *Standsicherheitsberechnung und -nachweise der Heimbachsperrre für ein vollständig sedimentiertes Becken / Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart*. 2015 (9/20158). – Forschungsbericht. unveröffentlicht
- [Will 1999] WILL, J.: *Beitrag zur Standsicherheitsberechnung im geklüfteten Fels in der Kontinuums- und Diskontinuumsmechanik unter Verwendung impliziter und expliziter Berechnungsstrategien*, Bauhaus Universität Weim, Dissertation, 1999
- [Wittke 1984] WITTKKE, W.: *Felsmechanik: Grundlagen für wirtschaftliches Bauen im Fels*. Berlin : Springer, 1984. – XVII, 1050 S. S. – ISBN 3-540-13016-0
- [Wouters 2010] WOUTERS, R.: *Talsperren in Sachsen-Anhalt - Wasser für Mitteldeutschland*. Mitteldeutscher Verlag GmbH, Halle (Saale), 2010
- [Yu 2006] YU, C. W. (Hrsg.): *Durability of materials and structures in building and civil engineering*. Whittles Publishing, CRC Press, 2006. – ISBN 1-870325-58-3
- [Zenz 2008] ZENZ, Gerald: *Long Term Behaviour of Dams - Earthquake Loading Desing*. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Long Time Effects and Seepage Behavior of Dams*. Nanjing, China, 2008
- [Zhang u. a. 2017] ZHANG, L. ; PENG, M. ; CHANG, D. ; XU, Y.: *Dam Failure Mechanisms and Risk Assessment*. Wiley, 2017. – URL <https://books.google.de/books?id=vuRhDgAAQBAJ>. – ISBN 9781118558546
- [Zöllner 2009] ZÖLLNER, F.: *Implementierung und Anwendung netzfreier Methoden im Konstruktiven Wasserbau und in der Hydromechanik*, Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart, Dissertation, 2009

A Verteilungsfunktionen

A.1 Normalverteilung

Dichtefunktion der Normalverteilung:

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (\text{A.1})$$

mit

μ

Lageparameter (Mittelwert)

σ

Skalierungsparameter (Standardabweichung)

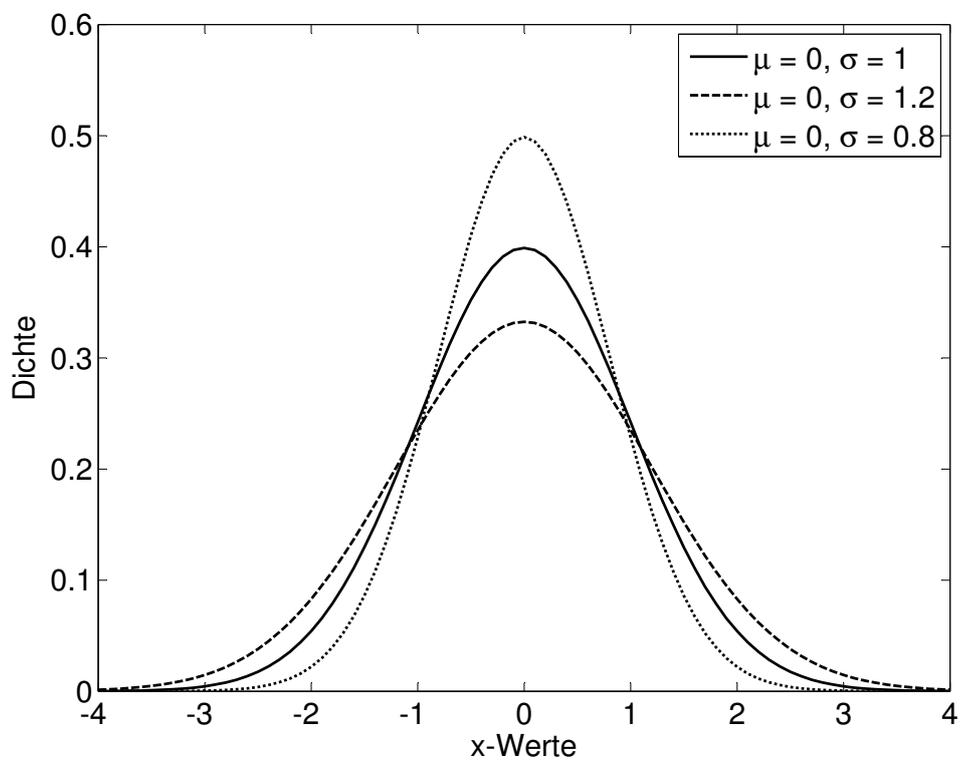


Abb. A.1: Dichtefunktion der Normalverteilung und Sonderfall Standardnormalverteilung mit $\mu = 0$ und $\sigma = 1$

A.2 t Location-Scale Verteilung

Dichtefunktion der t Location-Scale Verteilung:

$$f(x|\mu, \nu, \sigma) = \frac{\Gamma\left(\frac{\nu+1}{2}\right)}{\sigma\sqrt{\nu\pi}\Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)} \left(\frac{\nu + \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}{\nu}\right)^{-\left(\frac{\nu+1}{2}\right)} \quad (\text{A.2})$$

mit

- μ Lageparameter
- σ Skalierungsparameter ($\sigma > 0$)
- ν Formparameter ($\nu > 0$), für $\nu \rightarrow \infty$ entspricht die Verteilung der Normalverteilung

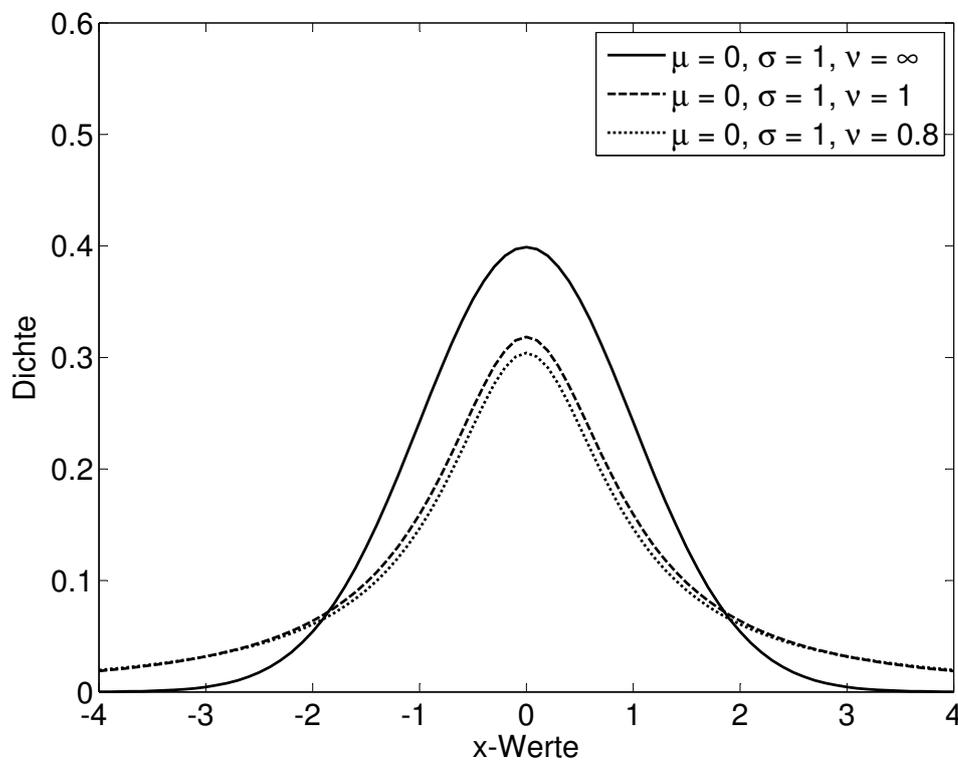


Abb. A.2: Dichtefunktion der t Location-Scale Verteilung und Sonderfall Standardnormalverteilung mit $\mu = 0$, $\sigma = 1$ und $\nu = \infty$

B Beispiele für Bayessche Netze

B.1 Beispiel Fabrik

Dieses an Sachs (1971) angelehnte Beispiel dient der Veranschaulichung des Bayesschen Theorems (Gl. 2.50 auf Seite 25).

Sachverhalt

Eine Fabrik verfügt über drei Maschinen um ein bestimmtes Produkt herzustellen. Maschine M1 ist zu 20 %, Maschine M2 zu 30 % und Maschine M3 zu 50 % an der Gesamtproduktion beteiligt. Die Wahrscheinlichkeit, dass M1 ein defektes Produkt herstellt sei 1 %, die Wahrscheinlichkeit, dass M2 ein defektes Produkt herstellt sei 2 % und die Wahrscheinlichkeit, dass M3 ein defektes Produkt herstellt sei 5 %.

Bayessches Netz und Wahrscheinlichkeitstabellen

Das in Abb. B.1 dargestellte Bayessche Netz gibt den beschriebenen Sachverhalt wieder. Das Netz besteht aus dem Knoten *Fabrik*, der mit einer zum Knoten *Produkt* gerichteten Kante verbunden ist. Der zugehörige Anteil der drei Maschinen an der Gesamtproduktion ist als a-priori-Wahrscheinlichkeit in der oberen Tabelle in Abb. B.1 eingetragen. Darüber hinaus sind die bedingten Wahrscheinlichkeiten des Knotens *Produkt*, der die Zustände intakt *i* oder defekt *d* aufweisen kann, dargestellt. Beispielsweise ist $P(d | M1) = 1\%$.

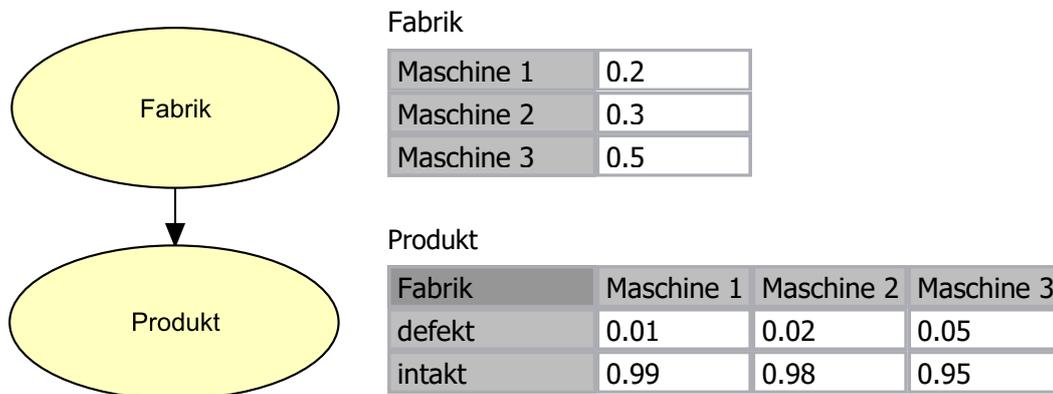


Abb. B.1: Beispiel Fabrik: Bayessches Netz und Wahrscheinlichkeitstabellen

Fall 1

Wie groß ist der Anteil an intakten Produkten an der Tagesproduktion?

Die Lösung ergibt sich direkt nach Ausführung der Netzberechnung (vgl. Abb. B.2). Händisch berechnet sich die Wahrscheinlichkeit für ein intaktes Produkt $P(i)$ wie folgt:

$$P(i) = P(M1) \cdot P(i | M1) + P(M2) \cdot P(i | M2) + P(M3) \cdot P(i | M3) \quad (\text{B.1})$$

$$P(i) = 0,2 \cdot 0,99 + 0,3 \cdot 0,98 + 0,5 \cdot 0,95 = 96,70\%$$

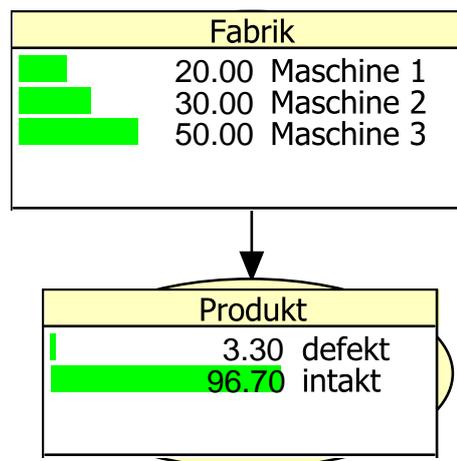


Abb. B.2: Beispiel Fabrik Fall 1: Ergebnis Netzberechnung

Fall 2

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Produkt intakt ist, wenn lediglich Maschine 3 eingesetzt wird?

Im Fall 2 liegt die Zusatzinformation vor, dass lediglich die Maschine 3 eingesetzt wird. Die Wahrscheinlichkeit $P(i | M3)$ ist bereits in der Aufgabenstellung benannt und beträgt 95,0 %. Die Auswertung des Netzes unter Berücksichtigung der Vorinformation, dass der Knoten *Fabrik* den Zustand M3 aufweist, ist in Abb. B.3 dargestellt. Durch Vorinformationen definierte Knotenzustände sind rot markiert.

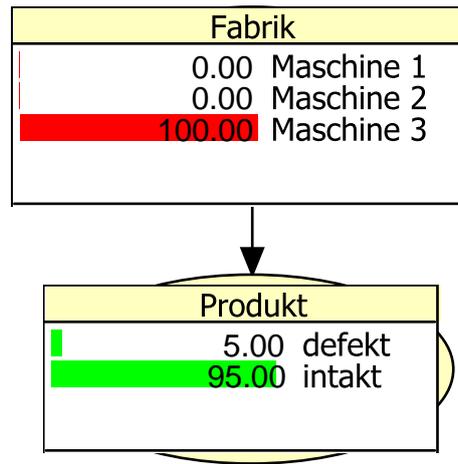


Abb. B.3: Beispiel Fabrik Fall 2: Ergebnis Netzberechnung mit Vorinformation „Fabrik betreibt nur Maschine 3“

Fall 3

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein rein zufällig entnommenes Produkt von Maschine 1 stammt, vorausgesetzt, dass es sich um ein defektes Produkt handelt?

Gesucht ist die Wahrscheinlichkeit $P(M1 | d)$. Diese lässt sich durch Anwendung des Bayesschen Theorems (Gl. 2.50 auf Seite 25) ermitteln:

$$P(M1 | d) = \frac{P(M1) \cdot P(d | M1)}{P(M1) \cdot P(d | M1) + P(M2) \cdot P(d | M2) + P(M3) \cdot P(d | M3)} \quad (\text{B.2})$$

$$P(M1 | d) = \frac{0,2 \cdot 0,01}{0,2 \cdot 0,01 + 0,3 \cdot 0,02 + 0,5 \cdot 0,05} = 6,06 \%$$

Wird zur Beantwortung der Frage das Bayessche Netz eingesetzt, ist das Ergebnis in Abb. B.4 ersichtlich. Als Vorinformation ist hier der Produktzustand defekt eingestellt.

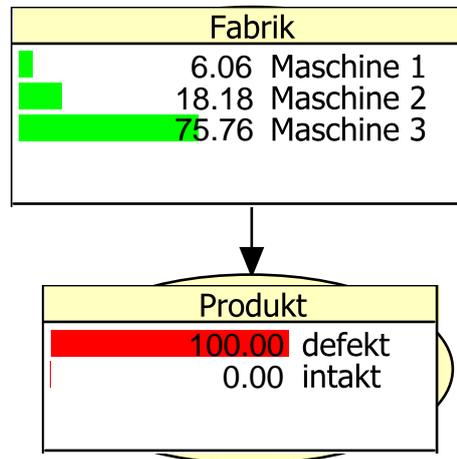


Abb. B.4: Beispiel Fabrik Fall 3: Ergebnis Netzberechnung mit Vorinformation „Produkt defekt“

B.2 Beispiel Alarmanlage

Das folgende Beispiel wird in der Literatur zu Bayesschen Netzen, beispielsweise in Ertel (2009), häufig beschrieben, da es anschaulich den Informationsfluss in einem Netz und die Auswirkung von Vorinformationen auf die Knotenwahrscheinlichkeiten zeigt.

Sachverhalt

Bob hat in seinem Haus eine Alarmanlage installiert, um vor Einbrechern gewarnt zu werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass eingebrochen wird liegt bei 0,1 %. Während er auf der Arbeitsstelle ist, informieren ihn seine beiden Nachbarn John und Mary über eine Aktivierung der Alarmanlage. Wird ein Alarm ausgelöst, rufen unabhängig voneinander John zu 90 % und die schwerhörige Mary zu 70 % an. Es kommt jedoch auch vor, dass John zu 5 % und Mary zu 1 % anrufen, obwohl kein Alarm ausgelöst wurde. Zu 0,2 % tritt ein Erdbeben auf, welches einen Fehlalarm auslösen kann.

Bayessches Netz und Wahrscheinlichkeitstabellen

In Abb. B.5 ist das für diese Situation zugehörige Bayessche Netz dargestellt. Zwischen dem Knoten *Einbruch* und *Erdbeben* besteht keine Verbindung, da beide Ereignisse unabhängig voneinander auftreten können. In Abb. B.6 sind die für das Beispiel zugehörigen Wahrscheinlichkeitstabellen aufgeführt. Darunter befindet sich auch die Tabelle für den Knoten *Alarm*, mit den aus den Erfahrungen des Alarmanlagenherstellers abgeleiteten bedingten Wahrscheinlichkeiten.

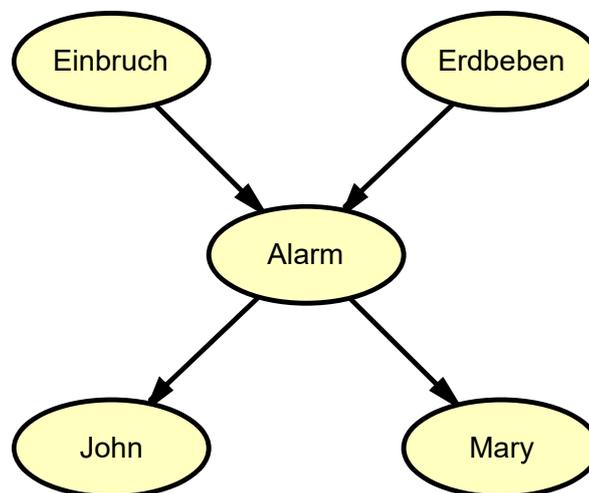


Abb. B.5: Beispiel Alarm: Bayessches Netz

ia	0.001
nein	0.999

ia	0.002
nein	0.998

Erdbeben	ia		nein	
Einbruch	ia	nein	ia	nein
ia	0.95	0.29	0.94	0.001
nein	0.05	0.71	0.06	0.999

Alarm	ia	nein
ruft an	0.9	0.05
ruft nicht an	0.1	0.95

Alarm	ia	nein
ruft an	0.7	0.01
ruft nicht an	0.3	0.99

Abb. B.6: Beispiel Alarm: Wahrscheinlichkeitstabellen

Berechnung der Knotenwahrscheinlichkeiten

Die Wahrscheinlichkeit für die Knoten *Einbruch* und *Erdbeben*, welche keine Eltern besitzen, lässt sich direkt aus den Wahrscheinlichkeitstabellen entnehmen.

$$\begin{aligned}
 P(Ei = ja) &= 0,001 \quad \text{bzw.} \quad P(Ei = nein) = 0,999 \\
 P(Er = ja) &= 0,002 \quad \text{bzw.} \quad P(Er = nein) = 0,998
 \end{aligned}
 \tag{B.3}$$

Für die Berechnung der weiteren Knoten wird als erster Schritt die Verbundwahrscheinlichkeit $P(U)$ aller Knoten nach Gl. 2.52 auf S. 28 aufgestellt.

$$P(U) = P(Ei, Er, Al, Ja, Ma) = P(Ei) \cdot P(Er) \cdot P(Al \mid Ei, Er) \cdot P(Jo \mid Al) \cdot P(Ma \mid Al)
 \tag{B.4}$$

Die zum Knoten *Alarm* zugehörigen Wahrscheinlichkeiten $P(Al = ja)$ und $P(Al = nein)$ hängen lediglich von den Vorgängerknoten ab, so dass sich die Verbundwahrscheinlichkeit auf Gl. B.5 reduzieren lässt.

$$P(Ei, Er, Al) = P(Ei) \cdot P(Er) \cdot P(Al \mid Ei, Er)
 \tag{B.5}$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Alarm ausgelöst wird $P(Al = ja)$, errechnet sich auf Grundlage der Gl. 2.53 auf Seite 28 aus der Summe sämtlicher Kombinationen der Ereignisse der

Vorgängerknoten.

$$\begin{aligned}
 P(Al = ja) &= P(Ei = ja, Er = ja, Al = ja) + P(Ei = nein, Er = ja, Al = ja) + \\
 &P(Ei = ja, Er = nein, Al = ja) + P(Ei = nein, Er = nein, Al = ja)
 \end{aligned}
 \tag{B.6}$$

Im nächsten Schritt wird nun die Verbundwahrscheinlichkeit aus Gl. B.5 eingesetzt.

$$\begin{aligned}
 P(Al = ja) &= P(Ei = ja) \cdot P(Er = ja) \cdot P(Al = ja | Ei = ja, Er = ja) + \\
 &P(Ei = nein) \cdot P(Er = ja) \cdot P(Al = ja | Ei = nein, Er = ja) + \\
 &P(Ei = ja) \cdot P(Er = nein) \cdot P(Al = ja | Ei = ja, Er = nein) + \\
 &P(Ei = nein) \cdot P(Er = nein) \cdot P(Al = ja | Ei = nein, Er = nein)
 \end{aligned}
 \tag{B.7}$$

Unter Berücksichtigung der Werte aus den Wahrscheinlichkeitstafeln lässt sich nun $P(Al = ja)$ ermitteln:

$$\begin{aligned}
 P(Al = ja) &= 0,001 \cdot 0,002 \cdot 0,95 + 0,999 \cdot 0,002 \cdot 0,29 + \\
 &0,001 \cdot 0,998 \cdot 0,94 + 0,999 \cdot 0,998 \cdot 0,001 = 0,00252
 \end{aligned}
 \tag{B.8}$$

Für die Ermittlung der zum Knoten *John* zugehörigen Wahrscheinlichkeiten wird die Verbundwahrscheinlichkeit aus Gl. B.4 entsprechend reduziert, da keine Abhängigkeit zum Knoten *Mary* besteht.

$$P(Ei, Er, Al, Jo) = P(Ei) \cdot P(Er) \cdot P(Al | Ei, Er) \cdot P(Jo | Al)
 \tag{B.9}$$

Basierend auf Gl. B.9 errechnet sich die Wahrscheinlichkeit, dass John anruft, wie folgt:

$$\begin{aligned}
 P(Jo = ja) &= \\
 &P(Ei = ja) \cdot P(Er = ja) \cdot P(Al = ja | Ei = ja, Er = ja) + P(Jo = ja | Al = ja) + \\
 &\dots \\
 &P(Ei = nein) \cdot P(Er = nein) \cdot P(Al = nein | Ei = nein, Er = nein) + P(Jo = ja | Al = nein) = \\
 &0,001 \cdot 0,002 \cdot 0,95 \cdot 0,9 + \\
 &\dots \\
 &0,999 \cdot 0,998 \cdot 0,999 \cdot 0,05 \\
 &= 0,05214
 \end{aligned}
 \tag{B.10}$$

Die Wahrscheinlichkeit für den Knoten *Mary* wird analog zu obiger Vorgehensweise ermittelt. Abb. B.7 zeigt die Darstellung Rechenergebnisse unter Anwendung des Programms Hugin Expert.

Einbruch	Erdbeben
0.1000 ja 99.9000 nein	0.2000 ja 99.8000 nein
Alarm	
0.2516 ja 99.7484 nein	
John	Mary
5.2139 ruft an 94.7861 ruft nicht an	1.1736 ruft an 98.8264 ruft nicht an

Abb. B.7: Beispiel Alarm: Ergebnis Netzberechnung

Berechnung unter Berücksichtigung von Beobachtungen

Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Berechnung des Netzes unter Berücksichtigung von Beobachtungen dargestellt.

Fall 1

Gesucht ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Alarm ausgelöst wird, wenn bekannt ist, dass ein Einbruch stattgefunden hat. Die gesuchte Wahrscheinlichkeit $P(Al = ja \mid Ei = ja)$ errechnet sich auf Grundlage der Gl. 2.55 auf Seite 28 wie folgt:

$$P(Al = ja \mid Ei = ja) = \frac{P(Ei = ja, Al = ja)}{P(Ei = ja)} \quad (\text{B.11})$$

Da eine Information über einen Vorgängerknoten vorliegt, kann für den Knoten *Alarm* direkt die Verbundwahrscheinlichkeit aus Gl. B.5 herangezogen werden. Für den Zähler in Gl. B.11 gilt:

$$\begin{aligned} P(Ei = ja, Al = ja) &= P(Ei = ja, Er = ja, Al = ja) + P(Ei = ja, Er = nein, Al = ja) \\ &= P(Ei = ja) \cdot P(Er = ja) \cdot P(Al = ja \mid Ei = ja, Er = ja) + \\ &\quad P(Ei = ja) \cdot P(Er = nein) \cdot P(Al = ja \mid Ei = ja, Er = nein) \\ &= 0,001 \cdot 0,002 \cdot 0,95 + 0,001 \cdot 0,998 \cdot 0,94 \\ &= 9,4002 \cdot 10^{-4} \end{aligned} \quad (\text{B.12})$$

Der Nenner in Gl. B.11 ist bekannt (vgl. Gl. B.3). Somit errechnet sich die gesuchte Wahrscheinlichkeit zu:

$$P(Al = ja \mid Ei = ja) = \frac{P(Ei = ja, Al = ja)}{P(Ei = ja)} = \frac{9,4002 \cdot 10^{-4}}{0,001} = 0,94002 \quad (\text{B.13})$$

In Abb. B.8 ist das Ergebnis der Netzberechnung mit der Vorinformation über den Knoten *Einbruch* dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Wahrscheinlichkeiten für den Knoten *Erdbeben* unverändert bleiben, da hier eine konvergierende Verbindung vorliegt. Die beiden Ereignisse sind voneinander unabhängig.

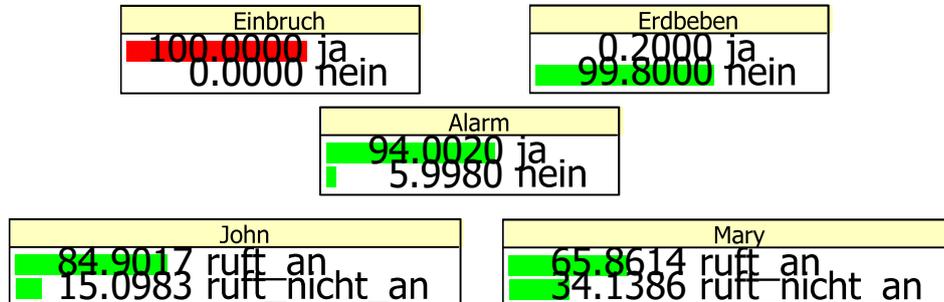


Abb. B.8: Beispiel Alarm Fall 1: Ergebnis Netzberechnung mit Vorinformation „Einbruch hat stattgefunden“

Fall 2

Im nächsten Fall liegt die umgekehrte Situation vor. Ein Alarm wurde ausgelöst und nun stellt sich die Frage wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein Dieb eingebrochen ist.

$$P(Ei = ja \mid Al = ja) = \frac{P(Ei = ja, Al = ja)}{P(Al = ja)} \quad (\text{B.14})$$

Der Zähler der Gleichung B.14 wurde bereits in Gl. B.12 ermittelt, der Nenner in Gleichung B.8.

$$P(Ei = ja \mid Al = ja) = \frac{9,4002 \cdot 10^{-4}}{0,00252} = 0,37355 \quad (\text{B.15})$$

Zwischen dem Knoten *Einbruch* und dem Knoten *John* bzw. dem Knoten *Mary* besteht eine serielle Verbindung. Durch die Beobachtung, dass ein Alarm ausgelöst wurde, wurde der Informationsfluss dieser Verbindung blockiert. Daher müssen diese Knoten in obiger Berechnung nicht berücksichtigt werden. Abb. B.9 zeigt das Ergebnis der Netzberechnung für Fall 2.

Fall 3

In diesem Fall liegen nun die zwei Vorinformationen vor: $Ei = ja$ und $Al = ja$. Gesucht ist die Wahrscheinlichkeit, dass gleichzeitig ein Erdbeben aufgetreten ist.

$$P(Er = ja \mid Ei = ja, Al = ja) = \frac{P(Ei = ja, Er = ja, Al = ja)}{P(Ei = ja, Al = ja)} \quad (\text{B.16})$$

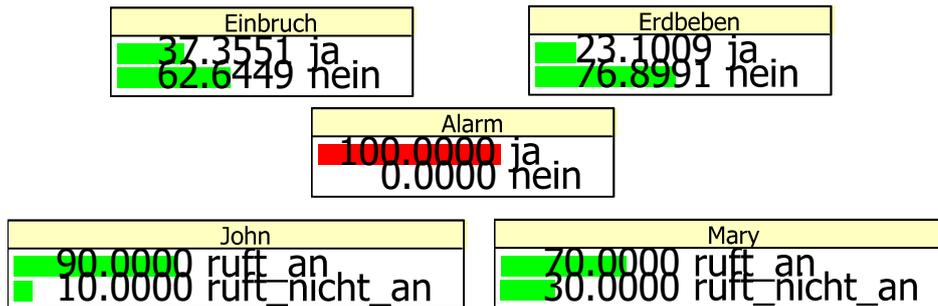


Abb. B.9: Beispiel Alarm Fall 2: Ergebnis Netzberechnung mit Vorinformation „Alarm wurde ausgelöst“

Der Zähler berechnet sich wie folgt:

$$\begin{aligned}
 P(Ei = ja, Er = ja, Al = ja) &= P(Ei = ja) \cdot P(Er = ja) \cdot P(Al = ja \mid Ei = ja, Er = ja) \\
 &= 0,001 \cdot 0,002 \cdot 0,95 = 1,9 \cdot 10^{-6}
 \end{aligned}
 \tag{B.17}$$

Der Nenner ist aus Gl. B.12 bekannt. Somit lässt sich Gl. B.16 lösen.

$$P(Er = ja \mid Ei = ja, Al = ja) = \frac{1,9 \cdot 10^{-6}}{9,4002 \cdot 10^{-4}} = 0,00202
 \tag{B.18}$$

In Abb. B.10 sind die Knotenwahrscheinlichkeiten für den Fall 3 dargestellt. Durch die Vorinformation $Al = ja$ wurde der Informationsfluss der konvergierenden Verbindung zwischen *Einbruch* und *Erdbeben* freigegeben. Somit hat die Zusatzinformation, dass ein Einbruch stattgefunden hat, einen Einfluss auf die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Erdbebens. Diese ist nun deutlich geringer als im Fall 2 (vgl. Abb. B.9).

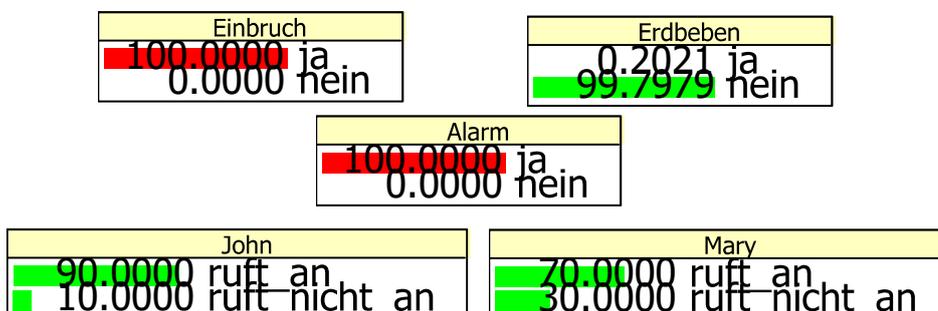


Abb. B.10: Beispiel Alarm Fall 3: Ergebnis Netzberechnung mit Vorinformation „Einbruch hat stattgefunden und Alarm wurde ausgelöst“

C Ursachen historischer Schadensereignisse von Gewichtsstau Mauern

Die nachfolgende Tab. C.1 enthält eine Auflistung historischer Schadensereignisse von Gewichtsstau Mauern, die in der CONGDATA Datenbank von Douglas u. a. (1998) dokumentiert sind. Dabei werden für die verschiedenen Bauwerkskomponenten der Talsperre Hauptkategorien für Schadensereignisse eingeführt, denen sich die in der Datenbank nach ICOLD kodifizierten Ereignisse zuordnen lassen. Darüber hinaus erfolgt eine Bewertung, ob sich das jeweilige Ereignis durch Untersuchungsmaßnahmen, wie die messtechnische Überwachung, visuelle Kontrollen, Probennahme mit Laboruntersuchungen oder einer Nachweisführung mit aktualisierten Bemessungsgrundlagen identifizieren lässt.

Tab. C.1: Ursachen historischer Schadensereignisse von Gewichtsstauwauern nach Douglas u. a. (1998)

Bauwerkskomponenten	Hauptkategorien für Schadensursachen	ICOLD Kodifizierung der Talsperrenschäden	Versagensfall	Unfall	grundlegende Instandsetzung	Gesamt	messtechnische Überwachung	visuelle Kontrollen	Probenahme, Laboruntersuchung	Bemesungsgrundlagen, Nachweissführung	Sonstige
Untergrund											
	Verformungen und Setzungen des Untergrunds	1.1.2, 3.1.2	1	2	3	6	X	X			
Fels, Boden	unzureichende Materialfestigkeit bzw. unzulängliche Vorbereitung der Gründungsfläche	1.1.3, 1.1.6, 1.1.9, 1.1.10, 3.1.3, 3.1.9	9	8	4	21			X		X
	zu große Sickerwasserströmung im Untergrund, innere Erosion	1.1.4, 1.1.5, 1.1.5.1, 1.1.5.2, 3.1.4, 3.1.5	11	21	16	48	X	X			
Dichtungsschleier	mangelhafte Ausführung oder Beschädigung des Dichtungsschleiers bzw. der Untergrundabdichtungen	1.1.11	0	1	3	4	X		X		
Drainagen im Untergrund	fehlerhafte Ausführung, Schäden oder Mängel bei der Reinigung der Untergrunddrainagen	1.1.12, 1.7.2, 3.1.12, 3.7.2	1	0	15	16	X		X		
Absperrbauwerk											
Material (Beton, Bruchsteinmauerwerk)	unzureichende Materialfestigkeit (Druck- und Zug- oder Schubfestigkeit) auf Grund der verwendeten Materialien	1.2.5, 1.2.7, 1.5.2, 1.5.4, 3.2, 3.2.5, 3.2.6, 3.2.7, 3.3.2, 3.5.2, 3.5.3	18	9	6	33			X		X
	mangelhafte Materialbeständigkeit (z. B. AAR, Auswaschung von Calciumhydroxid)	1.2.1, 1.2.2, 3.2.2	3	2	45	50	X	X	X		
	Mängel bei der Bauausführung (z. B. Durchführung von Kühlungsmaßnahmen)	1.2.9, 1.2.10, 1.3.5, 3.2.9	3	6	17	26			X		
	untolerierbar hohe Materialdurchlässigkeit	1.2.8, 3.2.8	0	5	26	31	X		X		
	Mängel an der Vorsatzschale (z. B. unzulängliche Frostbeständigkeit)	1.2.3, 1.4.7, 1.5.6, 3.2.3, 3.5.5	0	4	56	60	X	X	X		
Bauwerksfugen, Mauerblöcke	schlechte Konzeption und Ausführung der Bauwerksfugen	1.2.11, 1.4.6, 1.5.5, 3.2.10, 3.5.4	0	1	15	16			X		
Äußere Einwirkung	Einwirkungen auf das Absperrbauwerk wie der Wasserstand (Wasserdruck, Überströmen, Auftrieb) oder Temperaturschwankungen	1.3.1, 1.3.2, 1.3.3, 1.3.4, 1.3.7, 2.3.8, 2.3.9, 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3, 3.4.4, 3.4.6	25	13	35	73	X				X

Bauwerkskomponenten	Hauptkategorien für Schadensursachen	ICOLD Kodifizierung der Talsperrenschäden	Versagensfall	Unfall	grundlegende Instandsetzung	Gesamt	messtechnische Überwachung	visuelle Kontrollen	Probenahme, Laboruntersuchung	Bemesungsgrundlagen, Nachweissführung	Sonstige
Betriebseinrichtungen und Nebenanlagen											
Material (Beton, Bruchsteinmauerwerk)	unzureichende Festigkeit bzw. Beständigkeit der verwendeten Materialien oder mangelhafte Bauausführung	4.1.5, 4.2.1, 4.2.2, 4.2.5, 4.2.7, 4.2.8, 4.8, 4.6	2	19	12	33	X	X	X	X	X
		4.2.3, 4.2.4, 4.2.9, 4.2.12, 4.2.13, 4.4.3, 4.4.4	0	3	32	35	X				
		4.6.2, 4.7.7, 4.9.1, 4.9.2, 4.11.6, 4.11.7	1	6	15	22				X	X
		4.5.1, 4.5.5, 4.7.1, 4.7.2, 4.7.3, 4.7.4, 4.7.6, 4.7.8, 4.7.9	4	8	31	43	X	X	X		
Hochwasserentlastung	Mängel an der Hochwasserentlastung (falsche Dimensionierung, fehlerhafte Bedienung, Funktionsstörungen)										
Äußere Einwirkung	Einwirkungen auf die Betriebseinrichtungen und Nebenanlagen infolge extremer Zufüsse (Treibgut, Geschiebe) oder Temperatur- und Feuchtewechsel										
Speicherbecken											
	Verlandung, unzureichende Dichtheit des Untergrunds, Instabilität der Hänge	5.1, 5.3, 5.4	0	8	3	11		X			
Unterwasser											
	unzureichende Stabilität der Hänge und der Gewässersohle	6.1, 6.2	0	3	2	5		X			
Gesamtanlage											
Planung	Mängel bei der Planung (Standortwahl, Standorterkundung, ungeeignete Mauerform)	1.1.1, 1.4.1, 1.5.1, 3.5.1	3	4	3	10					X
Talsperrenüberwachung	Mängel bei der Talsperrenüberwachung (Messtechnik, Bauwerksinspektionen)	1.6.1, 1.7.1, 4.11.1	0	0	4	4				X	X
Summe			81	123	343	547					

D Fragebogen zur Betreiberumfrage Talsperrenüberwachungsdaten von Gewichtsstaumauern

Im Folgenden sind die Erhebungsbögen der Betreiberumfrage zusammengestellt.

D.1 Erläuterungen zum Erhebungsbogen

Eine zweiseitige Erläuterung zum Erhebungsbogen stellt in knapper Form die Ziele der Forschungsarbeit und der Umfrage dar, enthält Angaben zum Datenschutz und es werden die Vorteile für den Betreiber bei der Teilnahme an der Umfrage aufgezeigt. Des Weiteren beinhaltet diese Anmerkungen zur Vorgehensweise und zum Ausfüllen der Excel Tabellen.



Universität Stuttgart



Dipl.-Ing. Tobias Gebler

Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart
Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft | Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht
Pfaffenwaldring 61, D-70550 Stuttgart (Vaihingen)
Telefon: 0711-68569111 E-mail: tobias.gebler@iws.uni-stuttgart.de

Betreiberumfrage zu Talsperrenüberwachungsdaten von Gewichtsstau Mauern

Erläuterungen zum Erhebungsbogen

1. Ziel der Forschungsarbeit

Ziel der Forschungsarbeit ist es, Empfehlungen zur Auswertung von Talsperrenmessdaten zu erarbeiten, um die Entdeckungswahrscheinlichkeit von Schadensfällen bei Talsperren zu erhöhen und damit die Zuverlässigkeit von Gewichtsstau Mauern weiter zu verbessern. Dabei werden anhand eines numerischen Modells einer idealisierten Talsperre verschiedene Schadensfälle simuliert, dabei künstliche Messdaten generiert und diese anschließend statistisch ausgewertet.

2. Ziel der Umfrage

Ziel der Umfrage ist es, Informationen über den Wertebereich verschiedener Talsperrenüberwachungsdaten bei normalem Betrieb zu erhalten. Dadurch sollen gewöhnliche Schwankungsbreiten von Messgrößen, die an realen Gewichtsstau Mauern mit einer Höhe über 15 m vorherrschen, abgeleitet werden. Zu diesem Zweck bitten wir Sie, als Betreiber, um Informationen über Ihre Absperrbauwerke. Wir werden außerdem eine statistische Auswertung der zur Verfügung gestellten Talsperrenüberwachungsdaten durchführen (z. B. deskriptive Statistik, Zeitreihenanalyse, Regressionsanalyse).

3. Datenschutz

Diese Studie dient allein Forschungszwecken. Die erhobenen Antworten der Fragen, sowie die zugesendeten Messdaten werden nur für die Studie verwendet und nicht an Dritte weitergegeben. Es wird nur die Messdatenauswertung veröffentlicht. Die Ergebnisse werden dafür so aufgearbeitet und anonymisiert, dass keine Rückschlüsse auf einzelne Anlagen oder Betreiber möglich sind.

4. Vorteile für den Teilnehmer der Umfrage

Die Teilnehmer erhalten eine zusammenfassende Darstellung der Umfrageergebnisse. Dies ermöglicht den Talsperrenbetreibern, ihre Überwachungsdaten mit den durchschnittlichen Schwankungsbreiten anderer, ähnlicher Gewichtsstau Mauern vergleichen zu können.

5. Anmerkungen zum Ausfüllen der Exceltabelle

- Sollten Sie während der Bearbeitung auf Fragen stoßen, können Sie mich gerne unter der Nummer 0711/685-69111 erreichen.
- Wenn Sie den Erhebungsbogen nur teilweise ausfüllen oder nur einen Teil der Daten zur Verfügung stellen können, ist dies für die Umfrage ebenfalls wertvoll!
- Antworten sind bitte in die umrandeten freien Felder einzutragen. Hellgrau hinterlegte Zellen sind Optionsfelder. Hier sind die jeweils richtigen Antworten auszuwählen.
- Die Messdaten können Sie entweder direkt in die jeweiligen Tabellenblätter kopieren (max. 65500 Datensätze) oder separat als Textdatei der Antwort-Email beifügen.
- Der Umfang der Messreihen sollte ungefähr 5 – 10 Jahre betragen und für alle Messgrößen etwa das gleiche Zeitintervall beinhalten. In dieser Zeit sollten an der Anlage möglichst keine größeren Sanierungsmaßnahmen oder eine Totalentleerung stattgefunden haben, die die Messgrößen maßgeblich beeinflussen.
- Bei manueller Ablesung sollten bitte möglichst sämtliche Messwerte eingepflegt werden. Erfolgt an dem Messgerät eine kontinuierliche Erfassung, sind Tageswerte einzutragen (möglichst Mittelwerte). Falls dies für Sie einen zusätzlichen Aufwand bedeutet, können Sie die Daten auch direkt eingeben. Eine Umrechnung auf Tagesmittelwerte erfolgt dann bei der Auswertung.
- Die Umfrage verfolgt das Ziel, die gewöhnliche Schwankungsbreite von Talsperrenmessdaten zu erheben. Die Daten sollten daher bitte möglichst von unplausiblen Werten, wie sie beispielsweise bei einer Funktionskontrolle des Messgerätes entstehen, bereinigt sein.
- Zu jedem Messwert können Sie bei Bedarf zusätzliche Anmerkungen beifügen.
- Folgende Daten sind für die oben genannte Forschungsarbeit hilfreich:
 - Mauertemperatur in Kronennähe oder alternativ Lufttemperatur,
 - Wasserstand im Speicher,
 - Gesamtsickerwasserabfluss,
 - Bewegung eines Gewichtslots,
 - Bewegung eines Schwimmlots,
 - Sohlpiezometerhöhen.

6. Vorgehensweise

- a) Ausfüllen der Fragen im Tabellenblatt „1 Angaben zur Talsperre“.
- b) Beantwortung der Fragen der Tabellenblätter 2 bis 7 zu den jeweiligen Messstellen. Einfügen von Messwerten in die vorbereiteten Spalten. Alternativ können die Daten auch als Textdatei der Antwort-Email beigelegt werden.
- c) Rücksenden des Fragebogens per E-Mail an: tobias.gebler@iws.uni-stuttgart.de
- d) Wenn Sie für mehrere Gewichtsmauern (Höhe > 15m) verantwortlich sind, dürfen wir Sie bitten, den Bogen für weitere Anlagen auszufüllen, bzw. diesen an Kollegen weiterzuleiten. Je mehr Gewichtsmauern durch die Umfrage repräsentiert werden, desto besser ist die Qualität der Auswertung.

Vielen Dank für Ihre Bemühungen bei der Teilnahme an unserer Umfrage!

D.2 Tabellenblätter der Betreiberumfrage

Die Antworten der Betreiberumfrage können direkt in eine vorbereitete Excel Tabelle eingepflegt werden. Zunächst sind allgemeine Angaben zur Talsperre einzutragen, anschließend werden Informationen zu den jeweiligen Messeinrichtungen abgefragt. In vorbereitete Spalten lassen sich schließlich die an den jeweiligen Messstellen erhobenen Messdaten einfügen.

<u>Betreiberumfrage zu Talsperrenüberwachungsdaten von Gewichtsmauern</u>	
1. Umfrage	
1.1 Kontaktdaten	
Talsperrenbetreiber:	
Name des Ausfüllers:	
E-Mail des Ausfüllers:	
Telefonnummer des Ausfüllers:	
Datum der Erhebung:	
1.2 Angaben zur Talsperre	
Name der Gewichtsmauer:	
Max. Höhe über Gründungssohle:	m
Kronenlänge:	m
Kronenlage:	m+NN
Stauziel:	m+NN
Absenkziel:	m+NN
Material des Absperrbauwerks:	Beton <input type="radio"/>
	Bruchsteinmauerwerk <input type="radio"/>
Kontrollgang vorhanden?	Ja <input type="radio"/>
	Nein <input type="radio"/>
Blockfugen vorhanden?	Ja <input type="radio"/>
	Nein <input type="radio"/>
Drainagen zur Entwässerung der Mauer vorhanden?	Ja <input type="radio"/>
	Nein <input type="radio"/>
Drainagen zur Entwässerung des Untergrunds vorhanden?	Ja <input type="radio"/>
	Nein <input type="radio"/>
Injektionsschleier vorhanden?	Ja, wasserseitig <input type="radio"/>
	Ja, luftseitig <input type="radio"/>
	Ja, luftseitig und wasserseitig <input type="radio"/>
	Nein <input type="radio"/>
gegebenenfalls Anmerkungen oder bauliche Besonderheiten:	

Abb. D.3: Tabellenblatt 1: Kontaktdaten und Angaben zur Talsperre

Betreiberumfrage zu Talsperrenüberwachungsdaten von Gewichtsmauern		
2. Wasserstand		
Daten werden zur Verfügung gestellt:	ja	<input type="radio"/>
	nein, Größe wird nicht erfasst	<input type="radio"/>
	nein	<input type="radio"/>
Messintervall:	permanent	<input type="radio"/> wöchentlich
	stündlich	<input type="radio"/> 2-wöchentlich
	täglich	<input type="radio"/> monatlich
Datenintervall	permanent	<input type="radio"/> wöchentlich
	stündlich	<input type="radio"/> 2-wöchentlich
	täglich	<input type="radio"/> monatlich
Einheit:	m+NN	<input type="radio"/>
	m (Im Bezug auf die Lage der Gründungssohle)	<input type="radio"/>
Datenerfassung:	Die Messung erfolgt manuell	<input type="radio"/>
	Die Messung erfolgt automatisiert, die Daten werden vor Ort gespeichert und später manuell ausgelesen	<input type="radio"/>
	Die Messung erfolgt automatisiert und die Daten werden fernübertragen	<input type="radio"/>
gegebenenfalls Anmerkungen oder Hinweise auf außergewöhnliche Ereignisse:		
Messwerte		
Messzeitpunkt	Messwert	Anmerkung, falls erforderlich

Abb. D.4: Tabellenblatt 2: Wasserstand

Betreiberumfrage zu Talsperrenüberwachungsdaten von Gewichtsmauern		
3. Temperatur		
Anmerkung:	Idealerweise sollte die Mauertemperatur in Kronennähe eingetragen werden. Alternativ kann auch die Lufttemperatur verwendet werden.	
Daten werden zur Verfügung gestellt:	ja	<input type="radio"/>
	nein, Größe wird nicht erfasst	<input type="radio"/>
	nein	<input type="radio"/>
Messstelle:	Lufttemperatur	<input type="radio"/>
	Mauertemperatur an der Krone	<input type="radio"/>
Messintervall:	permanent <input type="radio"/>	wöchentlich <input type="radio"/>
	stündlich <input type="radio"/>	2-wöchentlich <input type="radio"/>
	täglich <input type="radio"/>	monatlich <input type="radio"/>
Datenintervall	permanent <input type="radio"/>	wöchentlich <input type="radio"/>
	stündlich <input type="radio"/>	2-wöchentlich <input type="radio"/>
	täglich <input type="radio"/>	monatlich <input type="radio"/>
Einheit:	°C	<input type="radio"/>
	K	<input type="radio"/>
Datenerfassung:	Die Messung erfolgt manuell	<input type="radio"/>
	Die Messung erfolgt automatisiert, die Daten werden vor Ort gespeichert und später manuell ausgelesen	<input type="radio"/>
	Die Messung erfolgt automatisiert und die Daten werden fernübertragen	<input type="radio"/>
gegebenenfalls Anmerkungen oder Hinweise auf außergewöhnliche Ereignisse:		
Messwerte		
Messzeitpunkt	Messwert	Anmerkung, falls erforderlich

Abb. D.5: Tabellenblatt 3: Temperatur

Betreiberumfrage zu Talsperrenüberwachungsdaten von Gewichtsmauern		
4. Sickerwasserabfluss		
Anmerkung:		Für die Auswertung ist der Gesamtsickerwasserabfluss von Interesse. Dieser sollte möglichst sämtliche Zuflüsse innerhalb der Mauer erfassen (aus Drainagen, Kontrollgängen, Schächten etc.), nicht jedoch Hangquellen, die außerhalb der Sperre gefasst und in die Sperre eingeleitet werden.
Daten werden zur Verfügung gestellt:	ja	<input type="radio"/>
	nein, Größe wird nicht erfasst	<input type="radio"/>
	nein	<input type="radio"/>
Messstelle:	Gesamtsickerwasser	<input type="radio"/>
	Gesamtsickerwasser mit Hangquellen	<input type="radio"/>
	Sickerwasser aus einem Teilbereich der Mauer	<input type="radio"/>
Messintervall:	permanent <input type="radio"/>	wöchentlich <input type="radio"/>
	stündlich <input type="radio"/>	2-wöchentlich <input type="radio"/>
	täglich <input type="radio"/>	monatlich <input type="radio"/>
Datenintervall	permanent <input type="radio"/>	wöchentlich <input type="radio"/>
	stündlich <input type="radio"/>	2-wöchentlich <input type="radio"/>
	täglich <input type="radio"/>	monatlich <input type="radio"/>
Einheit:	cm ³ /s	<input type="radio"/>
	l/s	<input type="radio"/>
Datenerfassung:	Die Messung erfolgt manuell	<input type="radio"/>
	Die Messung erfolgt automatisiert, die Daten werden vor Ort gespeichert und später manuell ausgelesen	<input type="radio"/>
	Die Messung erfolgt automatisiert und die Daten werden fernübertragen	<input type="radio"/>
Definition eines Warnwertes:	keine Vorgabe <input type="radio"/>	Gradient <input type="radio"/>
	konstanter Wert <input type="radio"/>	Funktion weiterer Größen <input type="radio"/>
gegebenenfalls Anmerkungen oder Hinweise auf außergewöhnliche Ereignisse:		
Messwerte		
Messzeitpunkt	Messwert	Anmerkung, falls erforderlich

Abb. D.6: Tabellenblatt 4: Sickerwasserabfluss

Betreiberumfrage zu Talsperrenüberwachungsdaten von Gewichtsmauern		
5. Gewichtslot		
Anmerkung:		Sollten mehrere Lote eingebaut sein, interessiert das Messgerät welches die größte Länge aufweist. Als Messgröße ist die Relativbewegung senkrecht zur Mauerachse von Bedeutung (d. h. in Talrichtung).
Daten werden zur Verfügung gestellt:	ja	<input type="radio"/>
	nein, Größe wird nicht erfasst	<input type="radio"/>
	nein	<input type="radio"/>
Messintervall:	permanent	<input type="radio"/> wöchentlich <input type="radio"/>
	stündlich	<input type="radio"/> 2-wöchentlich <input type="radio"/>
	täglich	<input type="radio"/> monatlich <input type="radio"/>
Datenintervall	permanent	<input type="radio"/> wöchentlich <input type="radio"/>
	stündlich	<input type="radio"/> 2-wöchentlich <input type="radio"/>
	täglich	<input type="radio"/> monatlich <input type="radio"/>
Einheit:	1/10 mm	<input type="radio"/> cm <input type="radio"/>
	mm	<input type="radio"/> dm <input type="radio"/>
Datenerfassung:	Die Messung erfolgt manuell	<input type="radio"/>
	Die Messung erfolgt automatisiert, die Daten werden vor Ort gespeichert und später manuell ausgelesen	<input type="radio"/>
	Die Messung erfolgt automatisiert und die Daten werden fernübertragen	<input type="radio"/>
Definition eines Warnwertes:	keine Vorgabe	<input type="radio"/> Gradient <input type="radio"/>
	konstanter Wert	<input type="radio"/> Funktion weiterer Größen <input type="radio"/>
gegebenenfalls Anmerkungen oder Hinweise auf außergewöhnliche Ereignisse:		
Messwerte		
Messzeitpunkt	Messwert	Anmerkung, falls erforderlich

Abb. D.7: Tabellenblatt 5: Gewichtslot

Betreiberumfrage zu Talsperrenüberwachungsdaten von Gewichtsmauern		
6. Schwimmlot		
Anmerkung:		Sollten mehrere Lote eingebaut sein, interessiert das Messgerät welches die größte Länge aufweist. Als Messgröße ist die Relativbewegung senkrecht zur Mauerachse von Bedeutung (d. h. in Talrichtung).
Daten werden zur Verfügung gestellt:	ja	<input type="radio"/>
	nein, Größe wird nicht erfasst	<input type="radio"/>
	nein	<input type="radio"/>
Messintervall:	permanent <input type="radio"/>	wöchentlich <input type="radio"/>
	stündlich <input type="radio"/>	2-wöchentlich <input type="radio"/>
	täglich <input type="radio"/>	monatlich <input type="radio"/>
Datenintervall	permanent <input type="radio"/>	wöchentlich <input type="radio"/>
	stündlich <input type="radio"/>	2-wöchentlich <input type="radio"/>
	täglich <input type="radio"/>	monatlich <input type="radio"/>
Einheit:	1/10 mm <input type="radio"/>	cm <input type="radio"/>
	mm <input type="radio"/>	dm <input type="radio"/>
Datenerfassung:	Die Messung erfolgt manuell <input type="radio"/>	
	Die Messung erfolgt automatisiert, die Daten werden vor Ort gespeichert und später manuell ausgelesen <input type="radio"/>	
	Die Messung erfolgt automatisiert und die Daten werden fernübertragen <input type="radio"/>	
Definition eines Warnwertes:	keine Vorgabe <input type="radio"/>	Gradient <input type="radio"/>
	konstanter Wert <input type="radio"/>	Funktion weiterer Größen <input type="radio"/>
gegebenenfalls Anmerkungen oder Hinweise auf außergewöhnliche Ereignisse:		
Messwerte		
Messzeitpunkt	Messwert	Anmerkung, falls erforderlich

Abb. D.8: Tabellenblatt 6: Schwimmlot

Betreiberumfrage zu Talsperrenüberwachungsdaten von Gewichtsmauern		
7. Sohlpiezometer 1		
Anmerkung:	In der Auswertung sind Sohlpiezometer in einem repräsentativen Mauerquerschnitt von Interesse (max. 5 Messstellen). Dieser sollte möglichst in Talmitte angeordnet sein.	
Daten werden zur Verfügung gestellt:	ja	<input type="radio"/>
	nein, Größe wird nicht erfasst	<input type="radio"/>
	nein	<input type="radio"/>
Messintervall:	permanent <input type="radio"/>	wöchentlich <input type="radio"/>
	stündlich <input type="radio"/>	2-wöchentlich <input type="radio"/>
	täglich <input type="radio"/>	monatlich <input type="radio"/>
Datenintervall	permanent <input type="radio"/>	wöchentlich <input type="radio"/>
	stündlich <input type="radio"/>	2-wöchentlich <input type="radio"/>
	täglich <input type="radio"/>	monatlich <input type="radio"/>
Abstand zur Wasserseite:		m
Mauerbreite am Messquerschnitt:		m
Einheit:	m+NN	<input type="radio"/>
	m (Im Bezug auf die Lage der Gründungssohle)	<input type="radio"/>
Datenerfassung:	Die Messung erfolgt manuell	<input type="radio"/>
	Die Messung erfolgt automatisiert, die Daten werden vor Ort gespeichert und später manuell ausgelesen	<input type="radio"/>
	Die Messung erfolgt automatisiert und die Daten werden fernübertragen	<input type="radio"/>
Definition eines Warnwertes:	keine Vorgabe <input type="radio"/>	Gradient <input type="radio"/>
	konstanter Wert <input type="radio"/>	Funktion weiterer Größen <input type="radio"/>
gegebenenfalls Anmerkungen oder Hinweise auf außergewöhnliche Ereignisse:		
Messwerte		
Messzeitpunkt	Messwert	Anmerkung, falls erforderlich

Abb. D.9: Tabellenblatt 7: Sohlpiezometer 1

E Statistische Auswertung der simulierten Überwachungsdaten

In Abschnitt 6.3 wird die Generierung von synthetischen Überwachungsdaten einer idealisierten Gewichtsstaumauer mittels FE-Berechnung beschrieben. Dabei wird sowohl eine Mauer mit, als auch eine Mauer ohne Sohldrainage betrachtet. Diese Daten werden analog zu den Überwachungsdaten der Betreiberumfrage, nach der in den Kapiteln 2 und 5 beschriebenen Vorgehensweisen, statistisch ausgewertet. Im Folgenden sind die zugehörigen Ergebnisse graphisch dargestellt.

Die Abbildungen E.1, E.2 und E.3 zeigen die Größenordnungen bzw. Schwankungsbereiche der Sickerwasser-, Lot- und Piezometerdaten im Vergleich zu den realen Talsperrenmessdaten der Umfrage. Die Abhängigkeit der generierten Messwerte von den Wirkgrößen Wasserstand und Temperatur lassen sich den Graphiken E.4 bis E.7 entnehmen. Abschnitt 6.3.2 enthält eine Interpretation der Darstellungen.

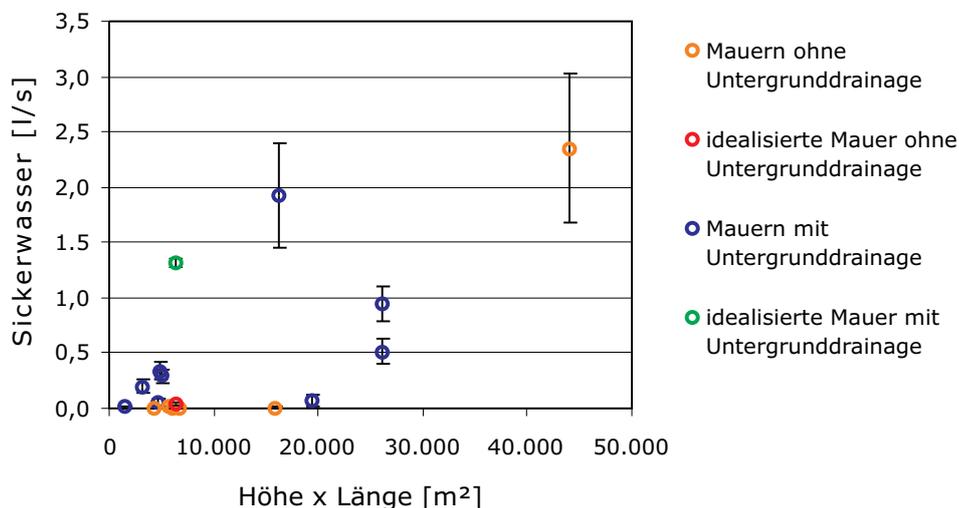


Abb. E.1: Median und Standardabweichung des Sickerwasserabflusses der idealisierten Mauer im Vergleich zu den an der Umfrage beteiligten Gewichtsstaumauern

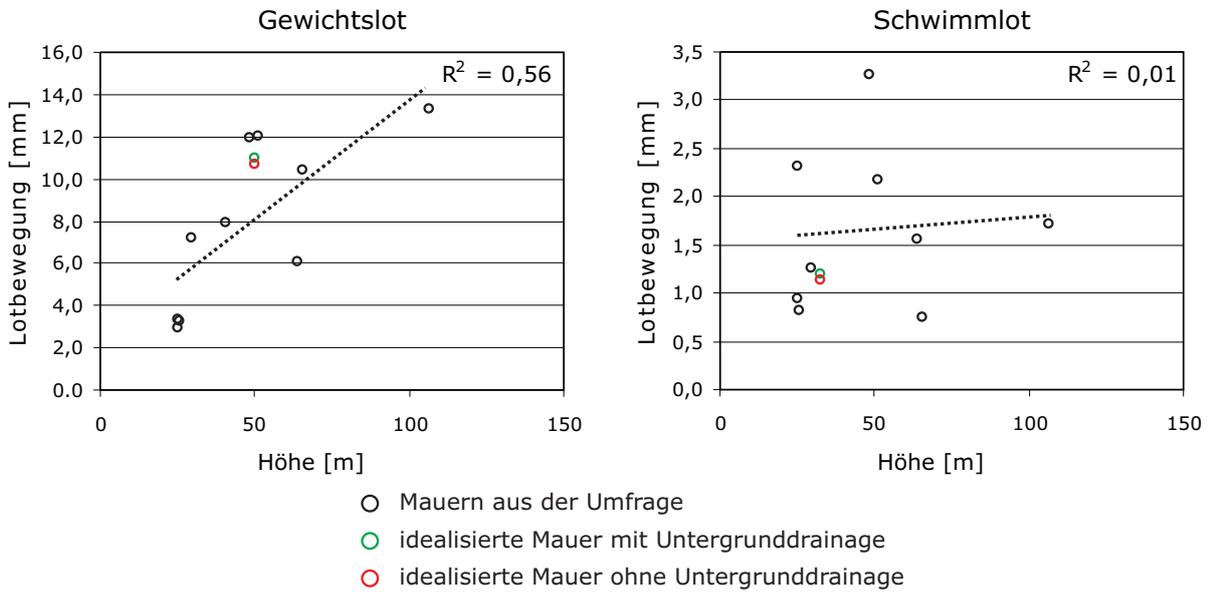


Abb. E.2: Quantilabstand $Q_{0,975}$ bis $Q_{0,025}$ der Gewichtslotbewegung der idealisierten Mauer im Vergleich zu den an der Umfrage beteiligten Gewichtsstaumauern

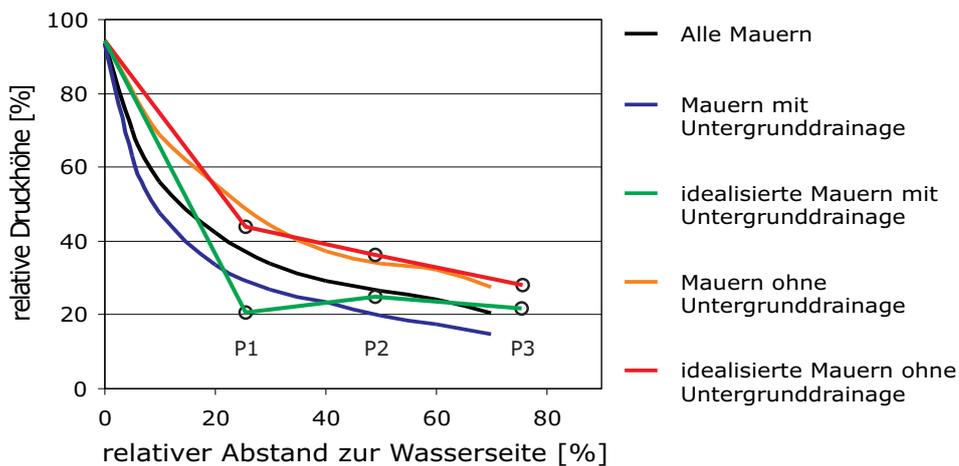


Abb. E.3: Potenzialabbau an der Mauersole der idealisierten Mauer im Vergleich zu den an der Umfrage beteiligten Gewichtsstaumauern (Höchstwerte $Q_{0,975}$)

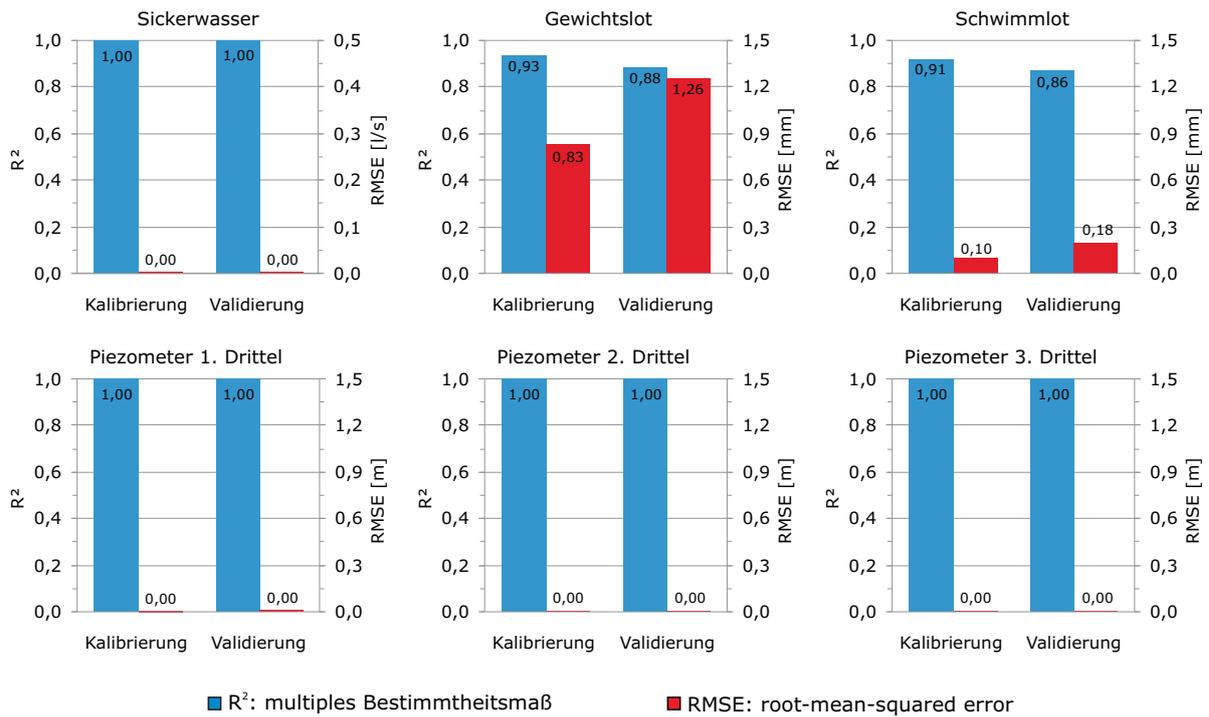


Abb. E.4: Güte der Regressionsmodelle für die simulierten Überwachungsdaten der idealisierten Mauer mit Untergrunddrainage

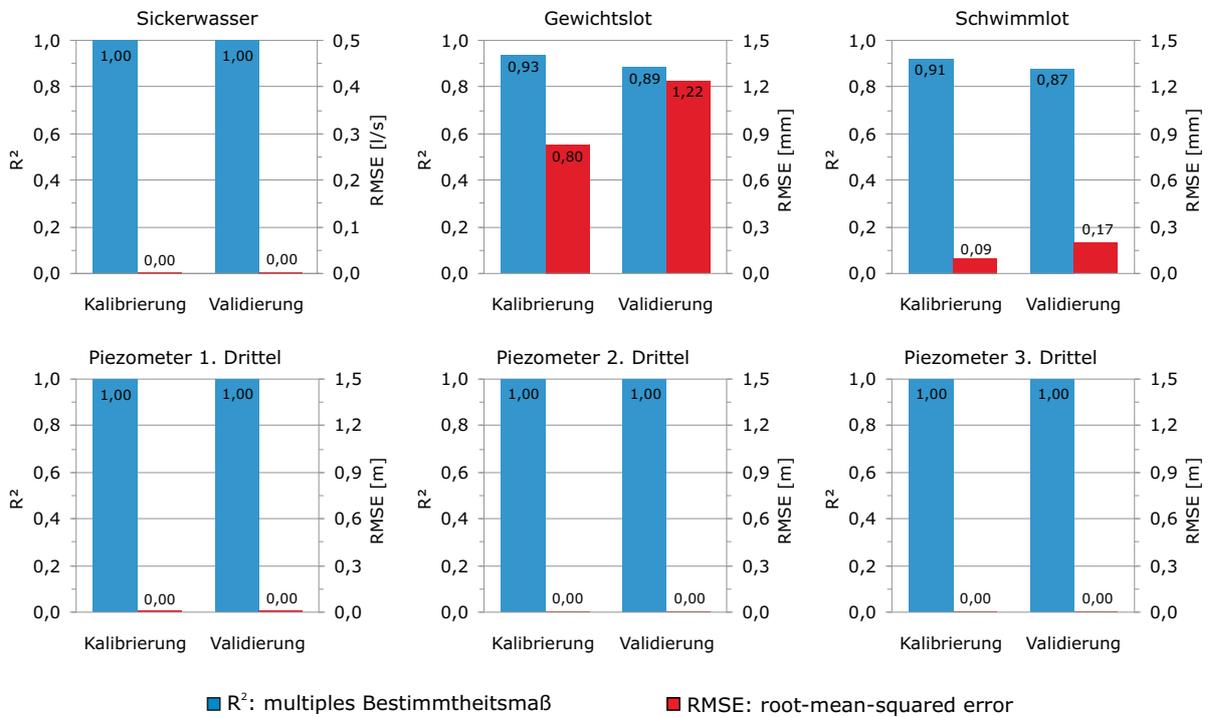


Abb. E.5: Güte der Regressionsmodelle für die simulierten Überwachungsdaten der idealisierten Mauer ohne Untergrunddrainage

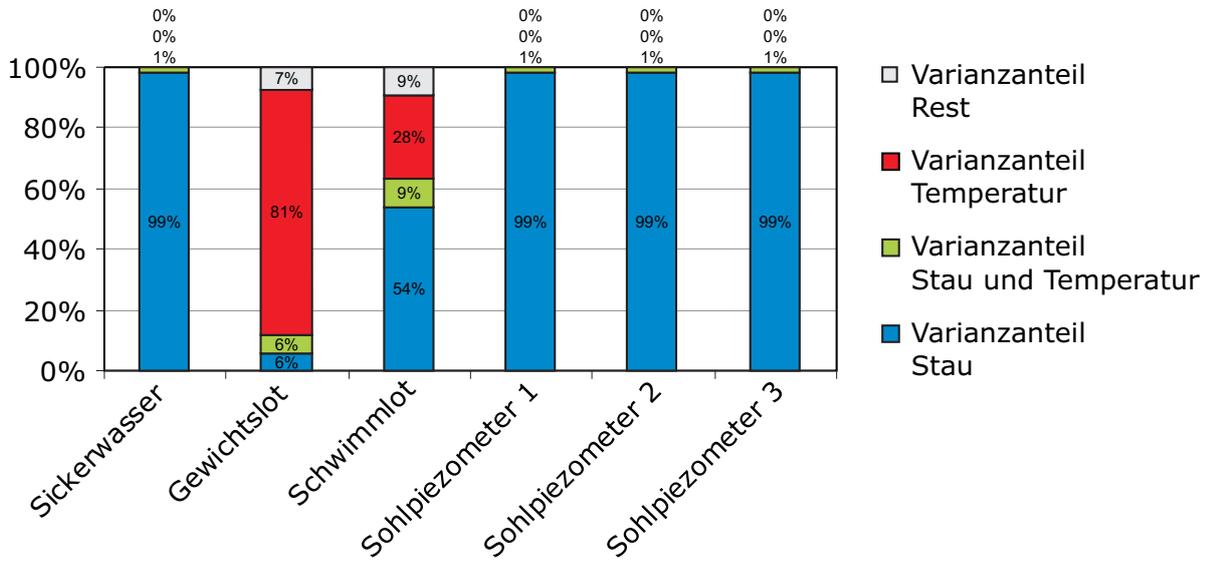


Abb. E.6: Darstellung der Varianzanteile der simulierten Überwachungsdaten der idealisierten Mauer mit Untergrunddrainage

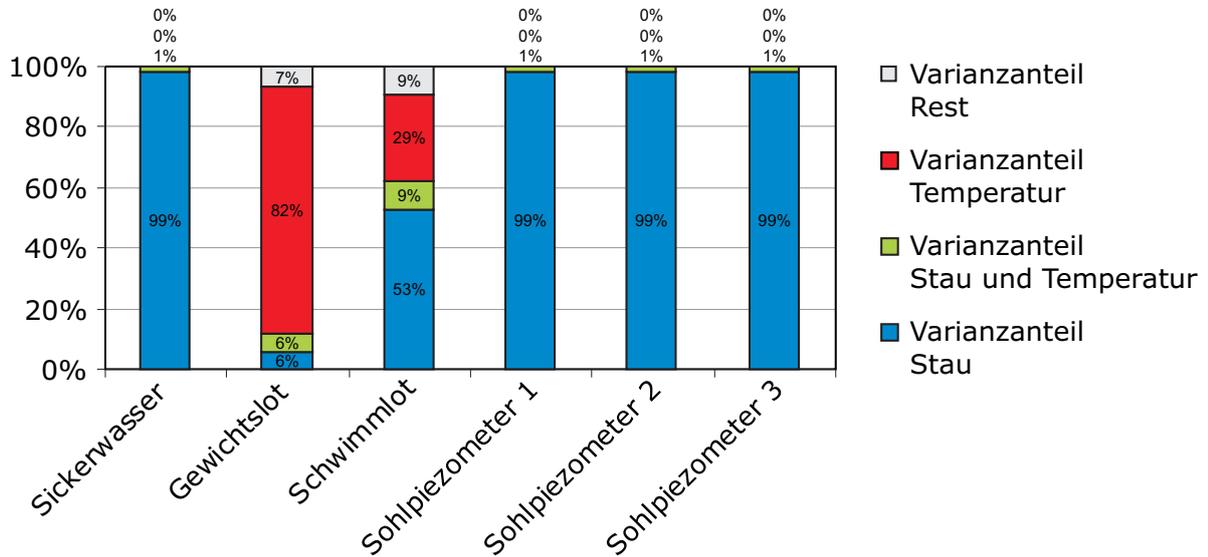


Abb. E.7: Darstellung der Varianzanteile der simulierten Überwachungsdaten der idealisierten Mauer ohne Untergrunddrainage

F Generierte Talsperrenmessdaten der geschädigten Mauer

F.1 Messdaten des Referenzbauwerks ohne Untergrunddrainage

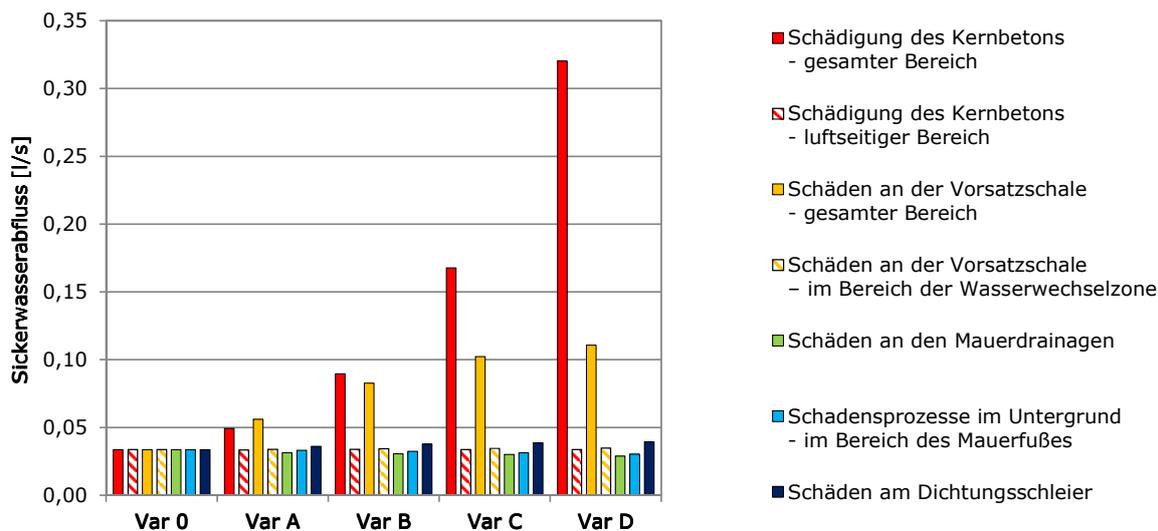


Abb. F.1: Sickerwasserabfluss des geschädigten Referenzbauwerks ohne Untergrunddrainage

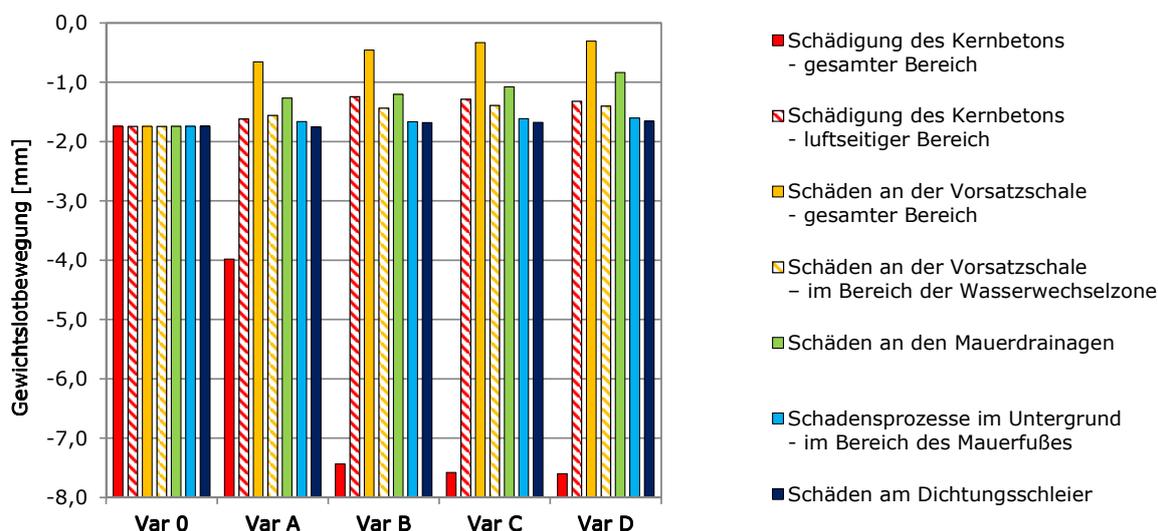


Abb. F.2: Gewichtslotbewegung des geschädigten Referenzbauwerks ohne Untergrunddrainage (je kleiner der Wert, desto stärker bewegt sich die Korne gegenüber der Aufstandsfläche in Richtung Wasserseite)

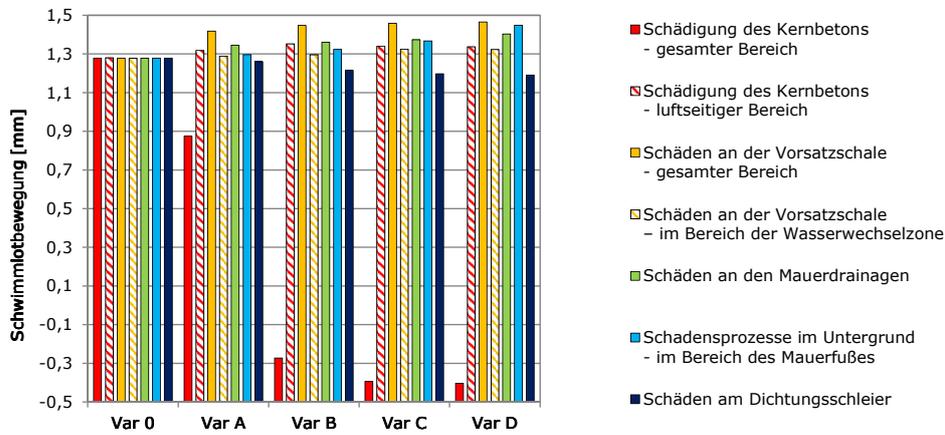


Abb. F.3: Schwimmlotbewegung des geschädigten Referenzbauwerks ohne Untergrunddrainage (je kleiner der Wert, desto stärker bewegt sich die Aufstandsfläche gegenüber dem Felsuntergrund in Richtung Wasserseite)

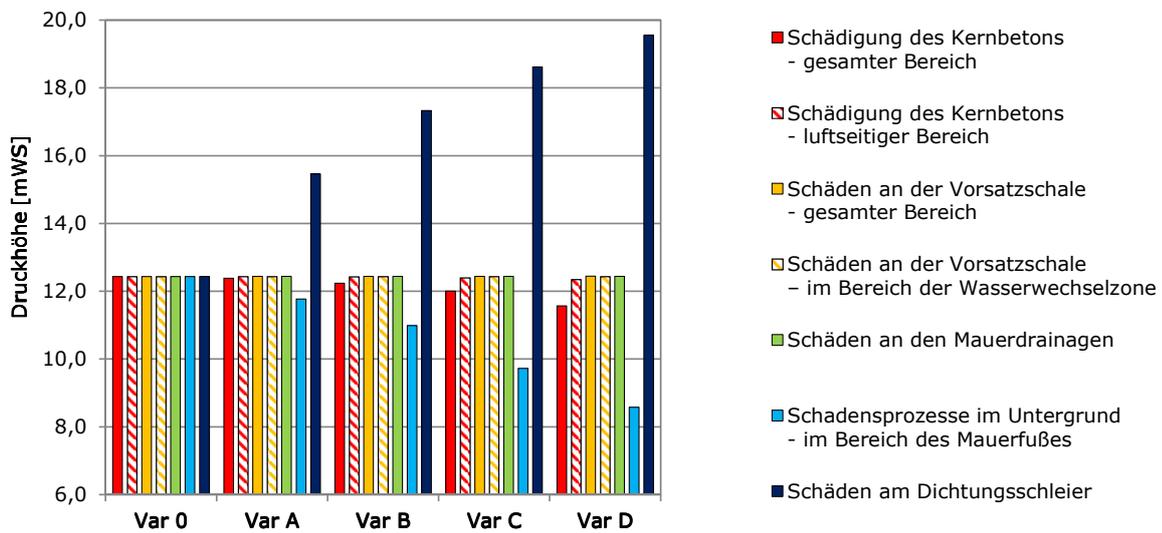


Abb. F.4: Druckhöhe am Piezometer 1 des geschädigten Referenzbauwerks ohne Untergrunddrainage

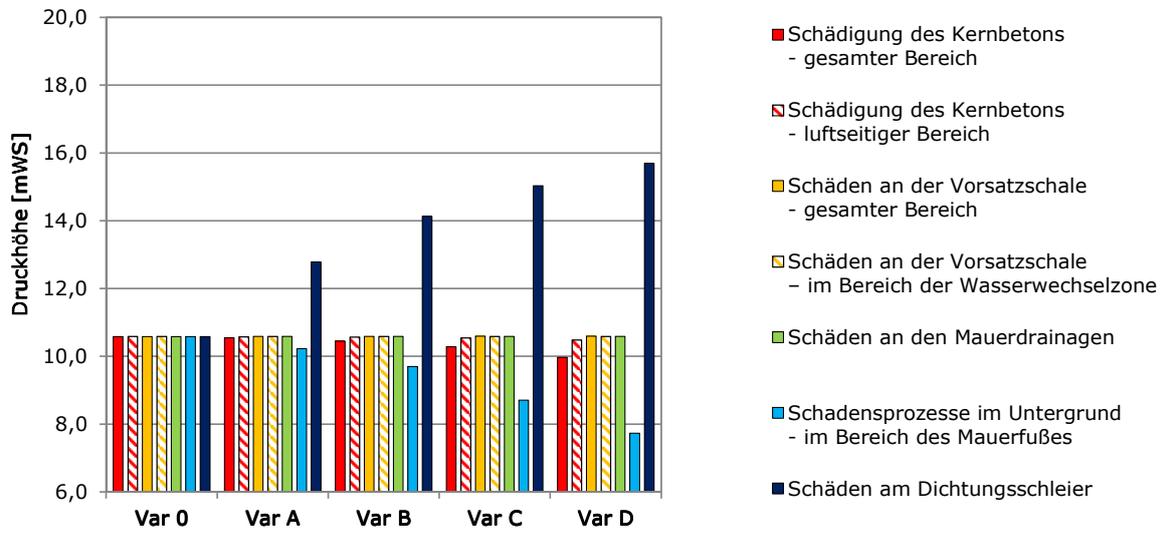


Abb. F.5: Druckhöhe am Piezometer 2 des geschädigten Referenzbauwerks ohne Untergrunddrainage

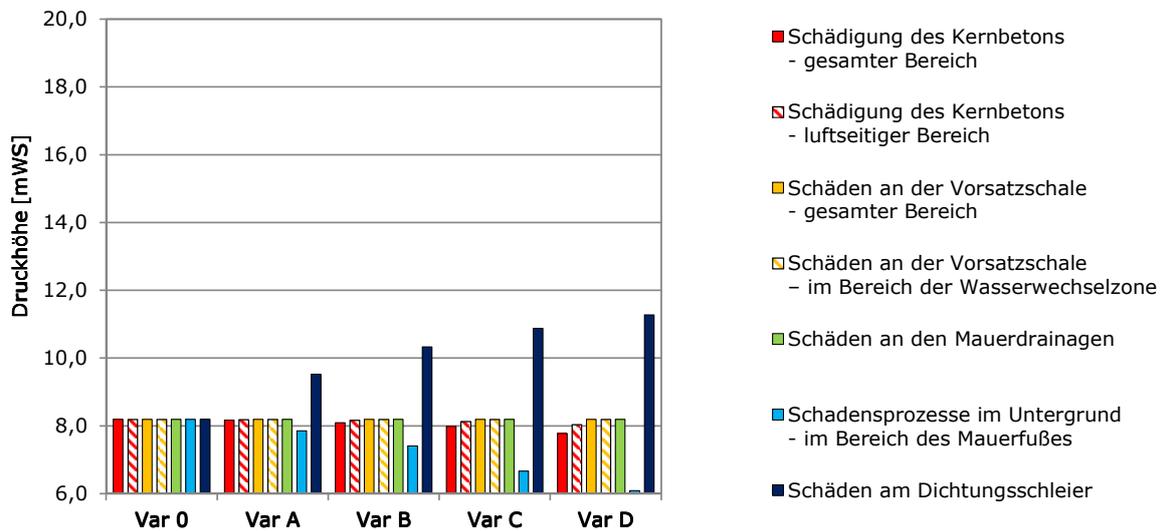


Abb. F.6: Druckhöhe am Piezometer 3 des geschädigten Referenzbauwerks ohne Untergrunddrainage

F.2 Messdaten des Referenzbauwerks mit Untergrunddrainage

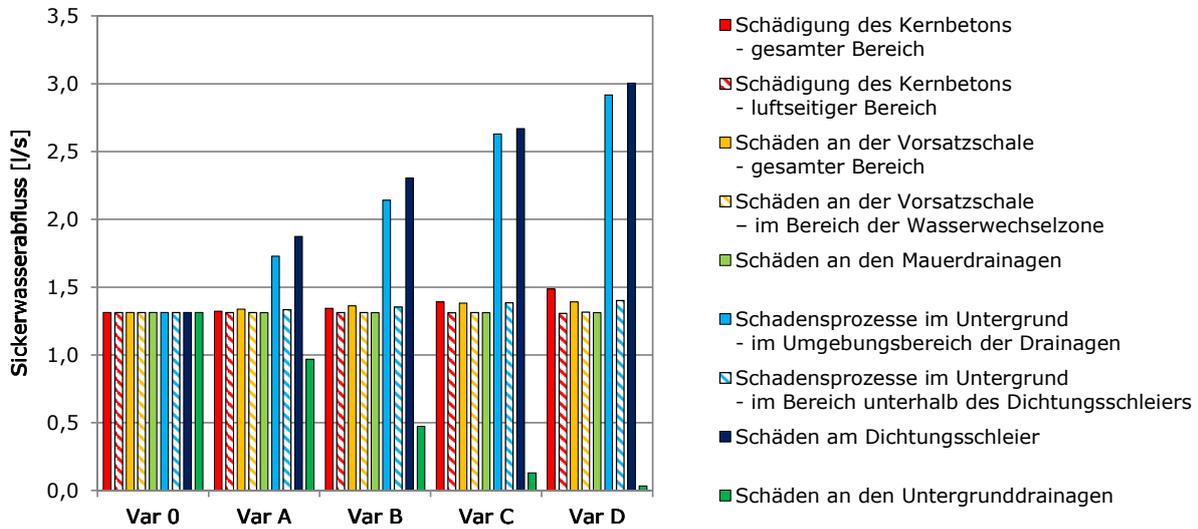


Abb. F.7: Sickerwasserabfluss des geschädigten Referenzbauwerks mit Untergrunddrainage

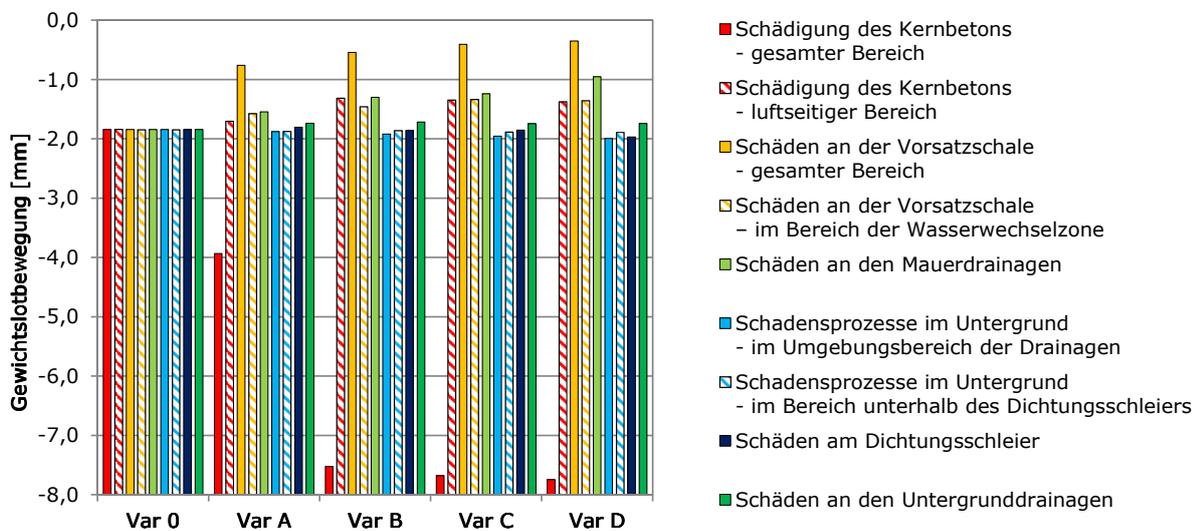


Abb. F.8: Gewichtslotbewegung des geschädigten Referenzbauwerks mit Untergrunddrainage (je kleiner der Wert, desto stärker bewegt sich die Korne gegenüber der Aufstandsfläche in Richtung Wasserseite)

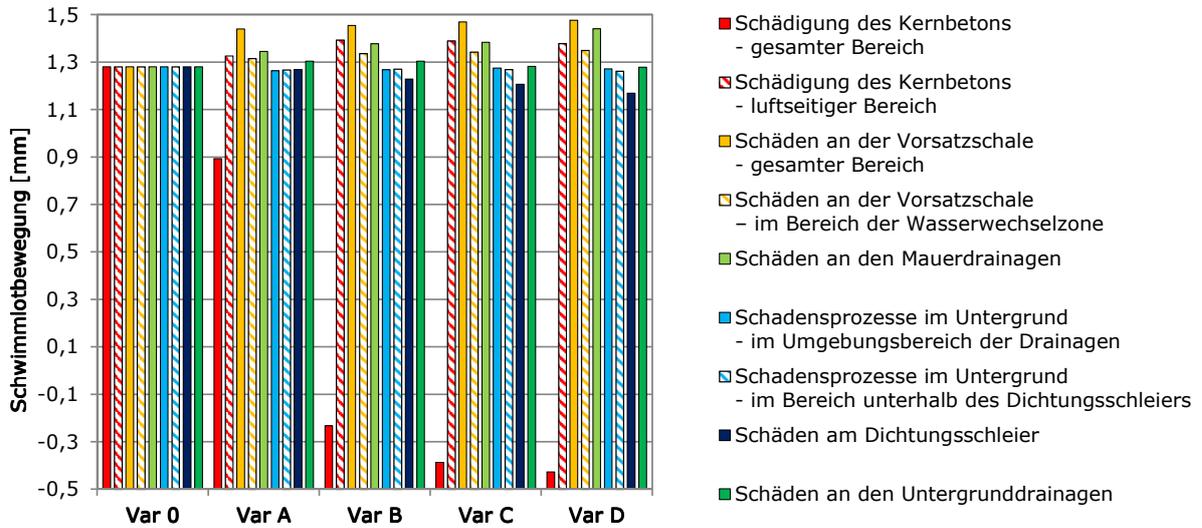


Abb. F.9: Schwimmlobewegung des geschädigten Referenzbauwerks mit Untergrunddrainage (je kleiner der Wert, desto stärker bewegt sich die Aufstandsfläche gegenüber dem Felsuntergrund in Richtung Wasserseite)

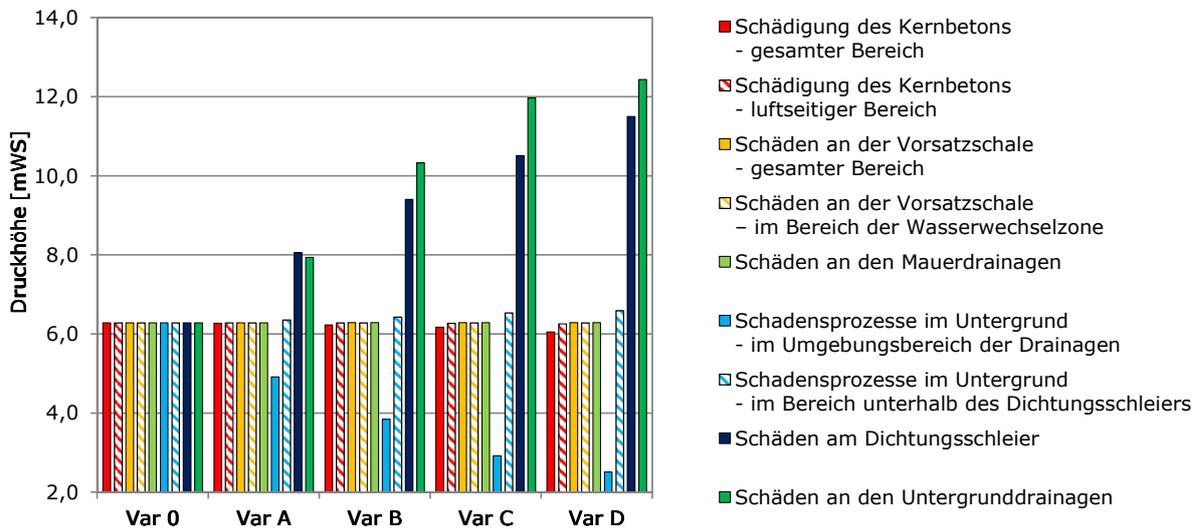


Abb. F.10: Druckhöhe am Piezometer 1 des geschädigten Referenzbauwerks mit Untergrunddrainage

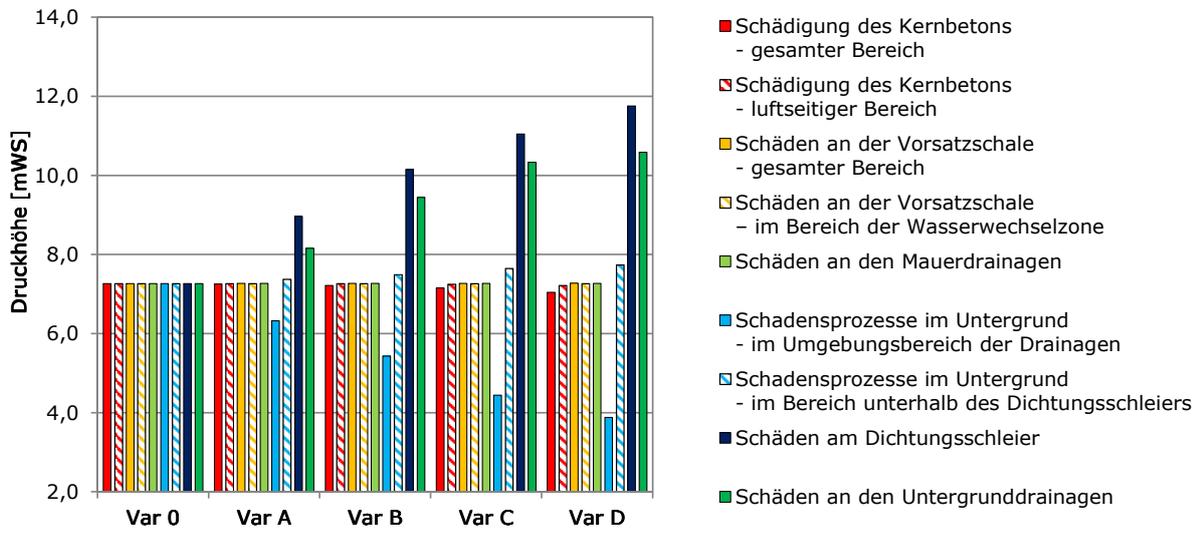


Abb. F.11: Druckhöhe am Piezometer 2 des geschädigten Referenzbauwerks mit Untergrunddrainage

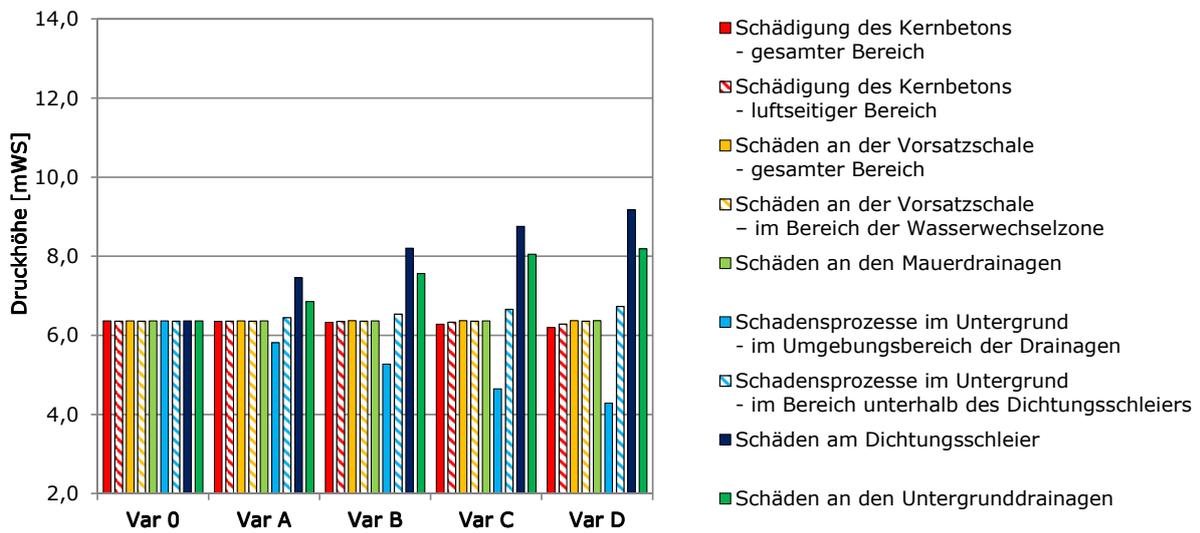


Abb. F.12: Druckhöhe am Piezometer 3 des geschädigten Referenzbauwerks mit Untergrunddrainage

G Bedingte Wahrscheinlichkeitstafeln für das Bayessche Netz zur Interpretation von Talsperrenüberwachungsdaten

G.1 Bedingte Wahrscheinlichkeitstafeln für Gewichtsstaumauern ohne Untergrunddrainagen

G.1.1 Knoten *Zustand der Talsperre*

Tab. G.1: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Zustand der Talsperre*

Zustand	KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Wahrscheinlichkeit	2,94E-05	2,94E-05	2,94E-05	2,94E-05	8,81E-05	8,81E-05	8,81E-05	8,81E-05
Zustand	VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Wahrscheinlichkeit	2,18E-05	2,18E-05	2,18E-05	2,18E-05	6,53E-05	6,53E-05	6,53E-05	6,53E-05
Zustand	MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UF-A	UF-B	UF-C	UF-D
Wahrscheinlichkeit	4,64E-05	4,64E-05	4,64E-05	4,64E-05	7,84E-05	7,84E-05	7,84E-05	7,84E-05
Zustand	DS-A	DS-B	DS-C	DS-D	KS			
Wahrscheinlichkeit	5,80E-06	5,80E-06	5,80E-06	5,80E-06	9,99E-01			

G.1.2 Knoten *Kein Schaden*

Tab. G.2: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *kein Schaden*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
kein Schaden	ja	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1
Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
kein Schaden	ja	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1
Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UF-A	UF-B	UF-C	UF-D
kein Schaden	ja	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1
Zustand der Talsperre		DS-A	DS-B	DS-C	DS-D	KS			
kein Schaden	ja	0	0	0	0	1			
	nein	1	1	1	1	0			

G.1.3 Knoten *Schaden Mauerker*n

Tab. G.3: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Schaden Mauerker*n

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Schaden Mauerker	KG	1	1	1	1	0	0	0	0
	KL	0	0	0	0	1	1	1	1
	nein	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Schaden Mauerker	KG	0	0	0	0	0	0	0	0
	KL	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1

Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UF-A	UF-B	UF-C	UF-D
Schaden Mauerker	KG	0	0	0	0	0	0	0	0
	KL	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1

Zustand der Talsperre		DS-A	DS-B	DS-C	DS-D	KS
Schaden Mauerker	KG	0	0	0	0	0
	KL	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1

G.1.4 Knoten *Schaden Vorsatzschale*

Tab. G.4: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Schaden Vorsatzschale*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Schaden Vorsatzschale	VG	0	0	0	0	0	0	0	0
	VW	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1

Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Schaden Vorsatzschale	VG	1	1	1	1	0	0	0	0
	VW	0	0	0	0	1	1	1	1
	nein	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UF-A	UF-B	UF-C	UF-D
Schaden Vorsatzschale	VG	0	0	0	0	0	0	0	0
	VW	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1

Zustand der Talsperre		DS-A	DS-B	DS-C	DS-D	KS
Schaden Vorsatzschale	VG	0	0	0	0	0
	VW	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1

G.1.5 Knoten *Schaden Mauerdrainagen*

Tab. G.5: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Schaden Mauerdrainagen*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Schaden Mauerdrainagen	MD	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1

Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Schaden Mauerdrainagen	MD	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1

Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UF-A	UF-B	UF-C	UF-D
Schaden Mauerdrainagen	MD	1	1	1	1	0	0	0	0
	nein	0	0	0	0	1	1	1	1

Zustand der Talsperre		DS-A	DS-B	DS-C	DS-D	KS
Schaden Mauerdrainagen	MD	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1

G.1.6 Knoten *Schaden Untergrund*

Tab. G.6: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Schaden Untergrund*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Schaden Untergrund	UF	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1

Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Schaden Untergrund	UF	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1

Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UF-A	UF-B	UF-C	UF-D
Schaden Untergrund	UF	0	0	0	0	1	1	1	1
	nein	1	1	1	1	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		DS-A	DS-B	DS-C	DS-D	KS
Schaden Untergrund	UF	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1

G.1.7 Knoten *Schaden Dichtungsschleier*

Tab. G.7: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Schaden Dichtungsschleier*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Schaden Dichtungsschleier	DS	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1

Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Schaden Dichtungsschleier	DS	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1

Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UF-A	UF-B	UF-C	UF-D
Schaden Dichtungsschleier	DS	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1

Zustand der Talsperre		DS-A	DS-B	DS-C	DS-D	KS
Schaden Dichtungsschleier	DS	1	1	1	1	0
	nein	0	0	0	0	1

G.1.8 Knoten *Kritische Höhe*

Tab. G.8: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Kritische Höhe*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Kritische Höhe [m]	5,0 & 5,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,8 & 4,9	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,6 & 4,7	0	0	0	0	1	1	1	1
	4,4 & 4,5	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,2 & 4,3	1	0	0	0	0	0	0	0
	4,0 & 4,1	0	1	0	0	0	0	0	0
	3,8 & 3,9	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,6 & 3,7	0	0	1	1	0	0	0	0
	3,4 & 3,5	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,2 & 3,3	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Kritische Höhe [m]	5,0 & 5,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,8 & 4,9	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,6 & 4,7	0	0	0	0	1	1	0	0
	4,4 & 4,5	1	0	0	0	0	0	1	1
	4,2 & 4,3	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,0 & 4,1	0	1	0	0	0	0	0	0
	3,8 & 3,9	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,6 & 3,7	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,4 & 3,5	0	0	1	1	0	0	0	0
	3,2 & 3,3	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UF-A	UF-B	UF-C	UF-D
Kritische Höhe [m]	5,0 & 5,1	0	1	0	0	0	0	0	0
	4,8 & 4,9	1	0	1	0	0	0	0	0
	4,6 & 4,7	0	0	0	0	1	0	0	0
	4,4 & 4,5	0	0	0	1	0	1	0	0
	4,2 & 4,3	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,0 & 4,1	0	0	0	0	0	0	1	0
	3,8 & 3,9	0	0	0	0	0	0	0	1
	3,6 & 3,7	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,4 & 3,5	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,2 & 3,3	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		DS-A	DS-B	DS-C	DS-D	KS
Kritische Höhe [m]	5,0 & 5,1	0	0	0	0	0
	4,8 & 4,9	0	0	0	0	0
	4,6 & 4,7	0	0	0	0	1
	4,4 & 4,5	0	0	0	0	0
	4,2 & 4,3	0	0	0	0	0
	4,0 & 4,1	1	0	0	0	0
	3,8 & 3,9	0	0	0	0	0
	3,6 & 3,7	0	1	0	0	0
	3,4 & 3,5	0	0	1	0	0
	3,2 & 3,3	0	0	0	1	0

G.1.9 Knoten *Sickerwasser*

Tab. G.9: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Sickerwasser*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Sickerwasserabfluss [l/s]	0,028 - 0,031	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,031 - 0,033	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,033 - 0,035	0	0	0	0	1	1	1	1
	0,035 - 0,037	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,037 - 0,039	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,039 - 0,041	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,041 - 0,070	1	0	0	0	0	0	0	0
	0,070 - 0,130	0	1	0	0	0	0	0	0
	0,130 - 0,250	0	0	1	0	0	0	0	0
0,250 - 0,500	0	0	0	1	0	0	0	0	

Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Sickerwasserabfluss [l/s]	0,028 - 0,031	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,031 - 0,033	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,033 - 0,035	0	0	0	0	1	1	1	1
	0,035 - 0,037	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,037 - 0,039	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,039 - 0,041	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,041 - 0,070	1	0	0	0	0	0	0	0
	0,070 - 0,130	0	1	1	1	0	0	0	0
	0,130 - 0,250	0	0	0	0	0	0	0	0
0,250 - 0,500	0	0	0	0	0	0	0	0	

Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UF-A	UF-B	UF-C	UF-D
Sickerwasserabfluss [l/s]	0,028 - 0,031	0	1	1	1	0	0	0	1
	0,031 - 0,033	1	0	0	0	0	1	1	0
	0,033 - 0,035	0	0	0	0	1	0	0	0
	0,035 - 0,037	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,037 - 0,039	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,039 - 0,041	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,041 - 0,070	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,070 - 0,130	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,130 - 0,250	0	0	0	0	0	0	0	0
0,250 - 0,500	0	0	0	0	0	0	0	0	

Zustand der Talsperre		DS-A	DS-B	DS-C	DS-D	KS
Sickerwasserabfluss [l/s]	0,028 - 0,031	0	0	0	0	0
	0,031 - 0,033	0	0	0	0	0
	0,033 - 0,035	0	0	0	0	1
	0,035 - 0,037	1	0	0	0	0
	0,037 - 0,039	0	1	1	0	0
	0,039 - 0,041	0	0	0	1	0
	0,041 - 0,070	0	0	0	0	0
	0,070 - 0,130	0	0	0	0	0
	0,130 - 0,250	0	0	0	0	0
0,250 - 0,500	0	0	0	0	0	

G.1.10 Knoten *Gewichtslot*

Tab. G.10: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Gewichtslot*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Lotbewegung [mm]	-8,00 - -5,00	0	1	1	1	0	0	0	0
	-5,00 - -1,80	1	0	0	0	0	0	0	0
	-1,80 - -1,70	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1,70 - -1,55	0	0	0	0	1	0	0	0
	-1,55 - -1,40	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1,40 - -1,20	0	0	0	0	0	1	1	1
	-1,20 - -1,00	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1,00 - -0,70	0	0	0	0	0	0	0	0
	-0,70 - -0,40	0	0	0	0	0	0	0	0
-0,40 - -0,10	0	0	0	0	0	0	0	0	

Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Lotbewegung [mm]	-8,00 - -5,00	0	0	0	0	0	0	0	0
	-5,00 - -1,80	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1,80 - -1,70	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1,70 - -1,55	0	0	0	0	1	0	0	0
	-1,55 - -1,40	0	0	0	0	0	1	0	0
	-1,40 - -1,20	0	0	0	0	0	0	1	1
	-1,20 - -1,00	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1,00 - -0,70	0	0	0	0	0	0	0	0
	-0,70 - -0,40	1	1	0	0	0	0	0	0
-0,40 - -0,10	0	0	1	1	0	0	0	0	

Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UF-A	UF-B	UF-C	UF-D
Lotbewegung [mm]	-8,00 - -5,00	0	0	0	0	0	0	0	0
	-5,00 - -1,80	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1,80 - -1,70	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1,70 - -1,55	0	0	0	0	1	1	1	1
	-1,55 - -1,40	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1,40 - -1,20	1	0	0	0	0	0	0	0
	-1,20 - -1,00	0	1	1	0	0	0	0	0
	-1,00 - -0,70	0	0	0	1	0	0	0	0
	-0,70 - -0,40	0	0	0	0	0	0	0	0
-0,40 - -0,10	0	0	0	0	0	0	0	0	

Zustand der Talsperre		DS-A	DS-B	DS-C	DS-D	KS
Lotbewegung [mm]	-8,00 - -5,00	0	0	0	0	0
	-5,00 - -1,80	0	0	0	0	0
	-1,80 - -1,70	1	0	0	0	1
	-1,70 - -1,55	0	1	1	1	0
	-1,55 - -1,40	0	0	0	0	0
	-1,40 - -1,20	0	0	0	0	0
	-1,20 - -1,00	0	0	0	0	0
	-1,00 - -0,70	0	0	0	0	0
	-0,70 - -0,40	0	0	0	0	0
-0,40 - -0,10	0	0	0	0	0	

G.1.11 Knoten *Schwimmlot*

Tab. G.11: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Schwimmlot*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Lotbewegung [mm]	-0,50 - 0,50	0	1	1	1	0	0	0	0
	0,50 - 1,15	1	0	0	0	0	0	0	0
	1,15 - 1,20	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,20 - 1,25	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,25 - 1,30	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,30 - 1,35	0	0	0	0	1	1	1	1
	1,35 - 1,40	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,40 - 1,45	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,45 - 1,50	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Lotbewegung [mm]	-0,50 - 0,50	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,50 - 1,15	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,15 - 1,20	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,20 - 1,25	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,25 - 1,30	0	0	0	0	1	1	0	0
	1,30 - 1,35	0	0	0	0	0	0	1	1
	1,35 - 1,40	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,40 - 1,45	1	1	0	0	0	0	0	0
	1,45 - 1,50	0	0	1	1	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UF-A	UF-B	UF-C	UF-D
Lotbewegung [mm]	-0,50 - 0,50	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,50 - 1,15	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,15 - 1,20	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,20 - 1,25	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,25 - 1,30	0	0	0	0	1	0	0	0
	1,30 - 1,35	1	0	0	0	0	1	0	0
	1,35 - 1,40	0	1	1	0	0	0	1	0
	1,40 - 1,45	0	0	0	1	0	0	0	1
	1,45 - 1,50	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		DS-A	DS-B	DS-C	DS-D	KS
Lotbewegung [mm]	-0,50 - 0,50	0	0	0	0	0
	0,50 - 1,15	0	0	0	0	0
	1,15 - 1,20	0	0	1	1	0
	1,20 - 1,25	0	1	0	0	0
	1,25 - 1,30	1	0	0	0	1
	1,30 - 1,35	0	0	0	0	0
	1,35 - 1,40	0	0	0	0	0
	1,40 - 1,45	0	0	0	0	0
	1,45 - 1,50	0	0	0	0	0

G.1.12 Knoten *Piezometer 1*

Tab. G.12: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Piezometer 1*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Druckhöhe [mWS]	7,4 - 9,0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9,0 - 10,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	10,6 - 11,4	0	0	0	0	0	0	0	0
	11,4 - 11,8	0	0	0	1	0	0	0	0
	11,8 - 12,1	0	0	1	0	0	0	0	0
	12,1 - 12,3	0	1	0	0	0	0	0	0
	12,3 - 12,4	1	0	0	0	0	0	1	1
	12,4 - 12,5	0	0	0	0	1	1	0	0
	12,5 - 16,5	0	0	0	0	0	0	0	0
	16,5 - 20,5	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Druckhöhe [mWS]	7,4 - 9,0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9,0 - 10,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	10,6 - 11,4	0	0	0	0	0	0	0	0
	11,4 - 11,8	0	0	0	0	0	0	0	0
	11,8 - 12,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	12,1 - 12,3	0	0	0	0	0	0	0	0
	12,3 - 12,4	0	0	0	0	0	0	0	0
	12,4 - 12,5	1	1	1	1	1	1	1	1
	12,5 - 16,5	0	0	0	0	0	0	0	0
	16,5 - 20,5	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UF-A	UF-B	UF-C	UF-D
Druckhöhe [mWS]	7,4 - 9,0	0	0	0	0	0	0	0	1
	9,0 - 10,6	0	0	0	0	0	0	1	0
	10,6 - 11,4	0	0	0	0	0	1	0	0
	11,4 - 11,8	0	0	0	0	1	0	0	0
	11,8 - 12,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	12,1 - 12,3	0	0	0	0	0	0	0	0
	12,3 - 12,4	0	0	0	0	0	0	0	0
	12,4 - 12,5	1	1	1	1	0	0	0	0
	12,5 - 16,5	0	0	0	0	0	0	0	0
	16,5 - 20,5	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		DS-A	DS-B	DS-C	DS-D	KS
Druckhöhe [mWS]	7,4 - 9,0	0	0	0	0	0
	9,0 - 10,6	0	0	0	0	0
	10,6 - 11,4	0	0	0	0	0
	11,4 - 11,8	0	0	0	0	0
	11,8 - 12,1	0	0	0	0	0
	12,1 - 12,3	0	0	0	0	0
	12,3 - 12,4	0	0	0	0	0
	12,4 - 12,5	0	0	0	0	1
	12,5 - 16,5	1	0	0	0	0
	16,5 - 20,5	0	1	1	1	0

G.1.13 Knoten *Piezometer 2*Tab. G.13: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Piezometer 2*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Druckhöhe [mWS]	7,1 - 8,3	0	0	0	0	0	0	0	0
	8,3 - 9,2	0	0	0	0	0	0	0	0
	9,2 - 9,8	0	0	0	0	0	0	0	0
	9,8 - 10,1	0	0	0	1	0	0	0	0
	10,1 - 10,4	0	0	1	0	0	0	0	0
	10,4 - 10,5	0	1	0	0	0	0	0	1
	10,5 - 10,6	1	0	0	0	1	1	1	0
	10,6 - 12,8	0	0	0	0	0	0	0	0
	12,8 - 15,0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,0 - 17,2	0	0	0	0	0	0	0	0	

Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Druckhöhe [mWS]	7,1 - 8,3	0	0	0	0	0	0	0	0
	8,3 - 9,2	0	0	0	0	0	0	0	0
	9,2 - 9,8	0	0	0	0	0	0	0	0
	9,8 - 10,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	10,1 - 10,4	0	0	0	0	0	0	0	0
	10,4 - 10,5	0	0	0	0	0	0	0	0
	10,5 - 10,6	1	1	1	1	1	1	1	1
	10,6 - 12,8	0	0	0	0	0	0	0	0
	12,8 - 15,0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,0 - 17,2	0	0	0	0	0	0	0	0	

Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UF-A	UF-B	UF-C	UF-D
Druckhöhe [mWS]	7,1 - 8,3	0	0	0	0	0	0	0	1
	8,3 - 9,2	0	0	0	0	0	0	1	0
	9,2 - 9,8	0	0	0	0	0	1	0	0
	9,8 - 10,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	10,1 - 10,4	0	0	0	0	1	0	0	0
	10,4 - 10,5	0	0	0	0	0	0	0	0
	10,5 - 10,6	1	1	1	1	0	0	0	0
	10,6 - 12,8	0	0	0	0	0	0	0	0
	12,8 - 15,0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,0 - 17,2	0	0	0	0	0	0	0	0	

Zustand der Talsperre		DS-A	DS-B	DS-C	DS-D	KS
Druckhöhe [mWS]	7,1 - 8,3	0	0	0	0	0
	8,3 - 9,2	0	0	0	0	0
	9,2 - 9,8	0	0	0	0	0
	9,8 - 10,1	0	0	0	0	0
	10,1 - 10,4	0	0	0	0	0
	10,4 - 10,5	0	0	0	0	0
	10,5 - 10,6	0	0	0	0	1
	10,6 - 12,8	1	0	0	0	0
	12,8 - 15,0	0	1	0	0	0
15,0 - 17,2	0	0	1	1	0	

G.1.14 Knoten *Piezometer 3*

Tab. G.14: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Piezometer 3*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Druckhöhe [mWS]	5,5 - 6,2	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,2 - 6,9	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,9 - 7,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,6 - 7,9	0	0	0	1	0	0	0	0
	7,9 - 8,0	0	0	1	0	0	0	0	0
	8,0 - 8,1	0	1	0	0	0	0	0	1
	8,1 - 8,2	1	0	0	0	1	1	1	0
	8,2 - 9,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	9,6 - 10,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	10,6 - 11,6	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Druckhöhe [mWS]	5,5 - 6,2	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,2 - 6,9	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,9 - 7,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,6 - 7,9	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,9 - 8,0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8,0 - 8,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	8,1 - 8,2	1	1	1	1	1	1	1	1
	8,2 - 9,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	9,6 - 10,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	10,6 - 11,6	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UF-A	UF-B	UF-C	UF-D
Druckhöhe [mWS]	5,5 - 6,2	0	0	0	0	0	0	0	1
	6,2 - 6,9	0	0	0	0	0	0	1	0
	6,9 - 7,6	0	0	0	0	0	1	0	0
	7,6 - 7,9	0	0	0	0	1	0	0	0
	7,9 - 8,0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8,0 - 8,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	8,1 - 8,2	1	1	1	1	0	0	0	0
	8,2 - 9,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	9,6 - 10,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	10,6 - 11,6	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		DS-A	DS-B	DS-C	DS-D	KS
Druckhöhe [mWS]	5,5 - 6,2	0	0	0	0	0
	6,2 - 6,9	0	0	0	0	0
	6,9 - 7,6	0	0	0	0	0
	7,6 - 7,9	0	0	0	0	0
	7,9 - 8,0	0	0	0	0	0
	8,0 - 8,1	0	0	0	0	0
	8,1 - 8,2	0	0	0	0	1
	8,2 - 9,6	1	0	0	0	0
	9,6 - 10,6	0	1	0	0	0
	10,6 - 11,6	0	0	1	1	0

G.1.15 Knoten *Messwert Sickerwasser*Tab. G.15: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Messwert Sickerwasser*

Sickerwasser	0,028 - 0,031	0,031 - 0,033	0,033 - 0,035	0,035 - 0,037	0,037 - 0,039					
Sickerwasser- abfluss [l/s]	<p style="text-align: center;">Normalverteilung</p> <p style="text-align: center;">der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Sickerwasser übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert</p>									
$-\infty - 0$										
0 - 0,002										
0,002 - 0,004										
...										
0,596 - 0,598										
0,598 - 0,600	<p style="text-align: center;">Normalverteilung</p> <p style="text-align: center;">der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Sickerwasser übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert</p>									
0,600 - ∞										
Sickerwasser						0,039 - 0,041	0,041 - 0,070	0,070 - 0,130	0,130 - 0,250	0,250 - 0,500
Sickerwasser- abfluss [l/s]						<p style="text-align: center;">Normalverteilung</p> <p style="text-align: center;">der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Sickerwasser übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert</p>				
$-\infty - 0$										
0 - 0,002										
0,002 - 0,004										
...										
0,596 - 0,598										
0,598 - 0,600	<p style="text-align: center;">Normalverteilung</p> <p style="text-align: center;">der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Sickerwasser übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert</p>									
0,600 - ∞										

G.1.16 Knoten *Messwert Gewichtslot*

Tab. G.16: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Messwert Gewichtslot*

Gewichtslot		-8,00 - -5,00	-5,00 - -1,80	-1,80 - -1,70	-1,70 - -1,55	-1,55 - -1,40
Lotbewegung [mm]	$-\infty - -10,0$	Normalverteilung der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Gewichtslot übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert				
	$-10,0 - -9,9$					
	$-9,9 - -9,8$					
	...					
	$1,8 - 1,9$					
	$1,9 - 2,0$					
$2,0 - \infty$						

Gewichtslot		-1,40 - -1,20	-1,20 - -1,00	-1,00 - -0,70	-0,70 - -0,40	-0,40 - -0,10
Lotbewegung [mm]	$-\infty - -10,0$	Normalverteilung der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Gewichtslot übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert				
	$-10,0 - -9,9$					
	$-9,9 - -9,8$					
	...					
	$1,8 - 1,9$					
	$1,9 - 2,0$					
$2,0 - \infty$						

G.1.17 Knoten *Messwert Schwimmplot*

Tab. G.17: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Messwert Schwimmplot*

Schwimmplot	-0,50 - 0,50	0,50 - 1,15	1,15 - 1,20	1,20 - 1,25	1,25 - 1,30
Lotbewegung [mm]	$-\infty$ - -1,00				
	-1,00 - -0,95				
	-0,95 - -0,90				
	...				
	1,90 - 1,95				
	1,95 - 2,00				
	2,00 - ∞				
	Normalverteilung der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Schwimmplot übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert				
Schwimmplot	1,30 - 1,35	1,35 - 1,40	1,40 - 1,45	1,45 - 1,50	
Lotbewegung [mm]	$-\infty$ - -1,00				
	-1,00 - -0,95				
	-0,95 - -0,90				
	...				
	1,90 - 1,95				
	1,95 - 2,00				
	2,00 - ∞				
	Normalverteilung der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Schwimmplot übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert				

G.1.18 Knoten *Messwert Piezometer 1*

Tab. G.18: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Messwert Piezometer 1*

Piezometer 1		7,4 - 9,0	9,0 - 10,6	10,6 - 11,4	11,4 - 11,8	11,8 - 12,1
Druckhöhe [mWS]	$-\infty - 4,0$	<p style="text-align: center;">Normalverteilung</p> der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Piezometer 1 übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert				
	4,0 - 4,1					
	4,1 - 4,2					
	...					
	23,8 - 23,9					
	23,9 - 24,0					
24,0 - ∞						
Piezometer 1		12,1 - 12,3	12,3 - 12,4	12,4 - 12,5	12,5 - 16,5	16,5 - 20,5
Druckhöhe [mWS]	$-\infty - 4,0$	<p style="text-align: center;">Normalverteilung</p> der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Piezometer 1 übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert				
	4,0 - 4,1					
	4,1 - 4,2					
	...					
	23,8 - 23,9					
	23,9 - 24,0					
24,0 - ∞						

G.1.19 Knoten *Messwert Piezometer 2*

Tab. G.19: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Messwert Piezometer 2*

Piezometer 2	7,1 - 8,3	8,3 - 9,2	9,2 - 9,8	9,8 - 10,1	10,1 - 10,4
Druckhöhe [mWS]	<p style="text-align: center;">Normalverteilung</p> <p>der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Piezometer 2 übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert</p>				
-∞ - 3,5					
3,5 - 3,6					
3,6 - 3,7					
...					
20,8 - 20,9					
20,9 - 21,0					
21,0 - ∞					

Piezometer 2	10,4 - 10,5	10,5 - 10,6	10,6 - 12,8	12,8 - 15,0	15,0 - 17,2
Druckhöhe [mWS]	<p style="text-align: center;">Normalverteilung</p> <p>der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Piezometer 2 übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert</p>				
-∞ - 3,5					
3,5 - 3,6					
3,6 - 3,7					
...					
20,8 - 20,9					
20,9 - 21,0					
21,0 - ∞					

G.1.20 Knoten *Messwert Piezometer 3*

Tab. G.20: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Messwert Piezometer 3*

Piezometer 3		5,5 - 6,2	6,2 - 6,9	6,9 - 7,6	7,6 - 7,9	7,9 - 8,0
Druckhöhe [mWS]	$-\infty - 2,0$	<p style="text-align: center;">Normalverteilung</p> der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Piezometer 3 übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert				
	2,0 - 2,1					
	2,1 - 2,2					
	...					
	14,8 - 14,9					
	14,9 - 15,0					
15,0 - ∞						
Piezometer 3		8,0 - 8,1	8,1 - 8,2	8,2 - 9,6	9,6 - 10,6	10,6 - 11,6
Druckhöhe [mWS]	$-\infty - 2,0$	<p style="text-align: center;">Normalverteilung</p> der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Piezometer 3 übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert				
	2,0 - 2,1					
	2,1 - 2,2					
	...					
	14,8 - 14,9					
	14,9 - 15,0					
15,0 - ∞						

G.2 Bedingte Wahrscheinlichkeitstafeln für Gewichtsstaumauern mit Untergrunddrainagen

G.2.1 Knoten *Zustand der Talsperre*

Tab. G.21: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Zustand der Talsperre*

Zustand	KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Wahrscheinlichkeit	2,94E-05	2,94E-05	2,94E-05	2,94E-05	8,81E-05	8,81E-05	8,81E-05	8,81E-05
Zustand	VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Wahrscheinlichkeit	2,18E-05	2,18E-05	2,18E-05	2,18E-05	6,53E-05	6,53E-05	6,53E-05	6,53E-05
Zustand	MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UD-A	UD-B	UD-C	UD-D
Wahrscheinlichkeit	4,64E-05	4,64E-05	4,64E-05	4,64E-05	3,92E-05	3,92E-05	3,92E-05	3,92E-05
Zustand	US-A	US-B	US-C	US-D	DS-A	DS-B	DS-C	DS-D
Wahrscheinlichkeit	3,92E-05	3,92E-05	3,92E-05	3,92E-05	5,80E-06	5,80E-06	5,80E-06	5,80E-06
Zustand	DU-A	DU-B	DU-C	DU-D	KS			
Wahrscheinlichkeit	5,16E-05	5,16E-05	5,16E-05	5,16E-05	9,98E-01			

G.2.2 Knoten *Kein Schaden*

Tab. G.22: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *kein Schaden*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
kein Schaden	ja	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1
Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
kein Schaden	ja	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1
Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UD-A	UD-B	UD-C	UD-D
kein Schaden	ja	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1
Zustand der Talsperre		US-A	US-B	US-C	US-D	DS-A	DS-B	DS-C	DS-D
kein Schaden	ja	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1
Zustand der Talsperre		DU-A	DU-B	DU-C	DU-D	KS			
kein Schaden	ja	0	0	0	0	1			
	nein	1	1	1	1	0			

G.2.3 Knoten *Schaden Mauerkern*

Tab. G.23: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Schaden Mauerkern*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Schaden Mauerkern	KG	1	1	1	1	0	0	0	0
	KL	0	0	0	0	1	1	1	1
	nein	0	0	0	0	0	0	0	0
Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Schaden Mauerkern	KG	0	0	0	0	0	0	0	0
	KL	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1
Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UD-A	UD-B	UD-C	UD-D
Schaden Mauerkern	KG	0	0	0	0	0	0	0	0
	KL	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1
Zustand der Talsperre		US-A	US-B	US-C	US-D	DS-A	DS-B	DS-C	DS-D
Schaden Mauerkern	KG	0	0	0	0	0	0	0	0
	KL	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1
Zustand der Talsperre		DU-A	DU-B	DU-C	DU-D	KS			
Schaden Mauerkern	KG	0	0	0	0	0			
	KL	0	0	0	0	0			
	nein	1	1	1	1	1			

G.2.4 Knoten *Schaden Vorsatzschale*

Tab. G.24: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Schaden Vorsatzschale*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Schaden Vorsatzschale	VG	0	0	0	0	0	0	0	0
	VW	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1

Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Schaden Vorsatzschale	VG	1	1	1	1	0	0	0	0
	VW	0	0	0	0	1	1	1	1
	nein	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UD-A	UD-B	UD-C	UD-D
Schaden Vorsatzschale	VG	0	0	0	0	0	0	0	0
	VL	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1

Zustand der Talsperre		US-A	US-B	US-C	US-D	DS-A	DS-B	DS-C	DS-D
Schaden Vorsatzschale	VG	0	0	0	0	0	0	0	0
	VW	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1

Zustand der Talsperre		DU-A	DU-B	DU-C	DU-D	KS
Schaden Vorsatzschale	VG	0	0	0	0	0
	VW	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1

G.2.5 Knoten *Schaden Mauerdrainagen*

Tab. G.25: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Schaden Mauerdrainagen*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Schaden Mauerdrainagen	MD	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1

Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Schaden Mauerdrainagen	MD	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1

Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UD-A	UD-B	UD-C	UD-D
Schaden Mauerdrainagen	MD	1	1	1	1	0	0	0	0
	nein	0	0	0	0	1	1	1	1

Zustand der Talsperre		US-A	US-B	US-C	US-D	DS-A	DS-B	DS-C	DS-D
Schaden Mauerdrainagen	MD	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1

Zustand der Talsperre		DU-A	DU-B	DU-C	DU-D	KS
Schaden Mauerdrainagen	MD	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1

G.2.6 Knoten *Schaden Untergrund*Tab. G.26: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Schaden Untergrund*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Schaden Untergrund	UD	0	0	0	0	0	0	0	0
	US	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1
Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Schaden Untergrund	UD	0	0	0	0	0	0	0	0
	US	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1
Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UD-A	UD-B	UD-C	UD-D
Schaden Untergrund	UD	0	0	0	0	1	1	1	1
	US	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	0	0	0	0
Zustand der Talsperre		US-A	US-B	US-C	US-D	DS-A	DS-B	DS-C	DS-D
Schaden Untergrund	UD	0	0	0	0	0	0	0	0
	US	1	1	1	1	0	0	0	0
	nein	0	0	0	0	1	1	1	1
Zustand der Talsperre		DU-A	DU-B	DU-C	DU-D	KS			
Schaden Untergrund	UD	0	0	0	0	0			
	US	0	0	0	0	0			
	nein	1	1	1	1	1			

G.2.7 Knoten *Schaden Dichtungsschleier*

Tab. G.27: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Schaden Dichtungsschleier*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Schaden Dichtungsschleier	DS	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1
Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Schaden Dichtungsschleier	DS	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1
Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UD-A	UD-B	UD-C	UD-D
Schaden Dichtungsschleier	DS	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1
Zustand der Talsperre		US-A	US-B	US-C	US-D	DS-A	DS-B	DS-C	DS-D
Schaden Dichtungsschleier	DS	0	0	0	0	1	1	1	1
	nein	1	1	1	1	0	0	0	0
Zustand der Talsperre		DU-A	DU-B	DU-C	DU-D	KS			
Schaden Dichtungsschleier	DS	0	0	0	0	0			
	nein	1	1	1	1	1			

G.2.8 Knoten *Schaden Untergrunddrainagen*

Tab. G.28: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Schaden Untergrunddrainagen*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Schaden Untergrunddrainagen	DU	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1
Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Schaden Untergrunddrainagen	DU	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1
Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UD-A	UD-B	UD-C	UD-D
Schaden Untergrunddrainagen	DU	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1
Zustand der Talsperre		US-A	US-B	US-C	US-D	DS-A	DS-B	DS-C	DS-D
Schaden Untergrunddrainagen	DU	0	0	0	0	0	0	0	0
	nein	1	1	1	1	1	1	1	1
Zustand der Talsperre		DU-A	DU-B	DU-C	DU-D	KS			
Schaden Untergrunddrainagen	DU	1	1	1	1	0			
	nein	0	0	0	0	1			

G.2.9 Knoten *Kritische Höhe*

Tab. G.29: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Kritische Höhe*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Kritische Höhe [m]	6,4 & 6,5	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,2 & 6,3	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,0 & 6,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,8 & 5,9	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,6 & 5,7	0	0	0	0	1	1	0	0
	5,4 & 5,5	0	0	0	0	0	0	1	1
	5,2 & 5,3	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,0 & 5,1	1	0	0	0	0	0	0	0
	4,8 & 4,9	0	1	0	0	0	0	0	0
	4,6 & 4,7	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,4 & 4,5	0	0	1	0	0	0	0	0
	4,2 & 4,3	0	0	0	1	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Kritische Höhe [m]	6,4 & 6,5	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,2 & 6,3	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,0 & 6,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,8 & 5,9	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,6 & 5,7	1	0	0	0	1	1	0	0
	5,4 & 5,5	0	0	0	0	0	0	1	1
	5,2 & 5,3	0	1	0	0	0	0	0	0
	5,0 & 5,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,8 & 4,9	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,6 & 4,7	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,4 & 4,5	0	0	1	1	0	0	0	0
	4,2 & 4,3	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UD-A	UD-B	UD-C	UD-D
Kritische Höhe [m]	6,4 & 6,5	0	0	0	0	0	0	0	1
	6,2 & 6,3	0	1	0	0	0	0	1	0
	6,0 & 6,1	1	0	1	0	0	1	0	0
	5,8 & 5,9	0	0	0	0	1	0	0	0
	5,6 & 5,7	0	0	0	1	0	0	0	0
	5,4 & 5,5	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,2 & 5,3	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,0 & 5,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,8 & 4,9	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,6 & 4,7	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,4 & 4,5	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,2 & 4,3	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		US-A	US-B	US-C	US-D	DS-A	DS-B	DS-C	DS-D
Kritische Höhe [m]	6,4 & 6,5	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,2 & 6,3	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,0 & 6,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,8 & 5,9	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,6 & 5,7	1	1	0	0	0	0	0	0
	5,4 & 5,5	0	0	1	1	0	0	0	0
	5,2 & 5,3	0	0	0	0	1	0	0	0
	5,0 & 5,1	0	0	0	0	0	1	0	0
	4,8 & 4,9	0	0	0	0	0	0	1	0
	4,6 & 4,7	0	0	0	0	0	0	0	1
	4,4 & 4,5	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,2 & 4,3	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		DU-A	DU-B	DU-C	DU-D	KS
Kritische Höhe [m]	6,4 & 6,5	0	0	0	0	0
	6,2 & 6,3	0	0	0	0	0
	6,0 & 6,1	0	0	0	0	0
	5,8 & 5,9	0	0	0	0	0
	5,6 & 5,7	0	0	0	0	1
	5,4 & 5,5	1	0	0	0	0
	5,2 & 5,3	0	0	0	0	0
	5,0 & 5,1	0	1	0	0	0
	4,8 & 4,9	0	0	0	0	0
	4,6 & 4,7	0	0	1	1	0
	4,4 & 4,5	0	0	0	0	0
	4,2 & 4,3	0	0	0	0	0

G.2.10 Knoten *Sickerwasser*Tab. G.30: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Sickerwasser*

Zustand der Talsperre	KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Sickerwasserabfluss [l/s]								
0,00 - 0,30	0	0	0	0	0	0	0	0
0,30 - 0,80	0	0	0	0	0	0	0	0
0,80 - 1,30	0	0	0	0	0	0	0	0
1,30 - 1,35	1	1	0	0	1	1	1	1
1,35 - 1,40	0	0	1	0	0	0	0	0
1,40 - 1,45	0	0	0	0	0	0	0	0
1,45 - 1,50	0	0	0	1	0	0	0	0
1,50 - 2,00	0	0	0	0	0	0	0	0
2,00 - 2,50	0	0	0	0	0	0	0	0
2,50 - 3,00	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre	VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Sickerwasserabfluss [l/s]								
0,00 - 0,30	0	0	0	0	0	0	0	0
0,30 - 0,80	0	0	0	0	0	0	0	0
0,80 - 1,30	0	0	0	0	0	0	0	0
1,30 - 1,35	1	0	0	0	1	1	1	1
1,35 - 1,40	0	1	1	1	0	0	0	0
1,40 - 1,45	0	0	0	0	0	0	0	0
1,45 - 1,50	0	0	0	0	0	0	0	0
1,50 - 2,00	0	0	0	0	0	0	0	0
2,00 - 2,50	0	0	0	0	0	0	0	0
2,50 - 3,00	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre	MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UD-A	UD-B	UD-C	UD-D
Sickerwasserabfluss [l/s]								
0,00 - 0,30	0	0	0	0	0	0	0	0
0,30 - 0,80	0	0	0	0	0	0	0	0
0,80 - 1,30	0	0	0	0	0	0	0	0
1,30 - 1,35	1	1	1	1	0	0	0	0
1,35 - 1,40	0	0	0	0	0	0	0	0
1,40 - 1,45	0	0	0	0	0	0	0	0
1,45 - 1,50	0	0	0	0	0	0	0	0
1,50 - 2,00	0	0	0	0	1	0	0	0
2,00 - 2,50	0	0	0	0	0	1	0	0
2,50 - 3,00	0	0	0	0	0	0	1	1

Zustand der Talsperre	US-A	US-B	US-C	US-D	DS-A	DS-B	DS-C	DS-D
Sickerwasserabfluss [l/s]								
0,00 - 0,30	0	0	0	0	0	0	0	0
0,30 - 0,80	0	0	0	0	0	0	0	0
0,80 - 1,30	0	0	0	0	0	0	0	0
1,30 - 1,35	1	0	0	0	0	0	0	0
1,35 - 1,40	0	1	1	0	0	0	0	0
1,40 - 1,45	0	0	0	1	0	0	0	0
1,45 - 1,50	0	0	0	0	0	0	0	0
1,50 - 2,00	0	0	0	0	1	0	0	0
2,00 - 2,50	0	0	0	0	0	1	0	0
2,50 - 3,00	0	0	0	0	0	0	1	1

Zustand der Talsperre	DU-A	DU-B	DU-C	DU-D	KS
Sickerwasserabfluss [l/s]					
0,00 - 0,30	0	0	1	1	0
0,30 - 0,80	0	1	0	0	0
0,80 - 1,30	1	0	0	0	0
1,30 - 1,35	0	0	0	0	1
1,35 - 1,40	0	0	0	0	0
1,40 - 1,45	0	0	0	0	0
1,45 - 1,50	0	0	0	0	0
1,50 - 2,00	0	0	0	0	0
2,00 - 2,50	0	0	0	0	0
2,50 - 3,00	0	0	0	0	0

G.2.11 Knoten *Gewichtslot*

Tab. G.31: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Gewichtslot*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Lotbewegung [mm]	-8,00 - -5,00	0	1	1	1	0	0	0	0
	-5,00 - -2,00	1	0	0	0	0	0	0	0
	-2,00 - -1,90	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1,90 - -1,80	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1,80 - -1,65	0	0	0	0	1	0	0	0
	-1,65 - -1,50	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1,50 - -1,20	0	0	0	0	0	1	1	1
	-1,20 - -0,90	0	0	0	0	0	0	0	0
	-0,90 - -0,60	0	0	0	0	0	0	0	0
	-0,60 - -0,30	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Lotbewegung [mm]	-8,00 - -5,00	0	0	0	0	0	0	0	0
	-5,00 - -2,00	0	0	0	0	0	0	0	0
	-2,00 - -1,90	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1,90 - -1,80	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1,80 - -1,65	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1,65 - -1,50	0	0	0	0	1	0	0	0
	-1,50 - -1,20	0	0	0	0	0	1	1	1
	-1,20 - -0,90	0	0	0	0	0	0	0	0
	-0,90 - -0,60	1	0	0	0	0	0	0	0
	-0,60 - -0,30	0	1	1	1	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UD-A	UD-B	UD-C	UD-D
Lotbewegung [mm]	-8,00 - -5,00	0	0	0	0	0	0	0	0
	-5,00 - -2,00	0	0	0	0	0	0	0	0
	-2,00 - -1,90	0	0	0	0	0	1	1	1
	-1,90 - -1,80	0	0	0	0	1	0	0	0
	-1,80 - -1,65	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1,65 - -1,50	1	0	0	0	0	0	0	0
	-1,50 - -1,20	0	1	1	0	0	0	0	0
	-1,20 - -0,90	0	0	0	1	0	0	0	0
	-0,90 - -0,60	0	0	0	0	0	0	0	0
	-0,60 - -0,30	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		US-A	US-B	US-C	US-D	DS-A	DS-B	DS-C	DS-D
Lotbewegung [mm]	-8,00 - -5,00	0	0	0	0	0	0	0	0
	-5,00 - -2,00	0	0	0	0	0	0	0	0
	-2,00 - -1,90	0	0	0	0	0	0	0	1
	-1,90 - -1,80	1	1	1	1	1	1	1	0
	-1,80 - -1,65	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1,65 - -1,50	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1,50 - -1,20	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1,20 - -0,90	0	0	0	0	0	0	0	0
	-0,90 - -0,60	0	0	0	0	0	0	0	0
	-0,60 - -0,30	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		DU-A	DU-B	DU-C	DU-D	KS
Lotbewegung [mm]	-8,00 - -5,00	0	0	0	0	0
	-5,00 - -2,00	0	0	0	0	0
	-2,00 - -1,90	0	0	0	0	0
	-1,90 - -1,80	0	0	0	0	1
	-1,80 - -1,65	1	1	1	1	0
	-1,65 - -1,50	0	0	0	0	0
	-1,50 - -1,20	0	0	0	0	0
	-1,20 - -0,90	0	0	0	0	0
	-0,90 - -0,60	0	0	0	0	0
	-0,60 - -0,30	0	0	0	0	0

G.2.12 Knoten *Schwimmlot*Tab. G.32: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Schwimmlot*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Lotbewegung [mm]	-0,50 - 0,50	0	1	1	1	0	0	0	0
	0,50 - 1,15	1	0	0	0	0	0	0	0
	1,15 - 1,20	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,20 - 1,25	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,25 - 1,30	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,30 - 1,35	0	0	0	0	1	0	0	0
	1,35 - 1,40	0	0	0	0	0	1	1	1
	1,40 - 1,45	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,45 - 1,50	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Lotbewegung [mm]	-0,50 - 0,50	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,50 - 1,15	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,15 - 1,20	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,20 - 1,25	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,25 - 1,30	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,30 - 1,35	0	0	0	0	1	1	1	0
	1,35 - 1,40	0	0	0	0	0	0	0	1
	1,40 - 1,45	1	0	0	0	0	0	0	0
	1,45 - 1,50	0	1	1	1	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UD-A	UD-B	UD-C	UD-D
Lotbewegung [mm]	-0,50 - 0,50	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,50 - 1,15	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,15 - 1,20	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,20 - 1,25	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,25 - 1,30	0	0	0	0	1	1	1	1
	1,30 - 1,35	1	0	0	0	0	0	0	0
	1,35 - 1,40	0	1	1	0	0	0	0	0
	1,40 - 1,45	0	0	0	1	0	0	0	0
	1,45 - 1,50	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		US-A	US-B	US-C	US-D	DS-A	DS-B	DS-C	DS-D
Lotbewegung [mm]	-0,50 - 0,50	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,50 - 1,15	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,15 - 1,20	0	0	0	0	0	0	0	1
	1,20 - 1,25	0	0	0	0	0	1	1	0
	1,25 - 1,30	1	1	1	1	1	0	0	0
	1,30 - 1,35	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,35 - 1,40	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,40 - 1,45	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,45 - 1,50	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		DU-A	DU-B	DU-C	DU-D	KS
Lotbewegung [mm]	-0,50 - 0,50	0	0	0	0	0
	0,50 - 1,15	0	0	0	0	0
	1,15 - 1,20	0	0	0	0	0
	1,20 - 1,25	0	0	0	0	0
	1,25 - 1,30	1	1	1	1	1
	1,30 - 1,35	0	0	0	0	0
	1,35 - 1,40	0	0	0	0	0
	1,40 - 1,45	0	0	0	0	0
	1,45 - 1,50	0	0	0	0	0

G.2.13 Knoten *Piezometer 1*

Tab. G.33: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Piezometer 1*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Druckhöhe [mWS]	1,0 - 3,5	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,5 - 6,0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,0 - 6,1	0	0	0	1	0	0	0	0
	6,1 - 6,2	0	0	1	0	0	0	0	0
	6,2 - 6,3	1	1	0	0	1	1	1	1
	6,3 - 6,5	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,5 - 6,9	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,9 - 8,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	8,6 - 10,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	10,6 - 12,9	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Druckhöhe [mWS]	1,0 - 3,5	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,5 - 6,0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,0 - 6,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,1 - 6,2	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,2 - 6,3	1	1	1	1	1	1	1	1
	6,3 - 6,5	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,5 - 6,9	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,9 - 8,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	8,6 - 10,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	10,6 - 12,9	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UD-A	UD-B	UD-C	UD-D
Druckhöhe [mWS]	1,0 - 3,5	0	0	0	0	0	0	1	1
	3,5 - 6,0	0	0	0	0	1	1	0	0
	6,0 - 6,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,1 - 6,2	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,2 - 6,3	1	1	1	1	0	0	0	0
	6,3 - 6,5	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,5 - 6,9	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,9 - 8,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	8,6 - 10,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	10,6 - 12,9	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		US-A	US-B	US-C	US-D	DS-A	DS-B	DS-C	DS-D
Druckhöhe [mWS]	1,0 - 3,5	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,5 - 6,0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,0 - 6,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,1 - 6,2	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,2 - 6,3	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,3 - 6,5	1	1	0	0	0	0	0	0
	6,5 - 6,9	0	0	1	1	0	0	0	0
	6,9 - 8,6	0	0	0	0	1	0	0	0
	8,6 - 10,6	0	0	0	0	0	1	1	0
	10,6 - 12,9	0	0	0	0	0	0	0	1

Zustand der Talsperre		DU-A	DU-B	DU-C	DU-D	KS
Druckhöhe [mWS]	1,0 - 3,5	0	0	0	0	0
	3,5 - 6,0	0	0	0	0	0
	6,0 - 6,1	0	0	0	0	0
	6,1 - 6,2	0	0	0	0	0
	6,2 - 6,3	0	0	0	0	1
	6,3 - 6,5	0	0	0	0	0
	6,5 - 6,9	0	0	0	0	0
	6,9 - 8,6	1	0	0	0	0
	8,6 - 10,6	0	1	0	0	0
	10,6 - 12,9	0	0	1	1	0

G.2.14 Knoten *Piezometer 2*Tab. G.34: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Piezometer 2*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Druckhöhe [mWS]	3,0 - 5,0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,0 - 7,0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,0 - 7,1	0	0	0	1	0	0	0	0
	7,1 - 7,2	0	0	1	0	0	0	0	0
	7,2 - 7,3	1	1	0	0	1	1	1	1
	7,3 - 7,5	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,5 - 7,8	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,8 - 8,2	0	0	0	0	0	0	0	0
	8,2 - 9,8	0	0	0	0	0	0	0	0
	9,8 - 12,2	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Druckhöhe [mWS]	3,0 - 5,0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,0 - 7,0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,0 - 7,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,1 - 7,2	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,2 - 7,3	1	1	1	1	1	1	1	1
	7,3 - 7,5	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,5 - 7,8	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,8 - 8,2	0	0	0	0	0	0	0	0
	8,2 - 9,8	0	0	0	0	0	0	0	0
	9,8 - 12,2	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UD-A	UD-B	UD-C	UD-D
Druckhöhe [mWS]	3,0 - 5,0	0	0	0	0	0	0	1	1
	5,0 - 7,0	0	0	0	0	1	1	0	0
	7,0 - 7,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,1 - 7,2	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,2 - 7,3	1	1	1	1	0	0	0	0
	7,3 - 7,5	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,5 - 7,8	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,8 - 8,2	0	0	0	0	0	0	0	0
	8,2 - 9,8	0	0	0	0	0	0	0	0
	9,8 - 12,2	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		US-A	US-B	US-C	US-D	DS-A	DS-B	DS-C	DS-D
Druckhöhe [mWS]	3,0 - 5,0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,0 - 7,0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,0 - 7,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,1 - 7,2	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,2 - 7,3	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,3 - 7,5	1	1	0	0	0	0	0	0
	7,5 - 7,8	0	0	1	1	0	0	0	0
	7,8 - 8,2	0	0	0	0	0	0	0	0
	8,2 - 9,8	0	0	0	0	1	0	0	0
	9,8 - 12,2	0	0	0	0	0	1	1	1

Zustand der Talsperre		DU-A	DU-B	DU-C	DU-D	KS
Druckhöhe [mWS]	3,0 - 5,0	0	0	0	0	0
	5,0 - 7,0	0	0	0	0	0
	7,0 - 7,1	0	0	0	0	0
	7,1 - 7,2	0	0	0	0	0
	7,2 - 7,3	0	0	0	0	1
	7,3 - 7,5	0	0	0	0	0
	7,5 - 7,8	0	0	0	0	0
	7,8 - 8,2	1	0	0	0	0
	8,2 - 9,8	0	1	0	0	0
	9,8 - 12,2	0	0	1	1	0

G.2.15 Knoten *Piezometer 3*

Tab. G.35: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Piezometer 3*

Zustand der Talsperre		KG-A	KG-B	KG-C	KG-D	KL-A	KL-B	KL-C	KL-D
Druckhöhe [mWS]	4,1 - 4,9	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,9 - 5,7	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,7 - 6,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,1 - 6,3	0	0	1	1	0	0	0	1
	6,3 - 6,4	1	1	0	0	1	1	1	0
	6,4 - 6,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,6 - 7,0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,0 - 7,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,6 - 8,4	0	0	0	0	0	0	0	0
	8,4 - 9,4	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		VG-A	VG-B	VG-C	VG-D	VW-A	VW-B	VW-C	VW-D
Druckhöhe [mWS]	4,1 - 4,9	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,9 - 5,7	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,7 - 6,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,1 - 6,3	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,3 - 6,4	1	1	1	1	1	1	1	1
	6,4 - 6,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,6 - 7,0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,0 - 7,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,6 - 8,4	0	0	0	0	0	0	0	0
	8,4 - 9,4	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		MD-A	MD-B	MD-C	MD-D	UD-A	UD-B	UD-C	UD-D
Druckhöhe [mWS]	4,1 - 4,9	0	0	0	0	0	0	1	1
	4,9 - 5,7	0	0	0	0	0	1	0	0
	5,7 - 6,1	0	0	0	0	1	0	0	0
	6,1 - 6,3	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,3 - 6,4	1	1	1	1	0	0	0	0
	6,4 - 6,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,6 - 7,0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,0 - 7,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	7,6 - 8,4	0	0	0	0	0	0	0	0
	8,4 - 9,4	0	0	0	0	0	0	0	0

Zustand der Talsperre		US-A	US-B	US-C	US-D	DS-A	DS-B	DS-C	DS-D
Druckhöhe [mWS]	4,1 - 4,9	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,9 - 5,7	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,7 - 6,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,1 - 6,3	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,3 - 6,4	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,4 - 6,6	1	1	0	0	0	0	0	0
	6,6 - 7,0	0	0	1	1	0	0	0	0
	7,0 - 7,6	0	0	0	0	1	0	0	0
	7,6 - 8,4	0	0	0	0	0	1	0	0
	8,4 - 9,4	0	0	0	0	0	0	1	1

Zustand der Talsperre		DU-A	DU-B	DU-C	DU-D	KS
Druckhöhe [mWS]	4,1 - 4,9	0	0	0	0	0
	4,9 - 5,7	0	0	0	0	0
	5,7 - 6,1	0	0	0	0	0
	6,1 - 6,3	0	0	0	0	0
	6,3 - 6,4	0	0	0	0	1
	6,4 - 6,6	0	0	0	0	0
	6,6 - 7,0	1	0	0	0	0
	7,0 - 7,6	0	1	0	0	0
	7,6 - 8,4	0	0	1	1	0
	8,4 - 9,4	0	0	0	0	0

G.2.16 Knoten *Messwert Sickerwasser*

Tab. G.36: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Messwert Sickerwasser*

Sickerwasser	0 - 0,30	0,30 - 0,80	0,80 - 1,30	1,30 - 1,35	1,35 - 1,40					
Sickerwasser-abfluss [l/s]	<p style="text-align: center;">Normalverteilung der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Sickerwasser übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert</p>									
$-\infty - 0$										
0 - 0,05										
0,05 - 0,10										
...										
3,40 - 3,45										
3,45 - 3,50	<p style="text-align: center;">Normalverteilung der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Sickerwasser übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert</p>									
3,50 - ∞										
Sickerwasser						1,40 - 1,45	1,45 - 1,50	1,50 - 2,00	2,00 - 2,50	2,50 - 3,00
Sickerwasser-abfluss [l/s]						<p style="text-align: center;">Normalverteilung der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Sickerwasser übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert</p>				
$-\infty - 0$										
0 - 0,05										
0,05 - 0,10										
...										
3,40 - 3,45										
3,45 - 3,50										
3,50 - ∞	<p style="text-align: center;">Normalverteilung der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Sickerwasser übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert</p>									

G.2.17 Knoten *Messwert Gewichtslot*

Tab. G.37: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Messwert Gewichtslot*

Gewichtslot		-8,00 - -5,00	-5,00 - -2,00	-2,00 - -1,90	-1,90 - -1,80	-1,80 - -1,65
Lotbewegung [mm]	$-\infty - -10,0$	<p style="text-align: center;">Normalverteilung</p> <p>der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Gewichtslot übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert</p>				
	$-10,0 - -9,9$					
	$-9,9 - -9,8$					
	...					
	$1,8 - 1,9$					
	$1,9 - 2,0$					
$2,0 - \infty$						
Gewichtslot		-1,65 - -1,50	-1,50 - -1,20	-1,20 - -0,90	-0,90 - -0,60	-0,60 - -0,30
Lotbewegung [mm]	$-\infty - -10,0$	<p style="text-align: center;">Normalverteilung</p> <p>der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Gewichtslot übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert</p>				
	$-10,0 - -9,9$					
	$-9,9 - -9,8$					
	...					
	$1,8 - 1,9$					
	$1,9 - 2,0$					
$2,0 - \infty$						

G.2.18 Knoten *Messwert Schwimmplot*

Tab. G.38: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Messwert Schwimmplot*

Schwimmplot	-0,50 - 0,50	0,50 - 1,15	1,15 - 1,20	1,20 - 1,25	1,25 - 1,30
Lotbewegung [mm]	$-\infty - -1,00$				
	$-1,00 - -0,95$				
	$-0,95 - -0,90$				
...					
	$1,90 - 1,95$				
	$1,95 - 2,00$				
	$2,00 - \infty$				
	Normalverteilung der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Schwimmplot übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert				
Schwimmplot	1,30 - 1,35	1,35 - 1,40	1,40 - 1,45	1,45 - 1,50	
Lotbewegung [mm]	$-\infty - -1,00$				
	$-1,00 - -0,95$				
	$-0,95 - -0,90$				
...					
	$1,90 - 1,95$				
	$1,95 - 2,00$				
	$2,00 - \infty$				
	Normalverteilung der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Schwimmplot übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert				

G.2.19 Knoten *Messwert Piezometer 1*

Tab. G.39: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Messwert Piezometer 1*

Piezometer 1		1,0 - 3,5	3,5 - 6,0	6,0 - 6,1	6,1 - 6,2	6,2 - 6,3
Druckhöhe [mWS]	$-\infty - 0$	Normalverteilung der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Piezometer 1 übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert				
	0 - 0,1					
	0,1 - 0,2					
	...					
	14,8 - 14,9					
	14,9 - 15,0					
15,0 - ∞						
Piezometer 1		6,3 - 6,5	6,5 - 6,9	6,9 - 8,6	8,6 - 10,6	10,6 - 12,9
Druckhöhe [mWS]	$-\infty - 0$	Normalverteilung der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Piezometer 1 übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert				
	0 - 0,1					
	0,1 - 0,2					
	...					
	14,8 - 14,9					
	14,9 - 15,0					
15,0 - ∞						

G.2.20 Knoten *Messwert Piezometer 2*

Tab. G.40: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Messwert Piezometer 2*

Piezometer 2	3,0 - 5,0	5,0 - 7,0	7,0 - 7,1	7,1 - 7,2	7,2 - 7,3
Druckhöhe [mWS]	<p style="text-align: center;">Normalverteilung</p> <p>der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Piezometer 2 übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert</p>				
$-\infty - 0$					
0 - 0,1					
0,1 - 0,2					
...					
14,8 - 14,9					
14,9 - 15,0					
15,0 - ∞					

Piezometer 2	7,3 - 7,5	7,5 - 7,8	7,8 - 8,2	8,2 - 9,8	9,8 - 12,2
Druckhöhe [mWS]	<p style="text-align: center;">Normalverteilung</p> <p>der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Piezometer 2 übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert</p>				
$-\infty - 0$					
0 - 0,1					
0,1 - 0,2					
...					
14,8 - 14,9					
14,9 - 15,0					
15,0 - ∞					

G.2.21 Knoten *Messwert Piezometer 3*

Tab. G.41: Bedingte Wahrscheinlichkeitstafel für den Knoten *Messwert Piezometer 3*

Piezometer 3		4,1 - 4,9	4,9 - 5,7	5,7 - 6,1	6,1 - 6,3	6,3 - 6,4
Druckhöhe [mWS]	$-\infty - 0$	Normalverteilung der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Piezometer 3 übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert				
	0 - 0,1					
	0,1 - 0,2					
	...					
	14,8 - 14,9					
	14,9 - 15,0					
	15,0 - ∞					
Piezometer 3		6,4 - 6,6	6,6 - 7,0	7,0 - 7,6	7,6 - 8,4	8,4 - 9,4
Druckhöhe [mWS]	$-\infty - 0$	Normalverteilung der Lageparameter μ wird aus dem Knoten Piezometer 3 übergeben der Skalierungsparameter $u^2(x_0)$ wird je nach Fragestellung definiert				
	0 - 0,1					
	0,1 - 0,2					
	...					
	14,8 - 14,9					
	14,9 - 15,0					
	15,0 - ∞					

H Diagramme der Auswertung der Bayesschen Netze

Die Erläuterungen zur Interpretation der Diagramme sind Abschnitt 8.1 auf S. 128 zu entnehmen.

Ergänzenden Erläuterungen zu den Diagrammen der Lote

Im Vergleich zum Sickerwasserabfluss oder den Piezometerdrücken, spielt bei den Loten der absolute Messwert keine wesentliche Rolle. Das zugrundeliegende Koordinatensystem wird in der Regel so festgelegt, dass die Messdaten im Jahresverlauf keinen Vorzeichenwechsel aufweisen und eine übersichtliche Darstellung in den Diagrammen möglich ist. Aus diesem Grund werden bei der Mauer ohne Untergrunddrainagen den Gewichtslotmessdaten aus den FE-Berechnungen 11,750 mm hinzuaddiert, so dass der repräsentative Messwert für den Normalzustand der idealisierten Mauer 10,000 mm beträgt. Analog dazu werden den Schwimmlothe messdaten 8,745 mm hinzuaddiert. Für die Mauer mit Untergrunddrainagen wird den Gewichtslotmessdaten 11,850 mm hinzuaddiert und den Schwimmlothe messdaten 8,745 mm.

H.1 Auswertung einer Einzelmessung

Mauer ohne Untergrunddrainage

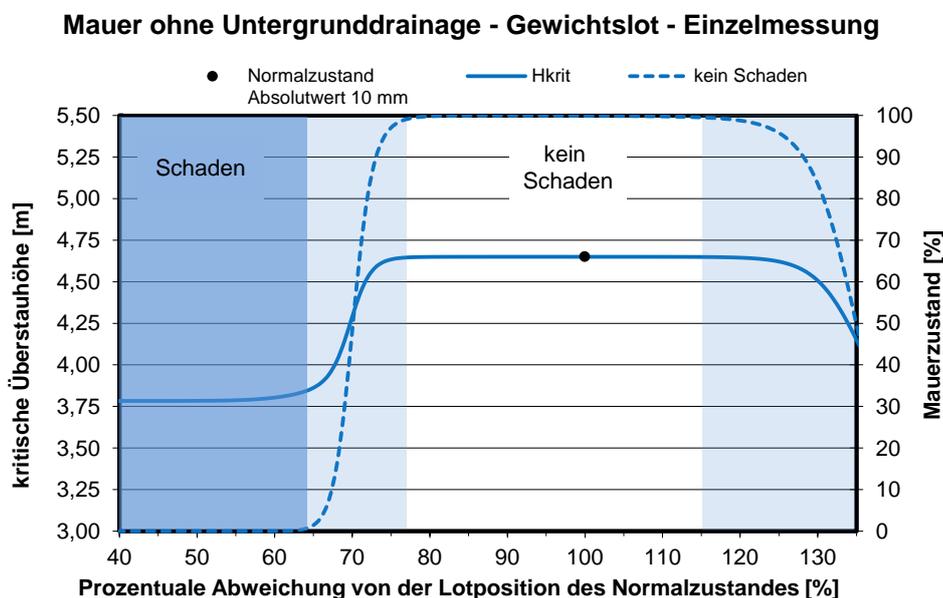


Abb. H.1: Netzauswertung einer einzelnen Gewichtslotmessung der Mauer ohne Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Krone gegenüber der Maueraufstandsfläche in Richtung Wasserseite.

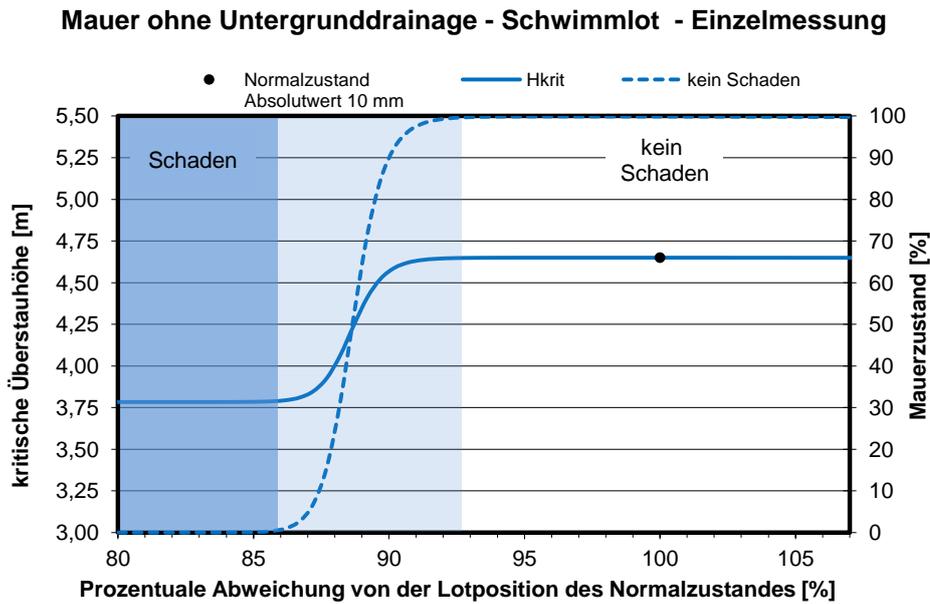


Abb. H.2: Netzauswertung einer einzelnen Schwimmlotmessung der Mauer ohne Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Maueraufstandsfläche gegenüber dem Felsuntergrund in Richtung Wasserseite.

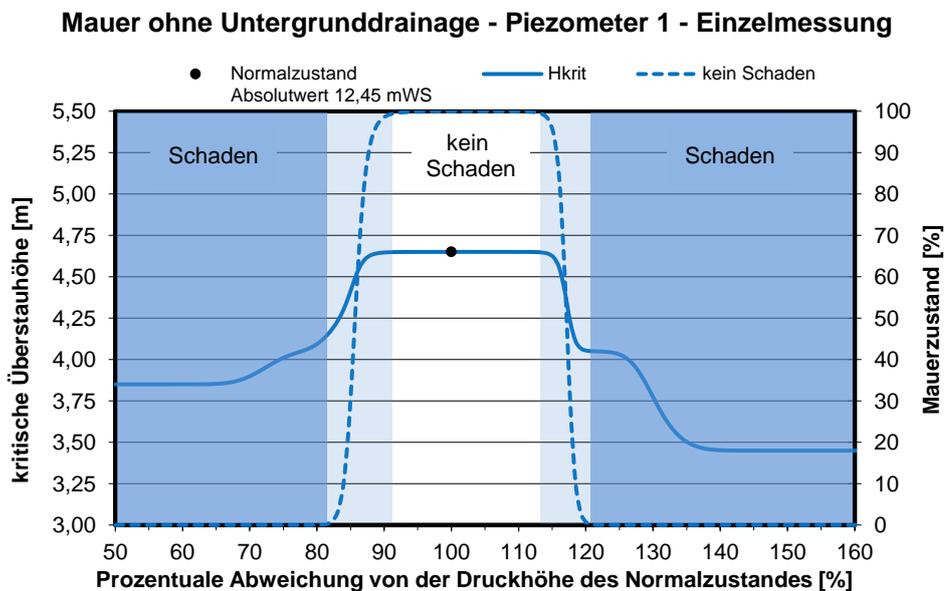


Abb. H.3: Netzauswertung einer Einzelmessung des Piezometers 1 der Mauer ohne Untergrunddrainage

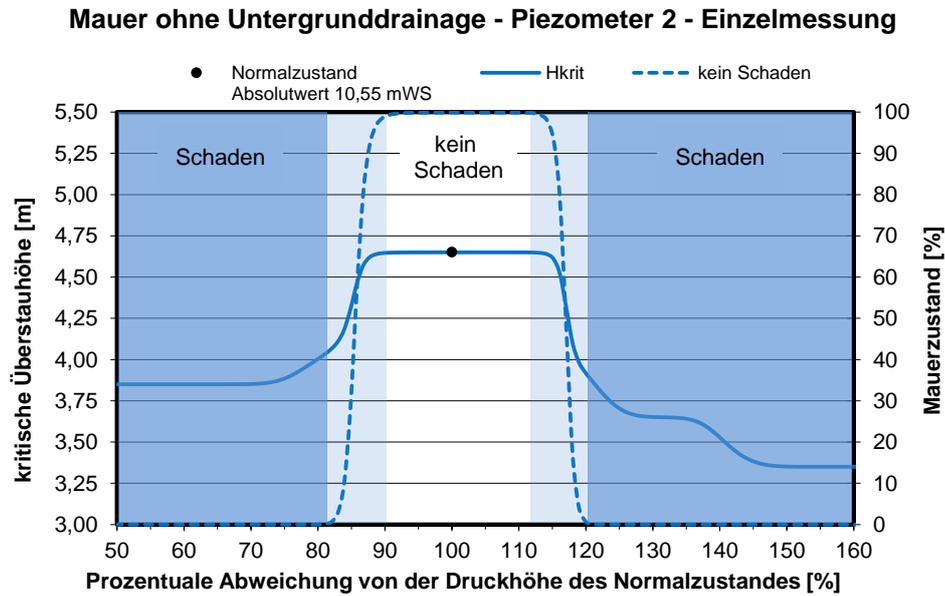


Abb. H.4: Netzauswertung einer Einzelmessung des Piezometers 2 der Mauer ohne Untergrunddrainage

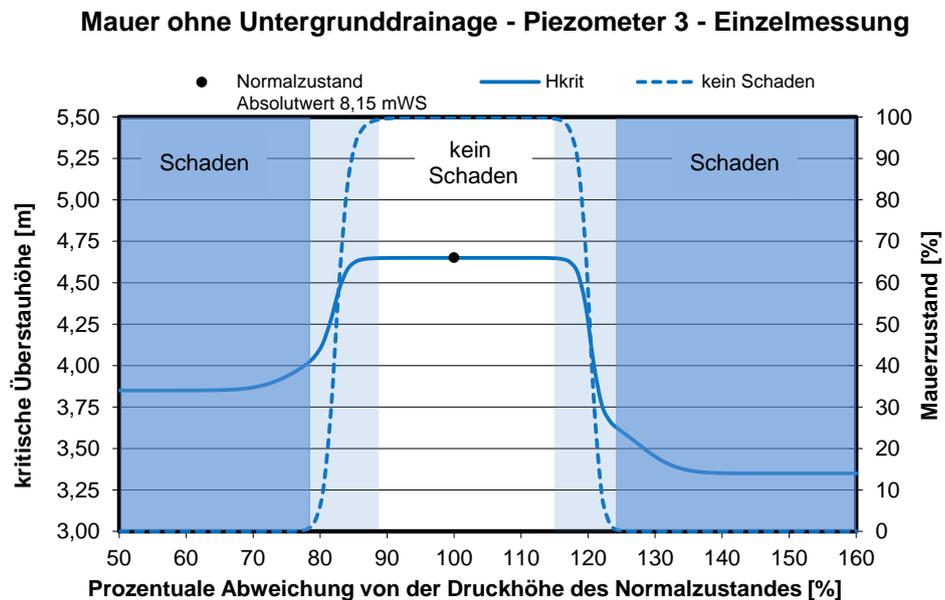


Abb. H.5: Netzauswertung einer Einzelmessung des Piezometers 3 der Mauer ohne Untergrunddrainage

Mauer mit Untergrunddrainage

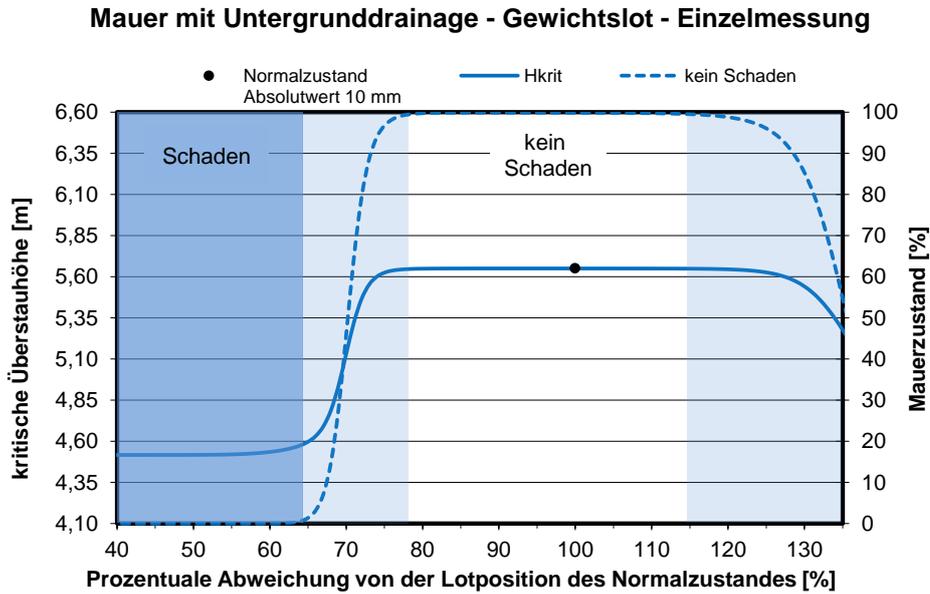


Abb. H.6: Netzauswertung einer einzelnen Gewichtslotmessung der Mauer mit Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Krone gegenüber der Maueraufstandsfläche in Richtung Wasserseite.

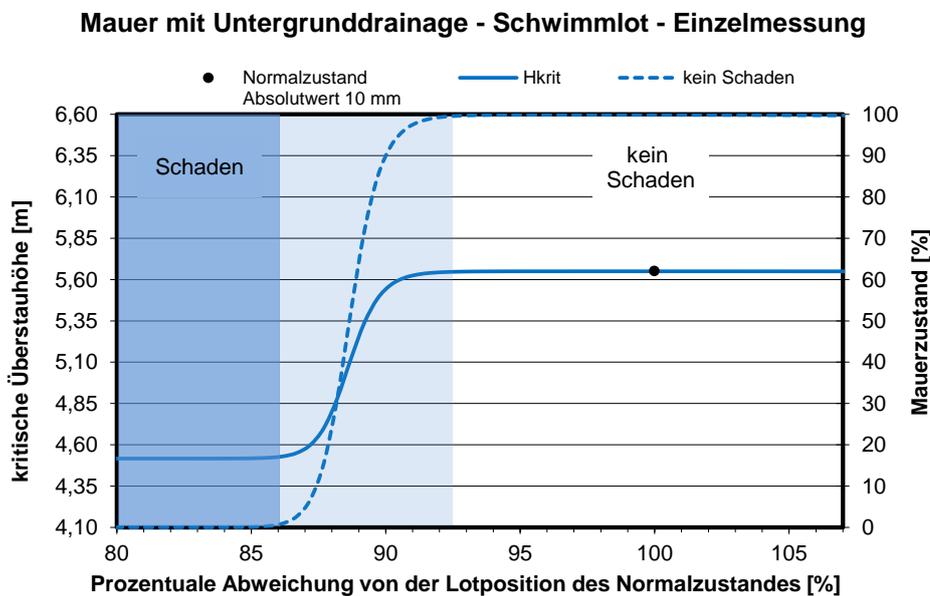


Abb. H.7: Netzauswertung einer einzelnen Schwimmlotmessung der Mauer mit Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Maueraufstandsfläche gegenüber dem Felsuntergrund in Richtung Wasserseite.

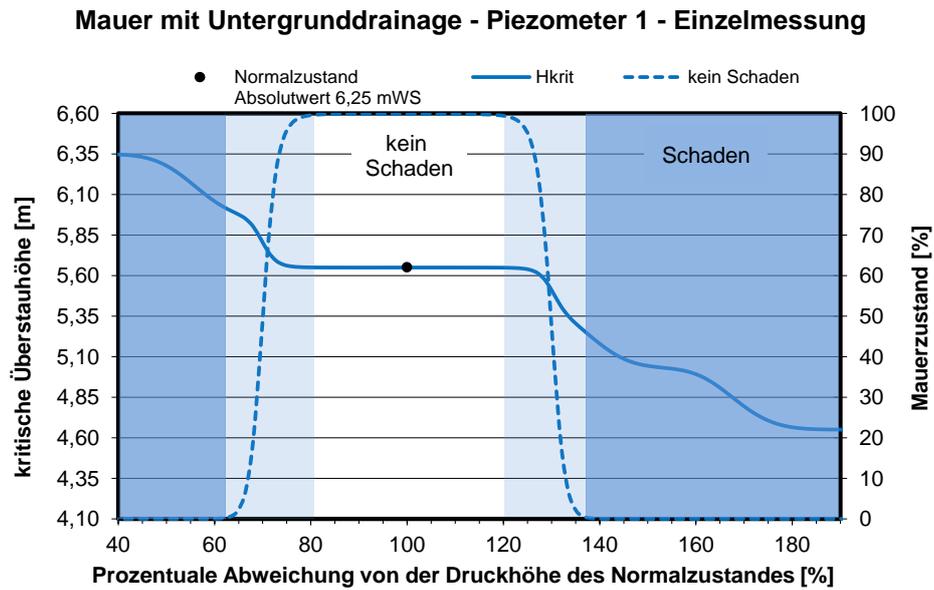


Abb. H.8: Netzauswertung einer Einzelmessung des Piezometers 1 der Mauer mit Untergrunddrainage

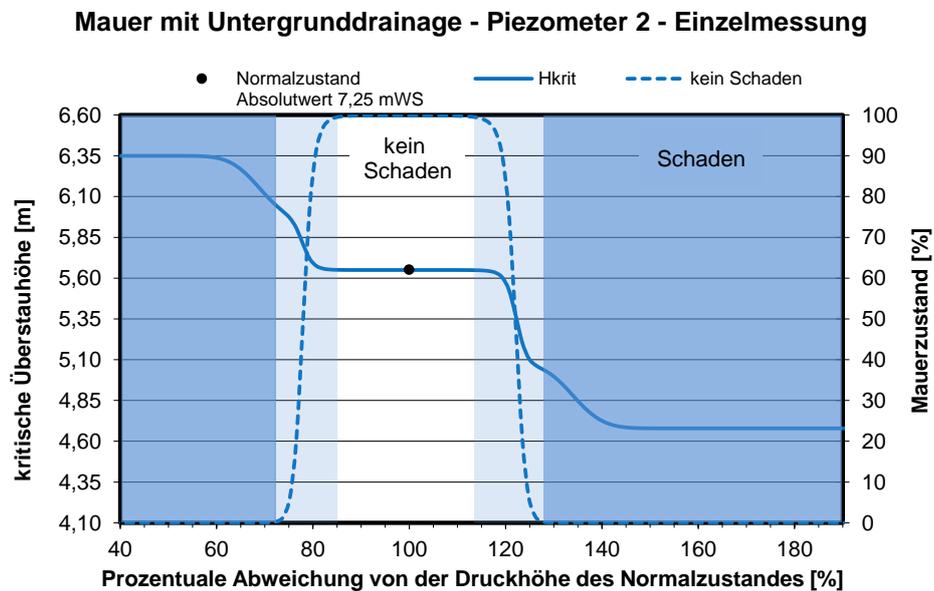


Abb. H.9: Netzauswertung einer Einzelmessung des Piezometers 2 der Mauer mit Untergrunddrainage

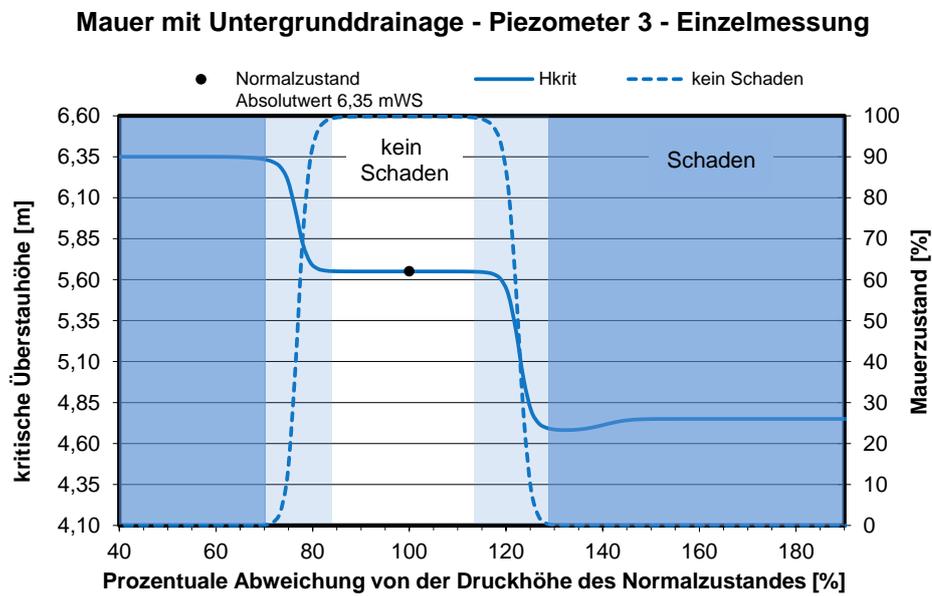


Abb. H.10: Netzauswertung einer Einzelmessung des Piezometers 3 der Mauer mit Untergrunddrainage

H.2 Auswertung längerer Zeitreihen

Mauer ohne Untergrunddrainage

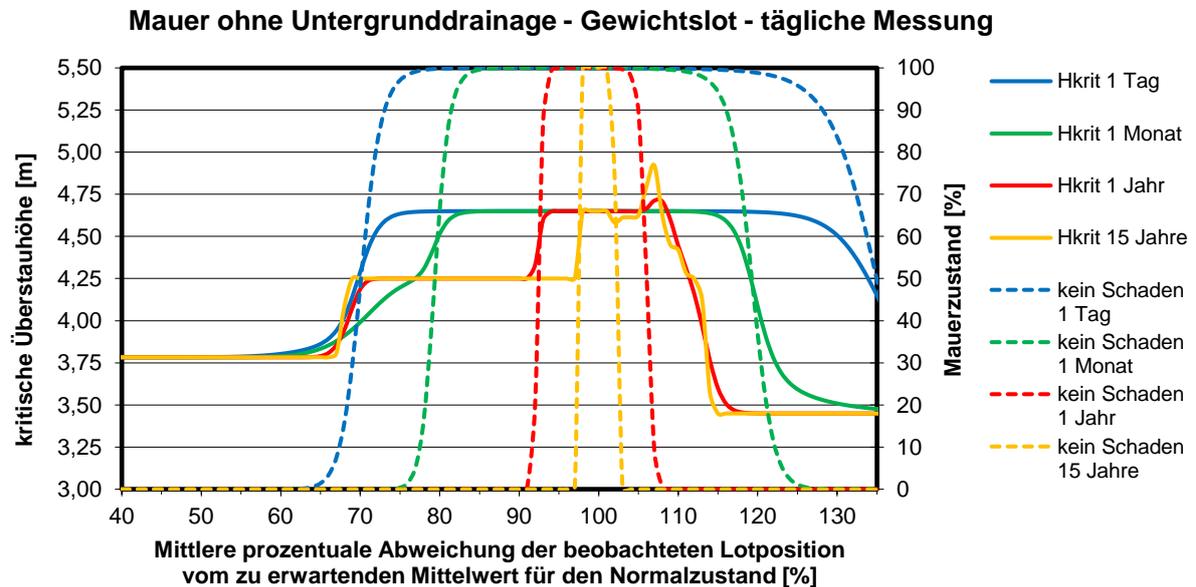


Abb. H.11: Netzauswertung von unterschiedlich langen Zeitreihen täglicher Messwerte des Gewichtslotes der Mauer ohne Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Krone gegenüber der Maueraufstandsfläche in Richtung Wasserseite.

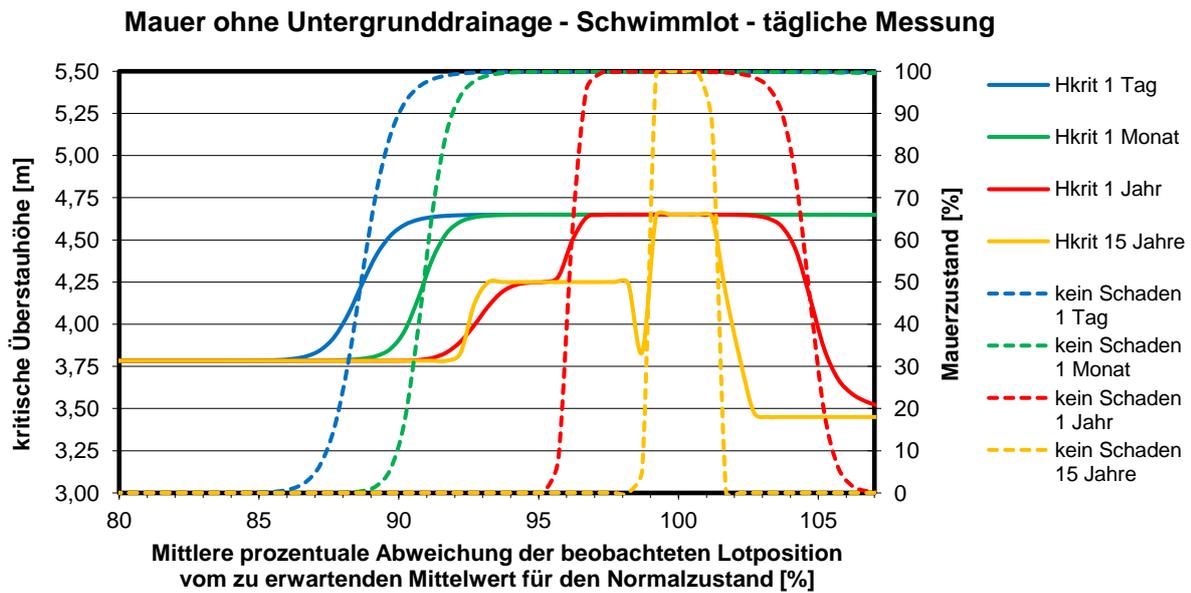


Abb. H.12: Netzauswertung von unterschiedlich langen Zeitreihen täglicher Messwerte des Schwimmlotes der Mauer ohne Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Maueraufstandsfläche gegenüber dem Felsuntergrund in Richtung Wasserseite.

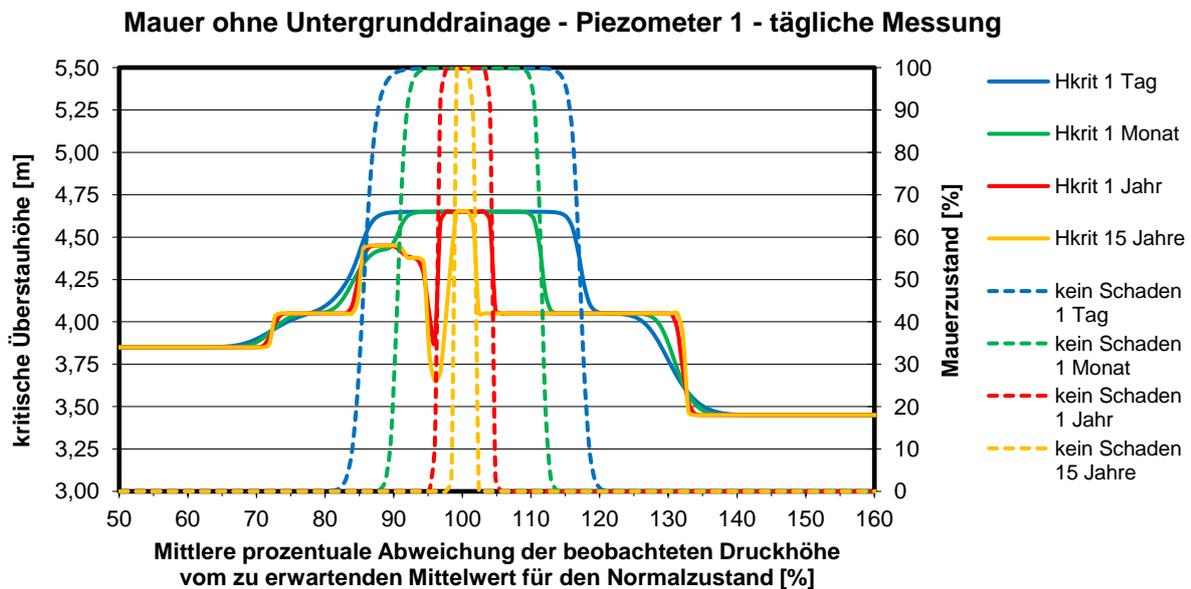


Abb. H.13: Netzauswertung von unterschiedlich langen Zeitreihen täglicher Messwerte des Piezometers 1 der Mauer ohne Untergrunddrainage

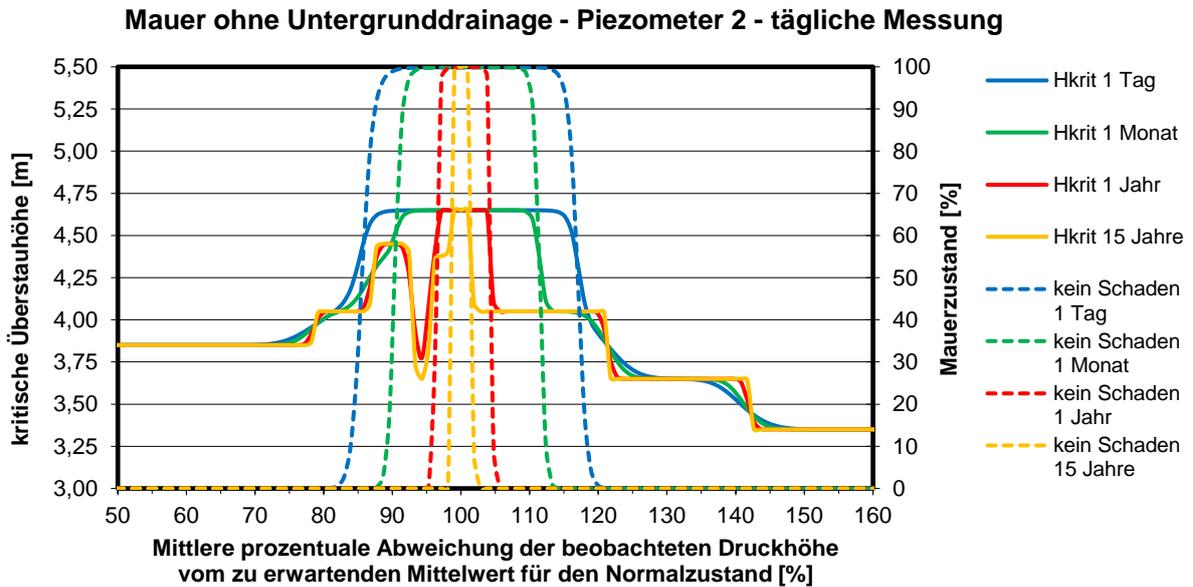


Abb. H.14: Netzauswertung von unterschiedlich langen Zeitreihen täglicher Messwerte des Piezometers 2 der Mauer ohne Untergrunddrainage

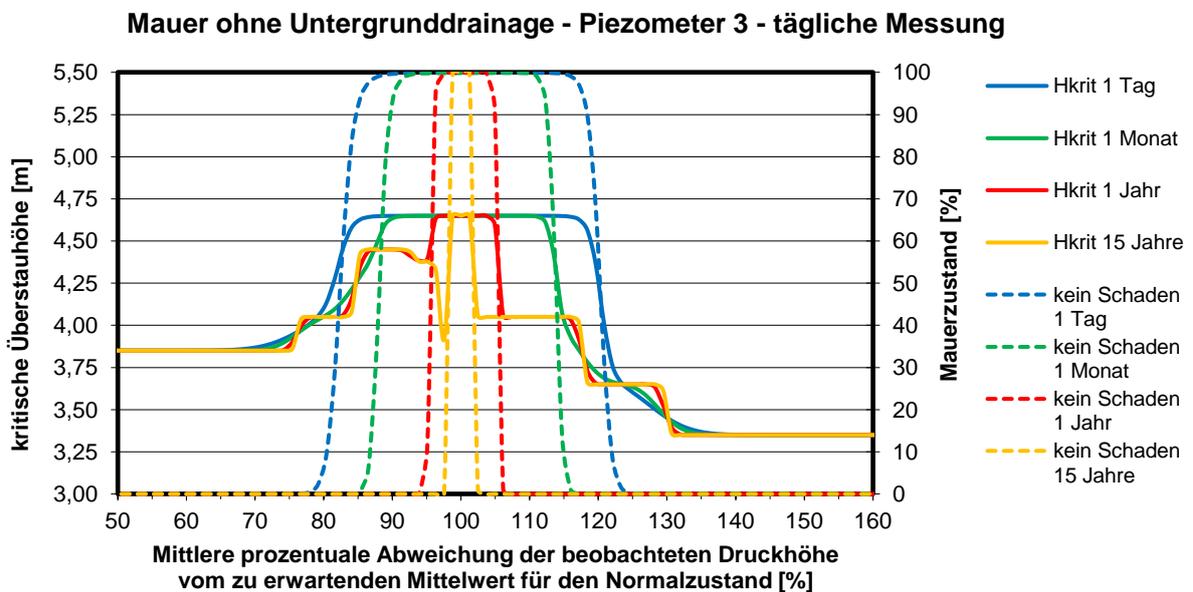


Abb. H.15: Netzauswertung von unterschiedlich langen Zeitreihen täglicher Messwerte des Piezometers 3 der Mauer ohne Untergrunddrainage

Mauer mit Untergrunddrainage

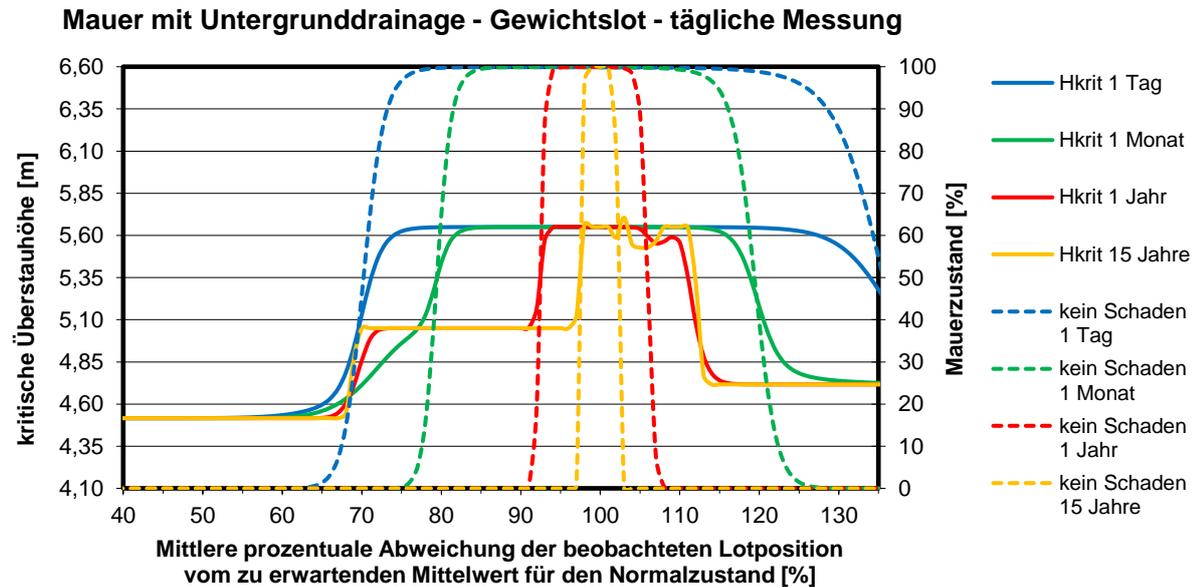


Abb. H.16: Netzauswertung von unterschiedlich langen Zeitreihen täglicher Messwerte des Gewichtslotes der Mauer mit Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Krone gegenüber der Maueraufstandsfläche in Richtung Wasserseite.

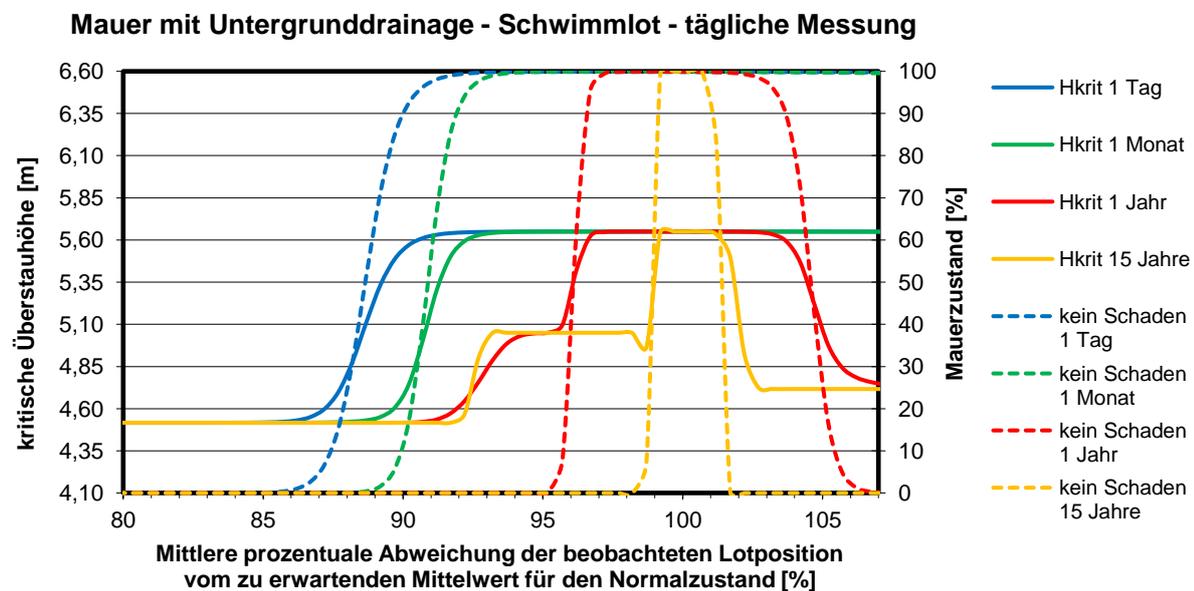


Abb. H.17: Netzauswertung von unterschiedlich langen Zeitreihen täglicher Messwerte des Schwimmlotes der Mauer mit Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Maueraufstandsfläche gegenüber dem Felsuntergrund in Richtung Wasserseite.

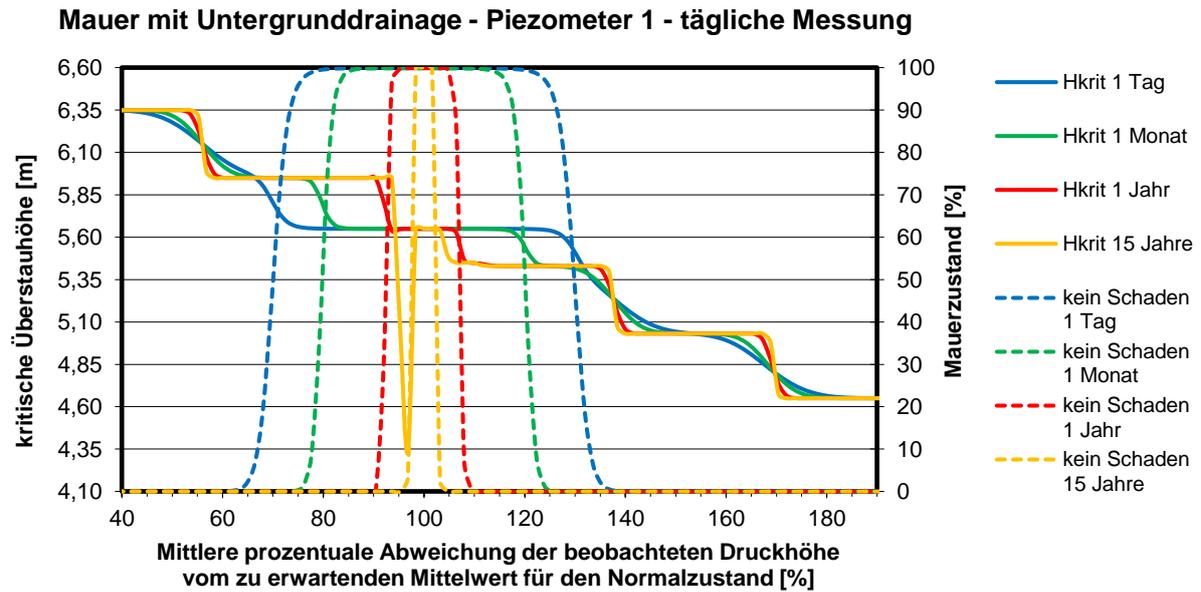


Abb. H.18: Netzauswertung von unterschiedlich langen Zeitreihen täglicher Messwerte des Piezometers 1 der Mauer mit Untergrunddrainage

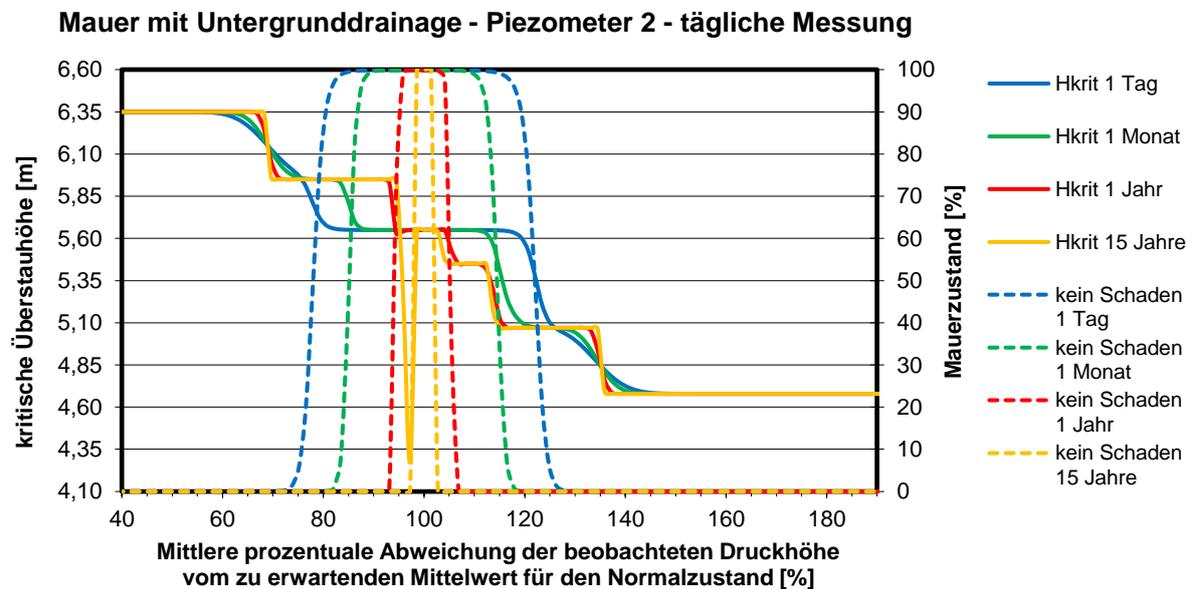


Abb. H.19: Netzauswertung von unterschiedlich langen Zeitreihen täglicher Messwerte des Piezometers 2 der Mauer mit Untergrunddrainage

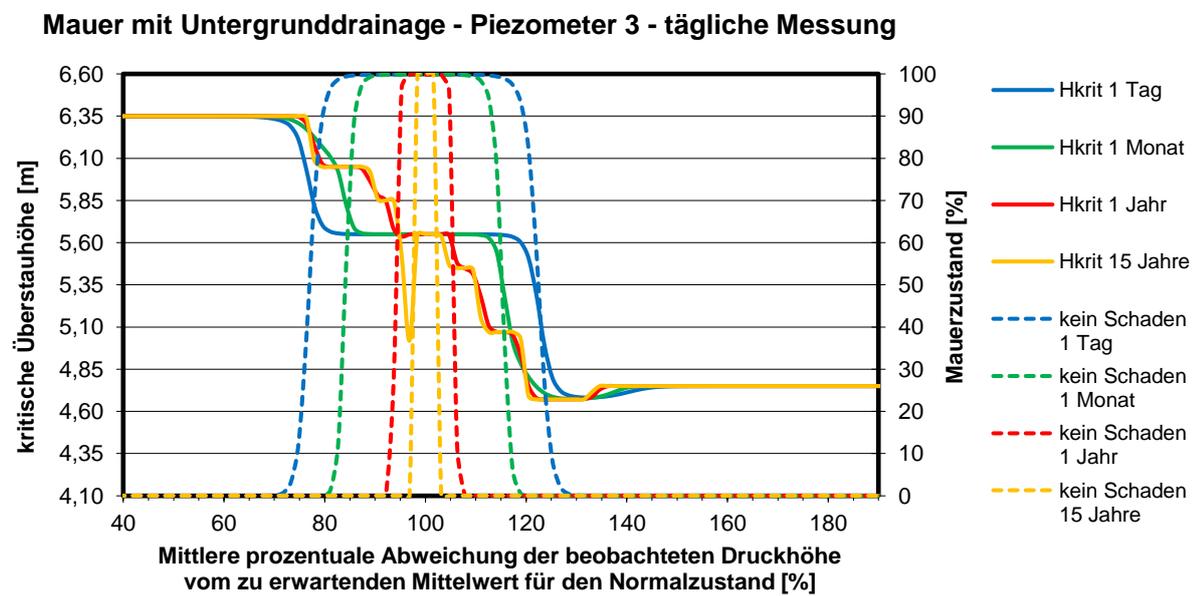


Abb. H.20: Netzauswertung von unterschiedlich langen Zeitreihen täglicher Messwerte des Piezometers 3 der Mauer mit Untergrunddrainage

H.3 Auswertung mit unterschiedlichen Messintervallen

Mauer ohne Untergrunddrainage

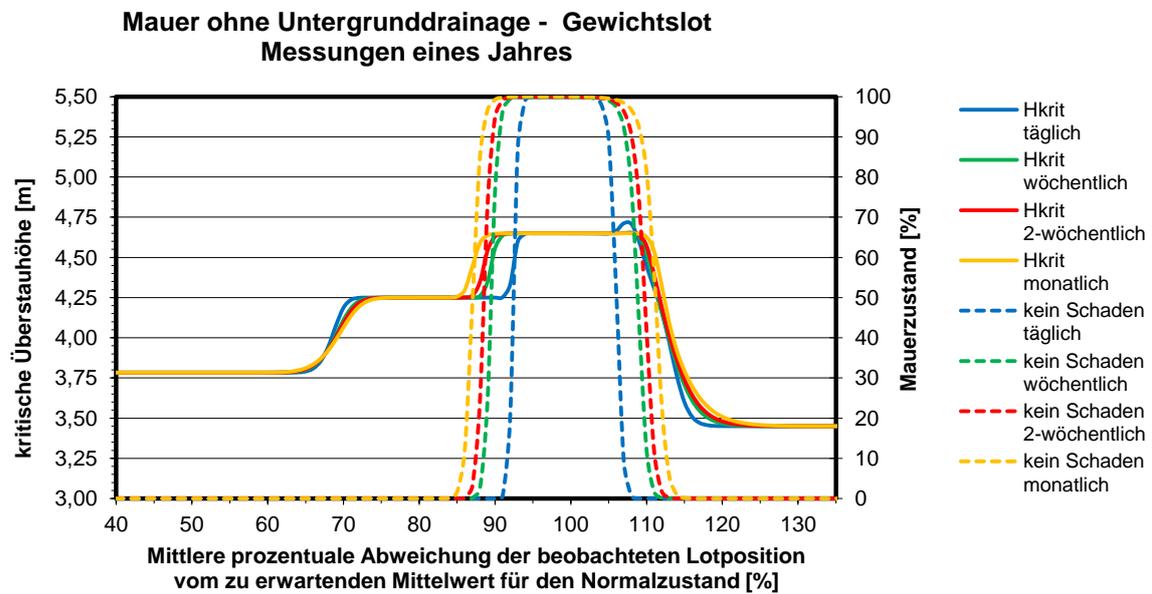


Abb. H.21: Netzauswertung von Gewichtslotmessdaten eines Jahres mit unterschiedlichen Messintervallen der Mauer ohne Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Krone gegenüber der Maueraufstandsfläche in Richtung Wasserseite.

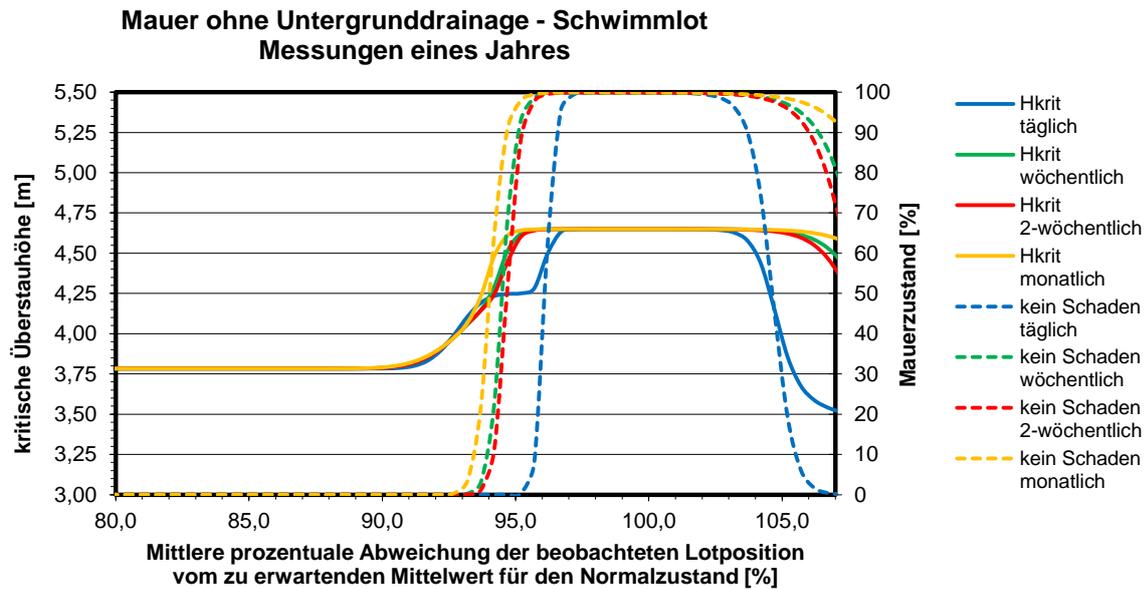


Abb. H.22: Netzauswertung von Schwimmlotmessdaten eines Jahres mit unterschiedlichen Messintervallen der Mauer ohne Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Maueraufstandsfläche gegenüber dem Felsuntergrund in Richtung Wasserseite.

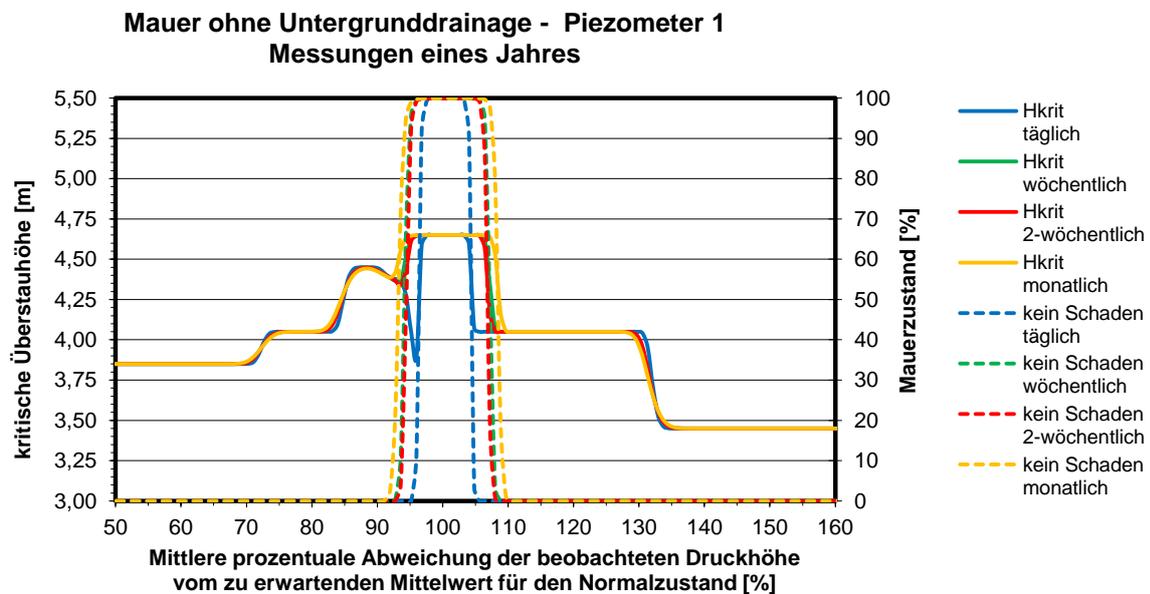


Abb. H.23: Netzauswertung von Messdaten des Piezometers 1 eines Jahres mit unterschiedlichen Messintervallen der Mauer ohne Untergrunddrainage

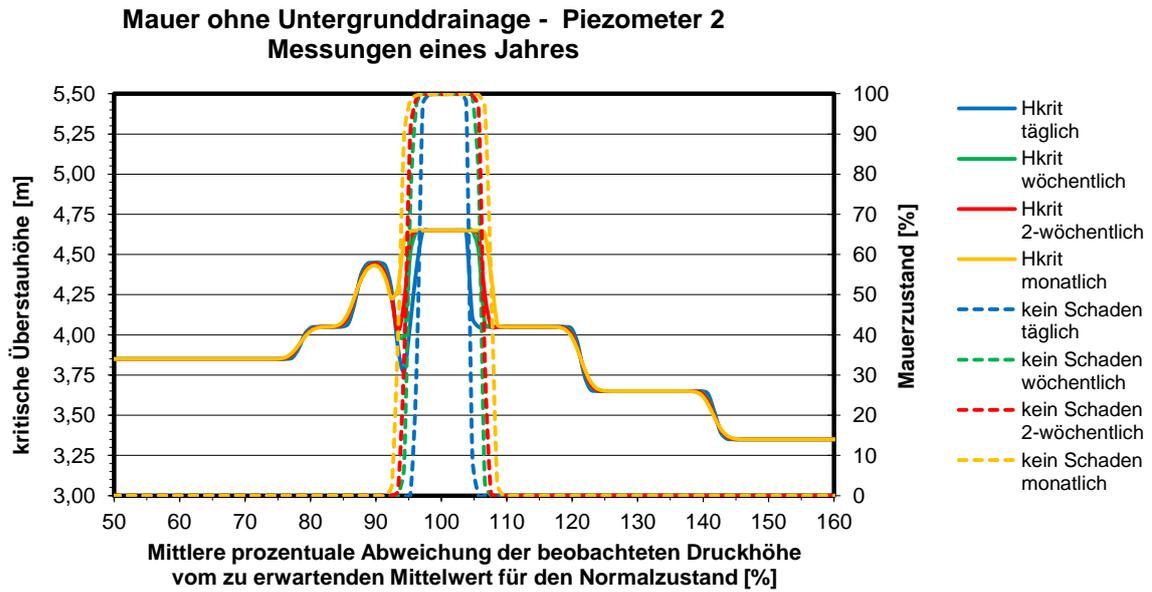


Abb. H.24: Netzauswertung von Messdaten des Piezometers 2 eines Jahres mit unterschiedlichen Messintervallen der Mauer ohne Untergrunddrainage

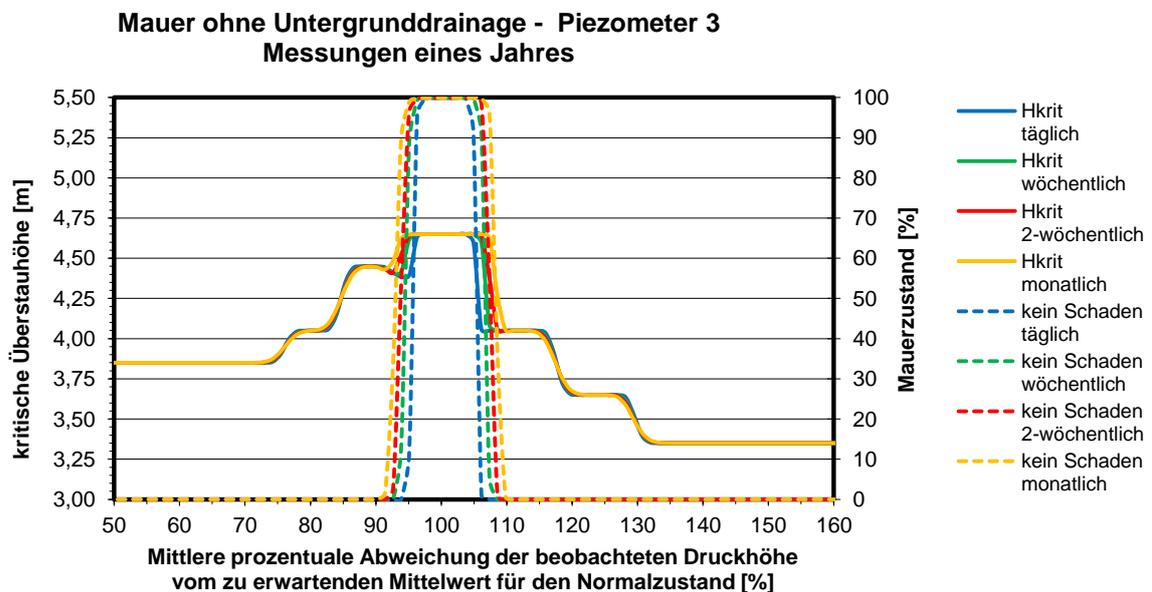


Abb. H.25: Netzauswertung von Messdaten des Piezometers 3 eines Jahres mit unterschiedlichen Messintervallen der Mauer ohne Untergrunddrainage

Mauer mit Untergrunddrainage

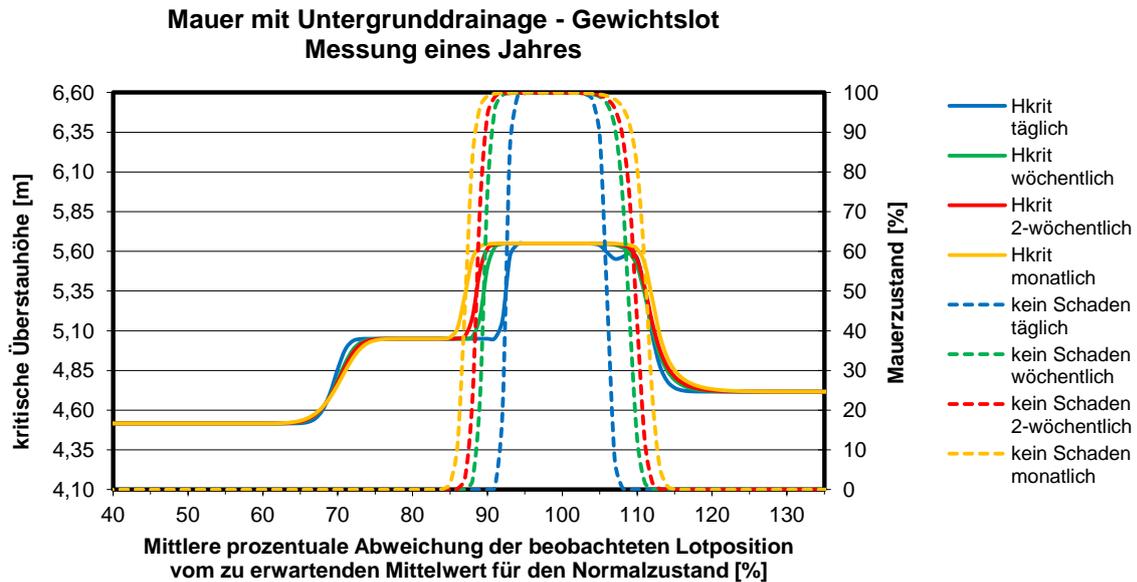


Abb. H.26: Netzauswertung von Gewichtslotmessdaten eines Jahres mit unterschiedlichen Messintervallen der Mauer mit Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Krone gegenüber der Maueraufstandsfläche in Richtung Wasserseite.

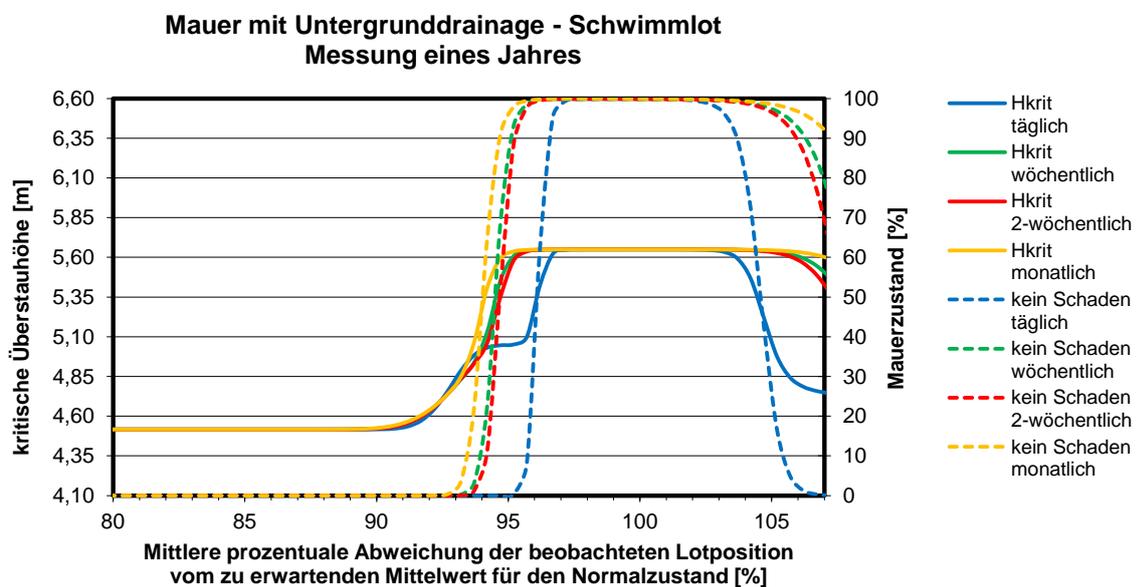


Abb. H.27: Netzauswertung von Schwimmplotmessdaten eines Jahres mit unterschiedlichen Messintervallen der Mauer mit Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Maueraufstandsfläche gegenüber dem Felsuntergrund in Richtung Wasserseite.

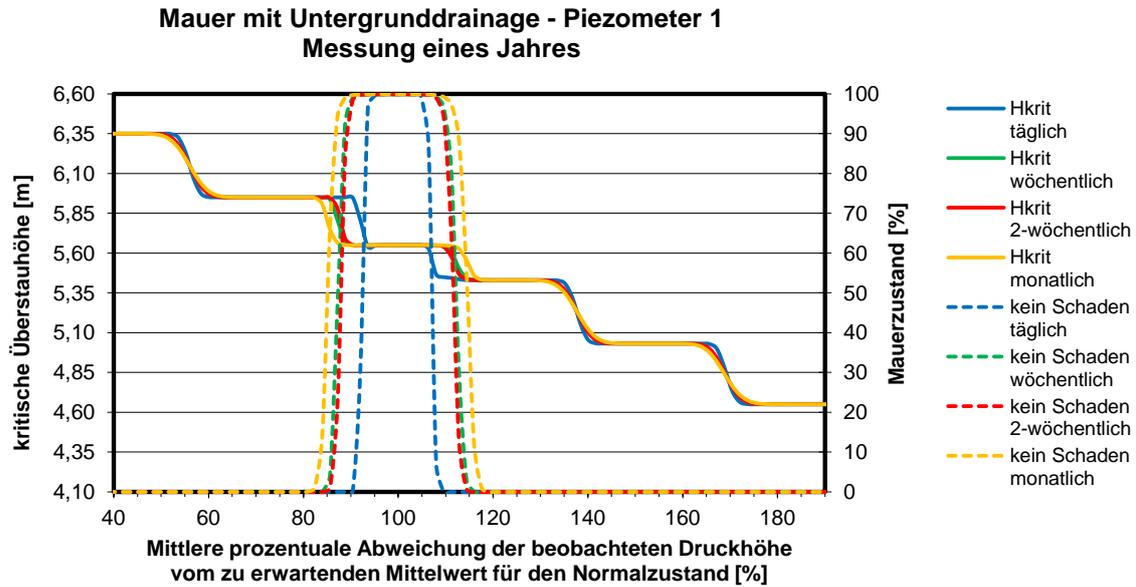


Abb. H.28: Netzauswertung von Messdaten des Piezometers 1 eines Jahres mit unterschiedlichen Messintervallen der Mauer mit Untergrunddrainage

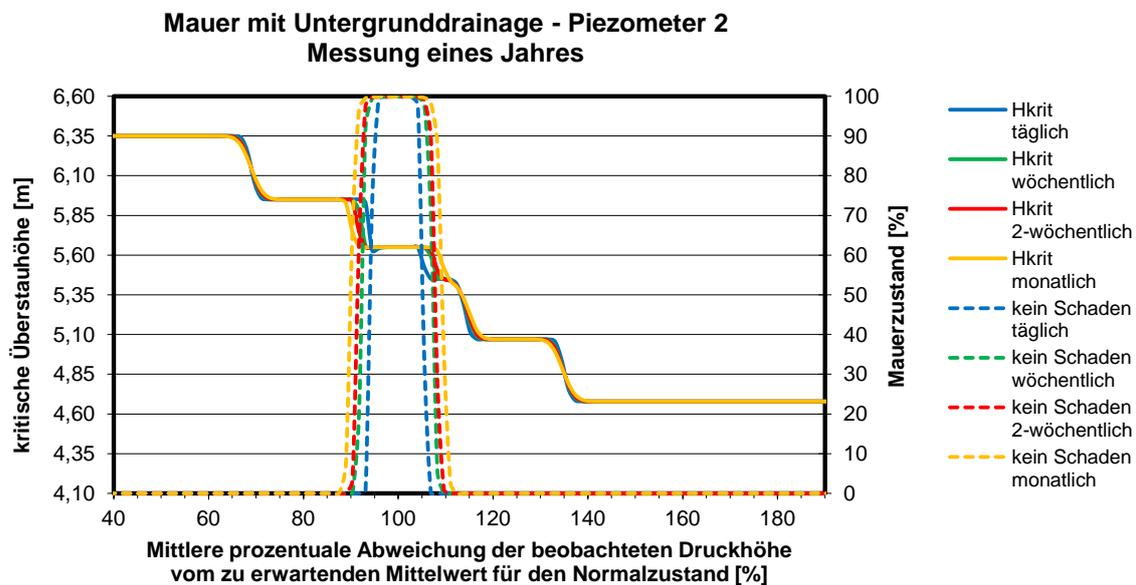


Abb. H.29: Netzauswertung von Messdaten des Piezometers 2 eines Jahres mit unterschiedlichen Messintervallen der Mauer mit Untergrunddrainage

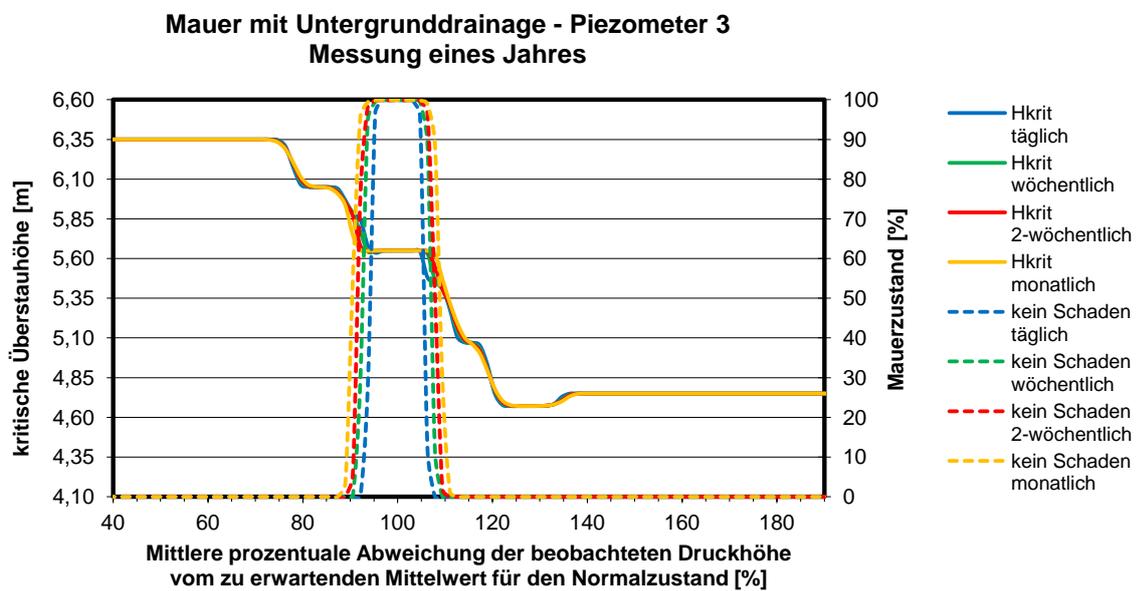


Abb. H.30: Netzauswertung von Messdaten des Piezometers 3 eines Jahres mit unterschiedlichen Messintervallen der Mauer mit Untergrunddrainage

H.4 Zusammenhang zwischen Messwert und Schadenstyp

Mauer ohne Untergrunddrainage

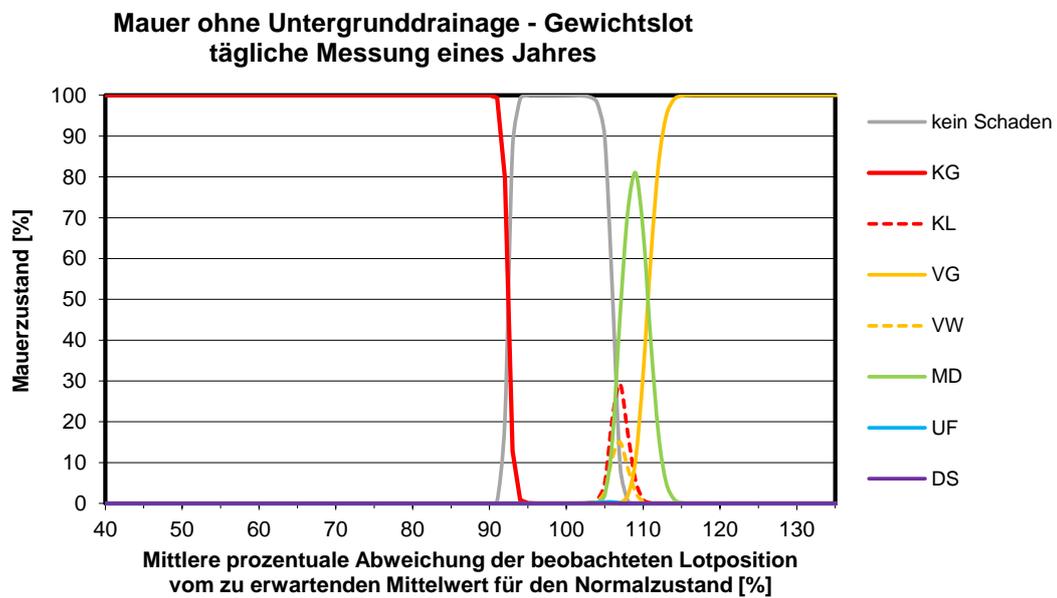


Abb. H.31: Netzauswertung von täglichen Gewichtslotmessdaten eines Jahres in Bezug auf mögliche Talsperrenschädigungen der Mauer ohne Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Krone gegenüber der Maueraufstandsfläche in Richtung Wasserseite.

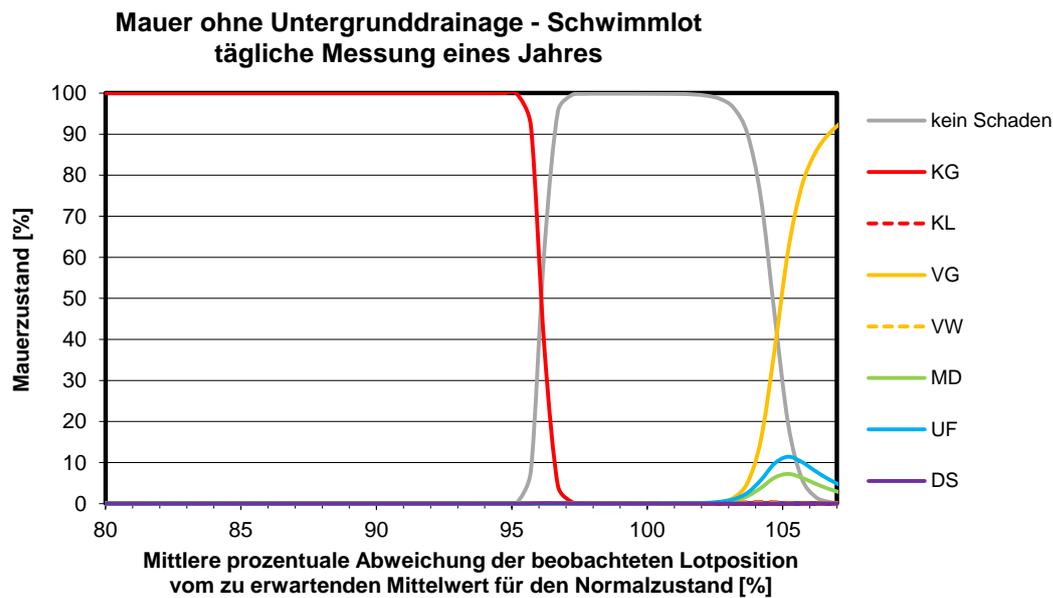


Abb. H.32: Netzauswertung von täglichen Schwimmlotmessdaten eines Jahres in Bezug auf mögliche Talsperrenschädigungen der Mauer ohne Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Maueraufstandsfläche gegenüber dem Felsuntergrund in Richtung Wasserseite.

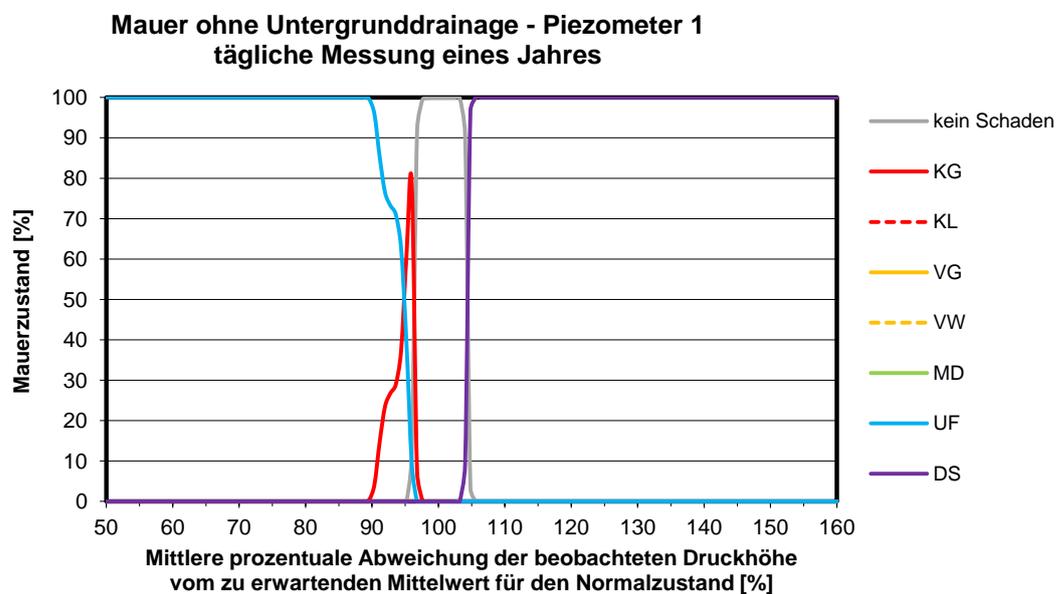


Abb. H.33: Netzauswertung von täglichen Messdaten des Piezometers 1 eines Jahres in Bezug auf mögliche Talsperrenschädigungen der Mauer ohne Untergrunddrainage

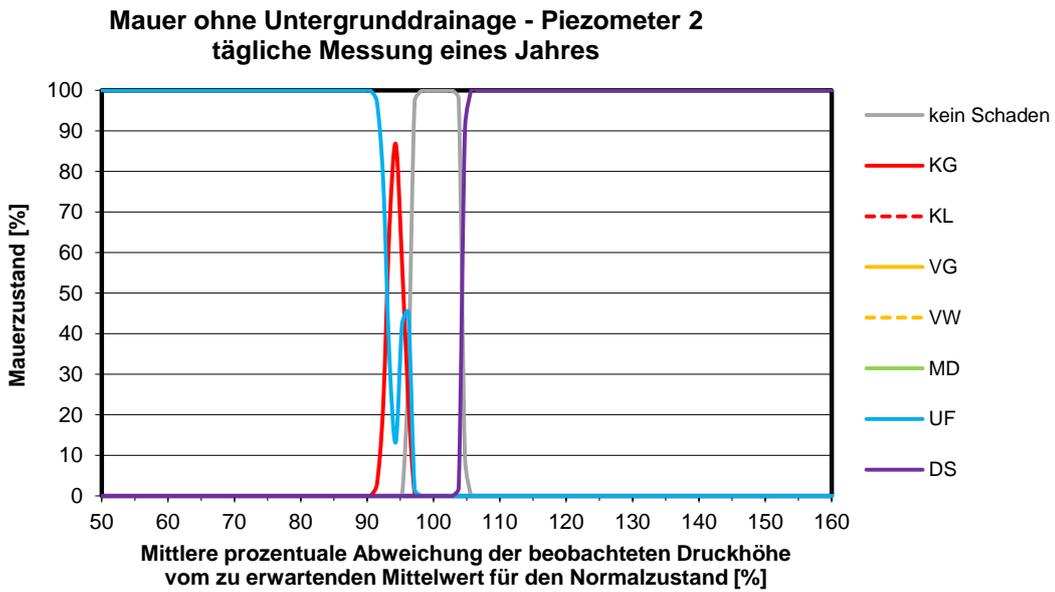


Abb. H.34: Netzauswertung von täglichen Messdaten des Piezometers 2 eines Jahres in Bezug auf mögliche Talsperrenschädigungen der Mauer ohne Untergrunddrainage

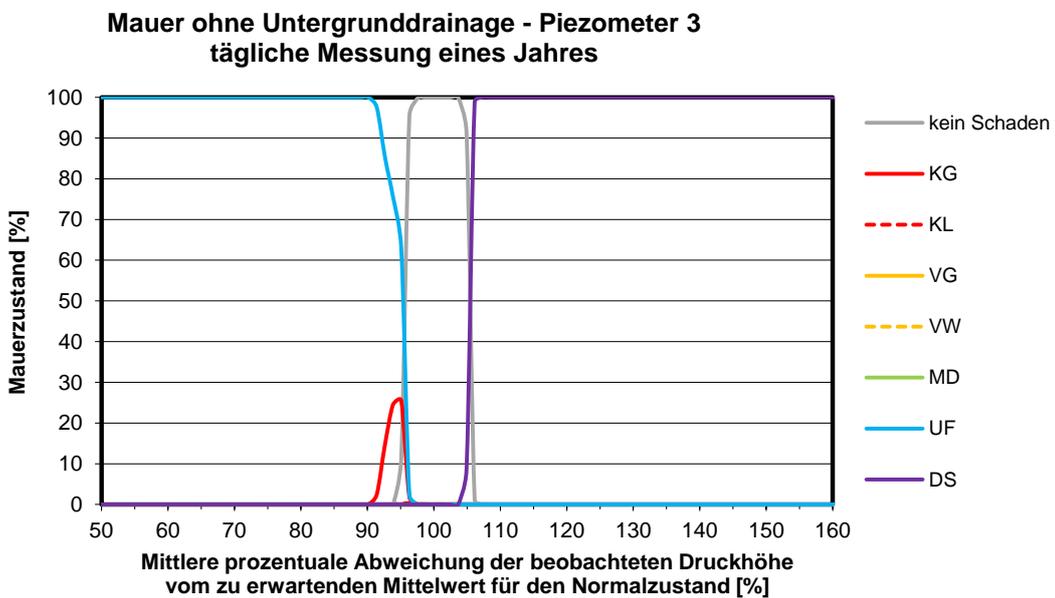


Abb. H.35: Netzauswertung von täglichen Messdaten des Piezometers 3 eines Jahres in Bezug auf mögliche Talsperrenschädigungen der Mauer ohne Untergrunddrainage

Mauer mit Untergrunddrainage

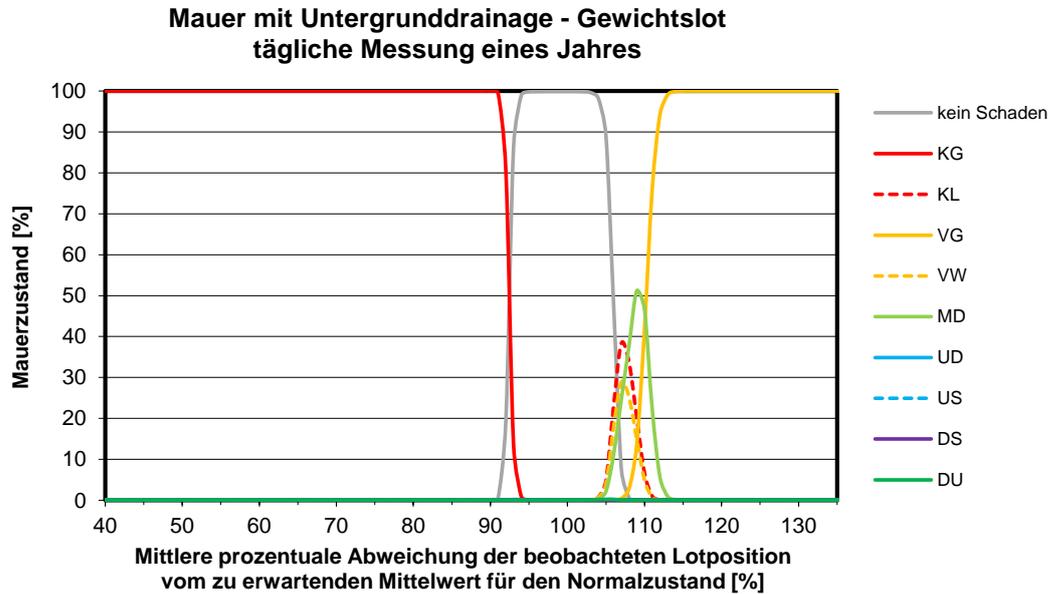


Abb. H.36: Netzauswertung von täglichen Gewichtslotmessdaten eines Jahres in Bezug auf mögliche Talsperrenschädigungen der Mauer mit Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Krone gegenüber der Maueraufstandsfläche in Richtung Wasserseite.

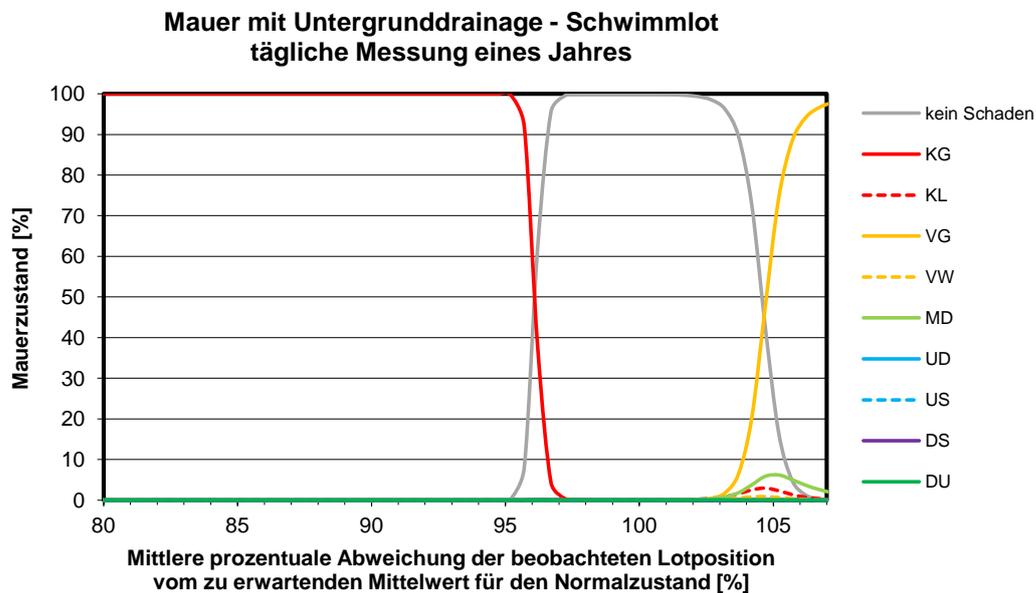


Abb. H.37: Netzauswertung von täglichen Schwimmlotmessdaten eines Jahres in Bezug auf mögliche Talsperrenschädigungen der Mauer mit Untergrunddrainage. Je kleiner der Wert der Lotbewegung ist, desto stärker bewegt sich die Maueraufstandsfläche gegenüber dem Felsuntergrund in Richtung Wasserseite.

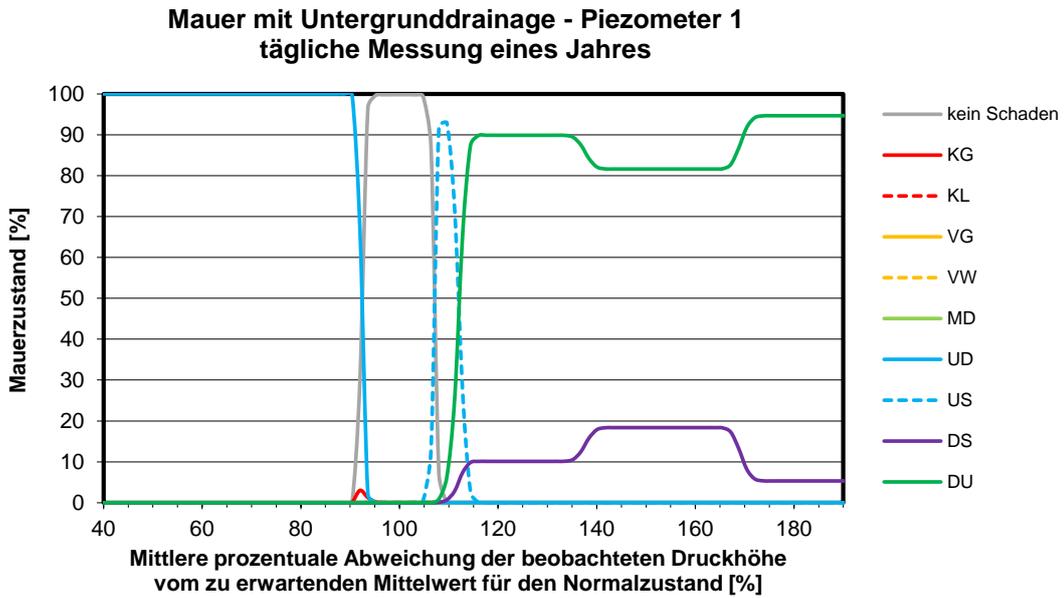


Abb. H.38: Netzauswertung von täglichen Messdaten des Piezometers 1 eines Jahres in Bezug auf mögliche Talsperrenschädigungen der Mauer mit Untergrunddrainage

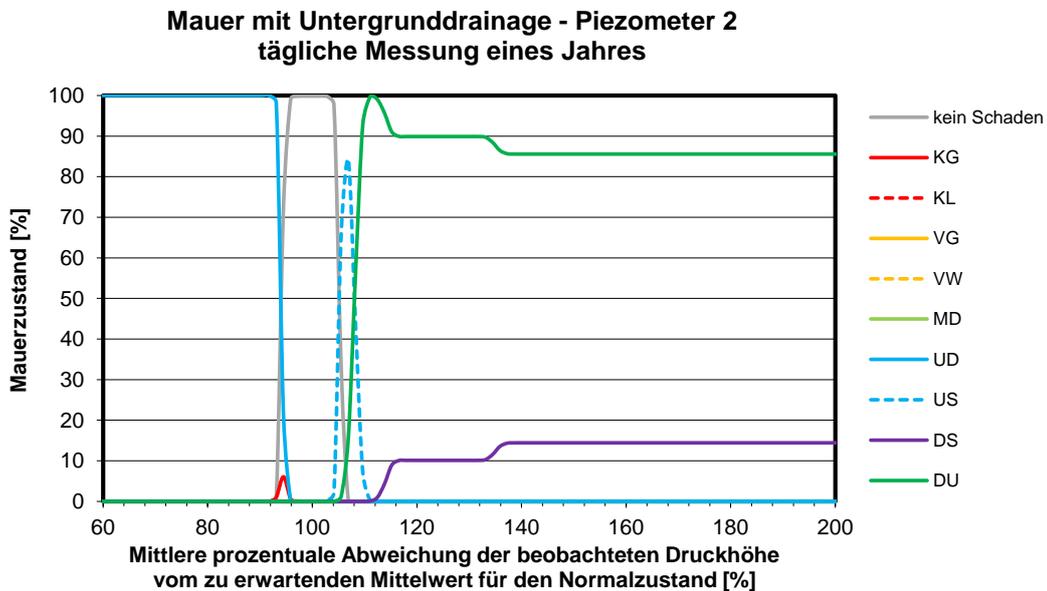


Abb. H.39: Netzauswertung von täglichen Messdaten des Piezometers 2 eines Jahres in Bezug auf mögliche Talsperrenschädigungen der Mauer mit Untergrunddrainage

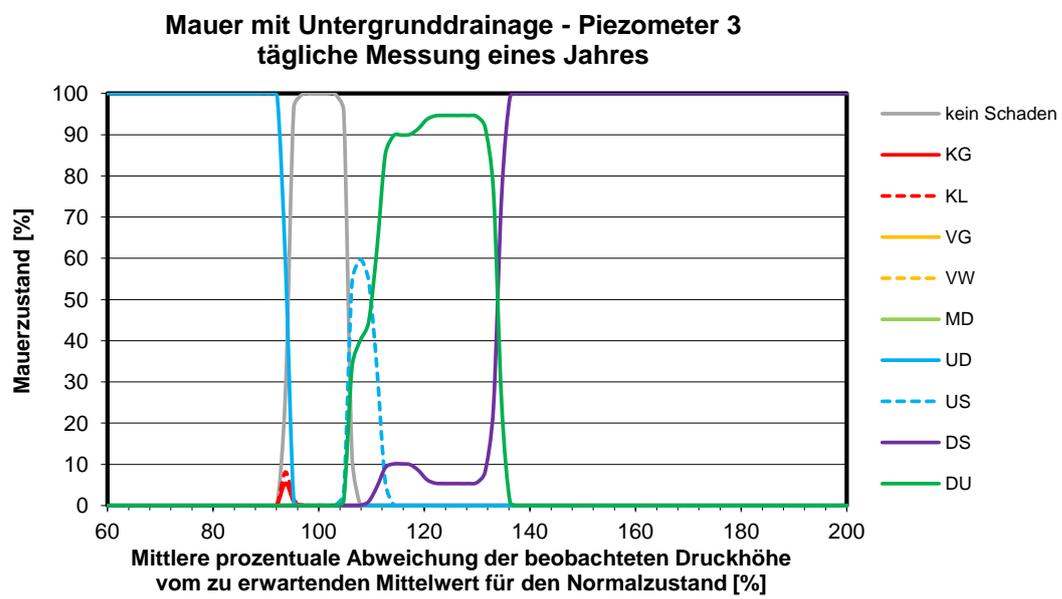


Abb. H.40: Netzauswertung von täglichen Messdaten des Piezometers 3 eines Jahres in Bezug auf mögliche Talsperrenschädigungen der Mauer mit Untergrunddrainage

Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 61
70569 Stuttgart (Vaihingen)
Telefon (0711) 685 - 64717/64749/64752/64679
Telefax (0711) 685 - 67020 o. 64746 o. 64681
E-Mail: iws@iws.uni-stuttgart.de
<http://www.iws.uni-stuttgart.de>

Direktoren

Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy
Prof. Dr.-Ing. Rainer Helmig
Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Nowak

Vorstand (Stand 1.3.2017)

Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. A. Bárdossy
Prof. Dr.-Ing. R. Helmig
Prof. Dr.-Ing. S. Wieprecht
Prof. Dr. J.A. Sander Huisman
Jürgen Braun, PhD
apl. Prof. Dr.-Ing. H. Class
Dr.-Ing. H.-P. Koschitzky
Dr.-Ing. M. Noack
Prof. Dr.-Ing. W. Nowak
Dr. rer. nat. J. Seidel
Dr.-Ing. K. Terheiden
Dr.-Ing. habil. Sergey Oladyshkin

Emeriti

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Jürgen Giesecke
Prof. Dr.h.c. Dr.-Ing. E.h. Helmut Kobus, PhD

Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft

Leiter: Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht
Stellv.: Dr.-Ing. Kristina Terheiden
Versuchsanstalt für Wasserbau
Leiter: Dr.-Ing. Markus Noack

Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung

Leiter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Helmig
Stellv.: apl. Prof. Dr.-Ing. Holger Class

Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie

Leiter: Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy
Stellv.: Dr. rer. nat. Jochen Seidel
Hydrogeophysik der Vadosen Zone
(mit Forschungszentrum Jülich)
Leiter: Prof. Dr. J.A. Sander Huisman

Lehrstuhl für Stochastische Simulation und Sicherheitsforschung für Hydrosysteme

Leiter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Nowak
Stellv.: Dr.-Ing. habil. Sergey Oladyshkin

VEGAS, Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung

Leitung: Jürgen Braun, PhD, AD
Dr.-Ing. Hans-Peter Koschitzky, AD

Verzeichnis der Mitteilungshefte

- 1 Röhnisch, Arthur: *Die Bemühungen um eine Wasserbauliche Versuchsanstalt an der Technischen Hochschule Stuttgart*, und Fattah Abouleid, Abdel: *Beitrag zur Berechnung einer in lockeren Sand gerammten, zweifach verankerten Spundwand*, 1963
- 2 Marotz, Günter: *Beitrag zur Frage der Standfestigkeit von dichten Asphaltbelägen im Großwasserbau*, 1964
- 3 Gurr, Siegfried: *Beitrag zur Berechnung zusammengesetzter ebener Flächentragwerke unter besonderer Berücksichtigung ebener Stauwände, mit Hilfe von Randwert- und Lastwertmatrizen*, 1965
- 4 Plica, Peter: *Ein Beitrag zur Anwendung von Schalenkonstruktionen im Stahlwasserbau*, und Petrikat, Kurt: *Möglichkeiten und Grenzen des wasserbaulichen Versuchswesens*, 1966

- 5 Plate, Erich: *Beitrag zur Bestimmung der Windgeschwindigkeitsverteilung in der durch eine Wand gestörten bodennahen Luftschicht*, und
Röhnisch, Arthur; Marotz, Günter: *Neue Baustoffe und Bauausführungen für den Schutz der Böschungen und der Sohle von Kanälen, Flüssen und Häfen; Gestehungskosten und jeweilige Vorteile*, sowie
Unny, T.E.: *Schwingungsuntersuchungen am Kegelstrahlschieber*, 1967
- 6 Seiler, Erich: *Die Ermittlung des Anlagenwertes der bundeseigenen Binnenschiffahrtsstraßen und Talsperren und des Anteils der Binnenschiffahrt an diesem Wert*, 1967
- 7 *Sonderheft anlässlich des 65. Geburtstages von Prof. Arthur Röhnisch mit Beiträgen von*
Benk, Dieter; Breitling, J.; Gurr, Siegfried; Haberhauer, Robert; Honekamp, Hermann; Kuz, Klaus Dieter; Marotz, Günter; Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg; Miller, Rudolf; Plate, Erich J.; Radomski, Helge; Schwarz, Helmut; Vollmer, Ernst; Wildenhahn, Eberhard; 1967
- 8 Jumikis, Alfred: *Beitrag zur experimentellen Untersuchung des Wassernachschubs in einem gefrierenden Boden und die Beurteilung der Ergebnisse*, 1968
- 9 Marotz, Günter: *Technische Grundlagen einer Wasserspeicherung im natürlichen Untergrund*, 1968
- 10 Radomski, Helge: *Untersuchungen über den Einfluß der Querschnittsform wellenförmiger Spundwände auf die statischen und rammtechnischen Eigenschaften*, 1968
- 11 Schwarz, Helmut: *Die Grenztragfähigkeit des Baugrundes bei Einwirkung vertikal gezogener Ankerplatten als zweidimensionales Bruchproblem*, 1969
- 12 Erbel, Klaus: *Ein Beitrag zur Untersuchung der Metamorphose von Mittelgebirgsschneedecken unter besonderer Berücksichtigung eines Verfahrens zur Bestimmung der thermischen Schneequalität*, 1969
- 13 Westhaus, Karl-Heinz: *Der Strukturwandel in der Binnenschiffahrt und sein Einfluß auf den Ausbau der Binnenschiffskanäle*, 1969
- 14 Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg: *Ein Beitrag zur Berechnung des Erdwiderstandes unter Ansatz der logarithmischen Spirale als Gleitflächenfunktion*, 1970
- 15 Schulz, Manfred: *Berechnung des räumlichen Erddruckes auf die Wandung kreiszylindrischer Körper*, 1970
- 16 Mobasseri, Manoutschehr: *Die Rippenstützmauer. Konstruktion und Grenzen ihrer Standicherheit*, 1970
- 17 Benk, Dieter: *Ein Beitrag zum Betrieb und zur Bemessung von Hochwasserrückhaltebecken*, 1970
- 18 Gàl, Attila: *Bestimmung der mitschwingenden Wassermasse bei überströmten Fischbauchklappen mit kreiszylindrischem Staublech*, 1971, vergriffen
- 19 Kuz, Klaus Dieter: *Ein Beitrag zur Frage des Einsetzens von Kavitationserscheinungen in einer Düsenströmung bei Berücksichtigung der im Wasser gelösten Gase*, 1971, vergriffen
- 20 Schaak, Hartmut: *Verteilleitungen von Wasserkraftanlagen*, 1971
- 21 *Sonderheft zur Eröffnung der neuen Versuchsanstalt des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart mit Beiträgen von*
Brombach, Hansjörg; Dirksen, Wolfram; Gàl, Attila; Gerlach, Reinhard; Giesecke, Jürgen; Holthoff, Franz-Josef; Kuz, Klaus Dieter; Marotz, Günter; Minor, Hans-Erwin; Petrikat, Kurt; Röhnisch, Arthur; Rueff, Helge; Schwarz, Helmut; Vollmer, Ernst; Wildenhahn, Eberhard; 1972
- 22 Wang, Chung-su: *Ein Beitrag zur Berechnung der Schwingungen an Kegelstrahlschiebern*, 1972
- 23 Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg: *Erdwiderstandsbeiwerte nach dem Ohde-Variationsverfahren*, 1972
- 24 Minor, Hans-Erwin: *Beitrag zur Bestimmung der Schwingungsanfachungsfunktionen überströmter Stauklappen*, 1972, vergriffen
- 25 Brombach, Hansjörg: *Untersuchung strömungsmechanischer Elemente (Fluidik) und die Möglichkeit der Anwendung von Wirbelkammerelementen im Wasserbau*, 1972, vergriffen
- 26 Wildenhahn, Eberhard: *Beitrag zur Berechnung von Horizontalfilterbrunnen*, 1972

- 27 Steinlein, Helmut: *Die Eliminierung der Schwebstoffe aus Flußwasser zum Zweck der unterirdischen Wasserspeicherung, gezeigt am Beispiel der Iller*, 1972
- 28 Holthoff, Franz Josef: *Die Überwindung großer Hubhöhen in der Binnenschifffahrt durch Schwimmerhebwerke*, 1973
- 29 Röder, Karl: *Einwirkungen aus Baugrundbewegungen auf trog- und kastenförmige Konstruktionen des Wasser- und Tunnelbaues*, 1973
- 30 Kretschmer, Heinz: *Die Bemessung von Bogenstaumauern in Abhängigkeit von der Talform*, 1973
- 31 Honekamp, Hermann: *Beitrag zur Berechnung der Montage von Unterwasserpipelines*, 1973
- 32 Giesecke, Jürgen: *Die Wirbelkammertriode als neuartiges Steuerorgan im Wasserbau*, und Brombach, Hansjörg: *Entwicklung, Bauformen, Wirkungsweise und Steuereigenschaften von Wirbelkammerverstärkern*, 1974
- 33 Rueff, Helge: *Untersuchung der schwingungserregenden Kräfte an zwei hintereinander angeordneten Tiefschützen unter besonderer Berücksichtigung von Kavitation*, 1974
- 34 Röhnisch, Arthur: *Einpreßversuche mit Zementmörtel für Spannbeton - Vergleich der Ergebnisse von Modellversuchen mit Ausführungen in Hüllwellrohren*, 1975
- 35 *Sonderheft anlässlich des 65. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. Kurt Petrikat mit Beiträgen von:* Brombach, Hansjörg; Erbel, Klaus; Flinspach, Dieter; Fischer jr., Richard; Gál, Attila; Gerlach, Reinhard; Giesecke, Jürgen; Haberhauer, Robert; Hafner Edzard; Hausenblas, Bernhard; Horlacher, Hans-Burkhard; Hutarew, Andreas; Knoll, Manfred; Krummet, Ralph; Marotz, Günter; Merkle, Theodor; Miller, Christoph; Minor, Hans-Erwin; Neumayer, Hans; Rao, Syamala; Rath, Paul; Rueff, Helge; Ruppert, Jürgen; Schwarz, Wolfgang; Topal-Gökceli, Mehmet; Vollmer, Ernst; Wang, Chung-su; Weber, Hans-Georg; 1975
- 36 Berger, Jochum: *Beitrag zur Berechnung des Spannungszustandes in rotationssymmetrisch belasteten Kugelschalen veränderlicher Wandstärke unter Gas- und Flüssigkeitsdruck durch Integration schwach singulärer Differentialgleichungen*, 1975
- 37 Dirksen, Wolfram: *Berechnung instationärer Abflusvorgänge in gestauten Gerinnen mittels Differenzenverfahren und die Anwendung auf Hochwasserrückhaltebecken*, 1976
- 38 Horlacher, Hans-Burkhard: *Berechnung instationärer Temperatur- und Wärmespannungsfelder in langen mehrschichtigen Hohlzylindern*, 1976
- 39 Hafner, Edzard: *Untersuchung der hydrodynamischen Kräfte auf Baukörper im Tiefwasserbereich des Meeres*, 1977, ISBN 3-921694-39-6
- 40 Ruppert, Jürgen: *Über den Axialwirbelkammerverstärker für den Einsatz im Wasserbau*, 1977, ISBN 3-921694-40-X
- 41 Hutarew, Andreas: *Beitrag zur Beeinflussbarkeit des Sauerstoffgehalts in Fließgewässern an Abstürzen und Wehren*, 1977, ISBN 3-921694-41-8, vergriffen
- 42 Miller, Christoph: *Ein Beitrag zur Bestimmung der schwingungserregenden Kräfte an unterströmten Wehren*, 1977, ISBN 3-921694-42-6
- 43 Schwarz, Wolfgang: *Druckstoßberechnung unter Berücksichtigung der Radial- und Längsverschiebungen der Rohrwandung*, 1978, ISBN 3-921694-43-4
- 44 Kinzelbach, Wolfgang: *Numerische Untersuchungen über den optimalen Einsatz variabler Kühlsysteme einer Kraftwerkskette am Beispiel Oberrhein*, 1978, ISBN 3-921694-44-2
- 45 Barczewski, Baldur: *Neue Meßmethoden für Wasser-Luftgemische und deren Anwendung auf zweiphasige Auftriebsstrahlen*, 1979, ISBN 3-921694-45-0
- 46 Neumayer, Hans: *Untersuchung der Strömungsvorgänge in radialen Wirbelkammerverstärkern*, 1979, ISBN 3-921694-46-9
- 47 Elalfy, Youssef-Elhassan: *Untersuchung der Strömungsvorgänge in Wirbelkammerdioden und -drosseln*, 1979, ISBN 3-921694-47-7
- 48 Brombach, Hansjörg: *Automatisierung der Bewirtschaftung von Wasserspeichern*, 1981, ISBN 3-921694-48-5
- 49 Geldner, Peter: *Deterministische und stochastische Methoden zur Bestimmung der Selbstdichtung von Gewässern*, 1981, ISBN 3-921694-49-3, vergriffen

- 50 Mehlhorn, Hans: *Temperaturveränderungen im Grundwasser durch Brauchwassereinleitungen*, 1982, ISBN 3-921694-50-7, vergriffen
- 51 Hafner, Edzard: *Rohrleitungen und Behälter im Meer*, 1983, ISBN 3-921694-51-5
- 52 Rinnert, Bernd: *Hydrodynamische Dispersion in porösen Medien: Einfluß von Dichteunterschieden auf die Vertikalvermischung in horizontaler Strömung*, 1983, ISBN 3-921694-52-3, vergriffen
- 53 Lindner, Wulf: *Steuerung von Grundwasserentnahmen unter Einhaltung ökologischer Kriterien*, 1983, ISBN 3-921694-53-1, vergriffen
- 54 Herr, Michael; Herzer, Jörg; Kinzelbach, Wolfgang; Kobus, Helmut; Rinnert, Bernd: *Methoden zur rechnerischen Erfassung und hydraulischen Sanierung von Grundwasserkontaminationen*, 1983, ISBN 3-921694-54-X
- 55 Schmitt, Paul: *Wege zur Automatisierung der Niederschlagsermittlung*, 1984, ISBN 3-921694-55-8, vergriffen
- 56 Müller, Peter: *Transport und selektive Sedimentation von Schwebstoffen bei gestautem Abfluß*, 1985, ISBN 3-921694-56-6
- 57 El-Qawasmeh, Fuad: *Möglichkeiten und Grenzen der Tropfbewässerung unter besonderer Berücksichtigung der Verstopfungsanfälligkeit der Tropfelemente*, 1985, ISBN 3-921694-57-4, vergriffen
- 58 Kirchenbaur, Klaus: *Mikroprozessorgesteuerte Erfassung instationärer Druckfelder am Beispiel seegangsbelasteter Baukörper*, 1985, ISBN 3-921694-58-2
- 59 Kobus, Helmut (Hrsg.): *Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser*, Tätigkeitsbericht 1984/85 (DFG-Forschergruppe an den Universitäten Hohenheim, Karlsruhe und Stuttgart), 1985, ISBN 3-921694-59-0, vergriffen
- 60 Spitz, Karlheinz: *Dispersion in porösen Medien: Einfluß von Inhomogenitäten und Dichteunterschieden*, 1985, ISBN 3-921694-60-4, vergriffen
- 61 Kobus, Helmut: *An Introduction to Air-Water Flows in Hydraulics*, 1985, ISBN 3-921694-61-2
- 62 Kaleris, Vassilios: *Erfassung des Austausches von Oberflächen- und Grundwasser in horizontalebene Grundwassermodellen*, 1986, ISBN 3-921694-62-0
- 63 Herr, Michael: *Grundlagen der hydraulischen Sanierung verunreinigter Porengrundwasserleiter*, 1987, ISBN 3-921694-63-9
- 64 Marx, Walter: *Berechnung von Temperatur und Spannung in Massenbeton infolge Hydratation*, 1987, ISBN 3-921694-64-7
- 65 Koschitzky, Hans-Peter: *Dimensionierungskonzept für Sohlbelüfter in Schußrinnen zur Vermeidung von Kavitationsschäden*, 1987, ISBN 3-921694-65-5
- 66 Kobus, Helmut (Hrsg.): *Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser*, Tätigkeitsbericht 1986/87 (DFG-Forschergruppe an den Universitäten Hohenheim, Karlsruhe und Stuttgart) 1987, ISBN 3-921694-66-3
- 67 Söll, Thomas: *Berechnungsverfahren zur Abschätzung anthropogener Temperaturanomalien im Grundwasser*, 1988, ISBN 3-921694-67-1
- 68 Dittrich, Andreas; Westrich, Bernd: *Bodenseeufererosion, Bestandsaufnahme und Bewertung*, 1988, ISBN 3-921694-68-X, vergriffen
- 69 Huwe, Bernd; van der Ploeg, Rienk R.: *Modelle zur Simulation des Stickstoffhaushaltes von Standorten mit unterschiedlicher landwirtschaftlicher Nutzung*, 1988, ISBN 3-921694-69-8, vergriffen
- 70 Stephan, Karl: *Integration elliptischer Funktionen*, 1988, ISBN 3-921694-70-1
- 71 Kobus, Helmut; Zilliox, Lothaire (Hrsg.): *Nitratbelastung des Grundwassers, Auswirkungen der Landwirtschaft auf die Grundwasser- und Rohwasserbeschaffenheit und Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers*. Vorträge des deutsch-französischen Kolloquiums am 6. Oktober 1988, Universitäten Stuttgart und Louis Pasteur Strasbourg (Vorträge in deutsch oder französisch, Kurzfassungen zweisprachig), 1988, ISBN 3-921694-71-X

- 72 Soyeaux, Renald: *Unterströmung von Stauanlagen auf klüftigem Untergrund unter Berücksichtigung laminarer und turbulenter Fließzustände*, 1991, ISBN 3-921694-72-8
- 73 Kohane, Roberto: *Berechnungsmethoden für Hochwasserabfluß in Fließgewässern mit überströmten Vorländern*, 1991, ISBN 3-921694-73-6
- 74 Hassinger, Reinhard: *Beitrag zur Hydraulik und Bemessung von Blocksteinrampen in flexibler Bauweise*, 1991, ISBN 3-921694-74-4, vergriffen
- 75 Schäfer, Gerhard: *Einfluß von Schichtenstrukturen und lokalen Einlagerungen auf die Längsdispersion in Porengrundwasserleitern*, 1991, ISBN 3-921694-75-2
- 76 Giesecke, Jürgen: *Vorträge, Wasserwirtschaft in stark besiedelten Regionen; Umweltforschung mit Schwerpunkt Wasserwirtschaft*, 1991, ISBN 3-921694-76-0
- 77 Huwe, Bernd: *Deterministische und stochastische Ansätze zur Modellierung des Stickstoffhaushalts landwirtschaftlich genutzter Flächen auf unterschiedlichem Skalenniveau*, 1992, ISBN 3-921694-77-9, vergriffen
- 78 Rommel, Michael: *Verwendung von Kluftdaten zur realitätsnahen Generierung von Kluftnetzen mit anschließender laminar-turbulenter Strömungsberechnung*, 1993, ISBN 3-92 1694-78-7
- 79 Marschall, Paul: *Die Ermittlung lokaler Stofffrachten im Grundwasser mit Hilfe von Einbohrloch-Meßverfahren*, 1993, ISBN 3-921694-79-5, vergriffen
- 80 Ptak, Thomas: *Stofftransport in heterogenen Porenaquiferen: Felduntersuchungen und stochastische Modellierung*, 1993, ISBN 3-921694-80-9, vergriffen
- 81 Haakh, Frieder: *Transientes Strömungsverhalten in Wirbelkammern*, 1993, ISBN 3-921694-81-7
- 82 Kobus, Helmut; Cirpka, Olaf; Barczewski, Baldur; Koschitzky, Hans-Peter: *Versuchseinrichtung zur Grundwasser und Altlastensanierung VEGAS, Konzeption und Programmrahmen*, 1993, ISBN 3-921694-82-5
- 83 Zang, Weidong: *Optimaler Echtzeit-Betrieb eines Speichers mit aktueller Abflußregenerierung*, 1994, ISBN 3-921694-83-3, vergriffen
- 84 Franke, Hans-Jörg: *Stochastische Modellierung eines flächenhaften Stoffeintrages und Transports in Grundwasser am Beispiel der Pflanzenschutzmittelproblematik*, 1995, ISBN 3-921694-84-1
- 85 Lang, Ulrich: *Simulation regionaler Strömungs- und Transportvorgänge in Karstaquiferen mit Hilfe des Doppelkontinuum-Ansatzes: Methodenentwicklung und Parameteridentifikation*, 1995, ISBN 3-921694-85-X, vergriffen
- 86 Helmig, Rainer: *Einführung in die Numerischen Methoden der Hydromechanik*, 1996, ISBN 3-921694-86-8, vergriffen
- 87 Cirpka, Olaf: *CONTRACT: A Numerical Tool for Contaminant Transport and Chemical Transformations - Theory and Program Documentation -*, 1996, ISBN 3-921694-87-6
- 88 Haberlandt, Uwe: *Stochastische Synthese und Regionalisierung des Niederschlages für Schmutzfrachtberechnungen*, 1996, ISBN 3-921694-88-4
- 89 Croisé, Jean: *Extraktion von flüchtigen Chemikalien aus natürlichen Lockergesteinen mittels erzwungener Luftströmung*, 1996, ISBN 3-921694-89-2, vergriffen
- 90 Jorde, Klaus: *Ökologisch begründete, dynamische Mindestwasserregelungen bei Ausleitungskraftwerken*, 1997, ISBN 3-921694-90-6, vergriffen
- 91 Helmig, Rainer: *Gekoppelte Strömungs- und Transportprozesse im Untergrund - Ein Beitrag zur Hydrosystemmodellierung-*, 1998, ISBN 3-921694-91-4, vergriffen
- 92 Emmert, Martin: *Numerische Modellierung nichtisothermer Gas-Wasser Systeme in porösen Medien*, 1997, ISBN 3-921694-92-2
- 93 Kern, Ulrich: *Transport von Schweb- und Schadstoffen in staugeregelten Fließgewässern am Beispiel des Neckars*, 1997, ISBN 3-921694-93-0, vergriffen
- 94 Förster, Georg: *Druckstoßdämpfung durch große Luftblasen in Hochpunkten von Rohrleitungen* 1997, ISBN 3-921694-94-9

- 95 Cirpka, Olaf: *Numerische Methoden zur Simulation des reaktiven Mehrkomponententransports im Grundwasser*, 1997, ISBN 3-921694-95-7, vergriffen
- 96 Färber, Arne: *Wärmetransport in der ungesättigten Bodenzone: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie*, 1997, ISBN 3-921694-96-5
- 97 Betz, Christoph: *Wasserdampfdestillation von Schadstoffen im porösen Medium: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie*, 1998, SBN 3-921694-97-3
- 98 Xu, Yichun: *Numerical Modeling of Suspended Sediment Transport in Rivers*, 1998, ISBN 3-921694-98-1, vergriffen
- 99 Wüst, Wolfgang: *Geochemische Untersuchungen zur Sanierung CKW-kontaminierter Aquifere mit Fe(0)-Reaktionswänden*, 2000, ISBN 3-933761-02-2
- 100 Sheta, Hussam: *Simulation von Mehrphasenvorgängen in porösen Medien unter Einbeziehung von Hysterese-Effekten*, 2000, ISBN 3-933761-03-4
- 101 Ayros, Edwin: *Regionalisierung extremer Abflüsse auf der Grundlage statistischer Verfahren*, 2000, ISBN 3-933761-04-2, vergriffen
- 102 Huber, Ralf: *Compositional Multiphase Flow and Transport in Heterogeneous Porous Media*, 2000, ISBN 3-933761-05-0
- 103 Braun, Christopherus: *Ein Upscaling-Verfahren für Mehrphasenströmungen in porösen Medien*, 2000, ISBN 3-933761-06-9
- 104 Hofmann, Bernd: *Entwicklung eines rechnergestützten Managementsystems zur Beurteilung von Grundwasserschadensfällen*, 2000, ISBN 3-933761-07-7
- 105 Class, Holger: *Theorie und numerische Modellierung nichtisothermer Mehrphasenprozesse in NAPL-kontaminierten porösen Medien*, 2001, ISBN 3-933761-08-5
- 106 Schmidt, Reinhard: *Wasserdampf- und Heißluftinjektion zur thermischen Sanierung kontaminierter Standorte*, 2001, ISBN 3-933761-09-3
- 107 Josef, Reinhold: *Schadstoffextraktion mit hydraulischen Sanierungsverfahren unter Anwendung von grenzflächenaktiven Stoffen*, 2001, ISBN 3-933761-10-7
- 108 Schneider, Matthias: *Habitat- und Abflussmodellierung für Fließgewässer mit unscharfen Berechnungsansätzen*, 2001, ISBN 3-933761-11-5
- 109 Rathgeb, Andreas: *Hydrodynamische Bemessungsgrundlagen für Lockerdeckwerke an überströmbaren Erddämmen*, 2001, ISBN 3-933761-12-3
- 110 Lang, Stefan: *Parallele numerische Simulation instationärer Probleme mit adaptiven Methoden auf unstrukturierten Gittern*, 2001, ISBN 3-933761-13-1
- 111 Appt, Jochen; Stumpp Simone: *Die Bodensee-Messkampagne 2001, IWS/CWR Lake Constance Measurement Program 2001*, 2002, ISBN 3-933761-14-X
- 112 Heimerl, Stephan: *Systematische Beurteilung von Wasserkraftprojekten*, 2002, ISBN 3-933761-15-8, vergriffen
- 113 Iqbal, Amin: *On the Management and Salinity Control of Drip Irrigation*, 2002, ISBN 3-933761-16-6
- 114 Silberhorn-Hemminger, Annette: *Modellierung von Kluftaquifersystemen: Geostatistische Analyse und deterministisch-stochastische Kluftgenerierung*, 2002, ISBN 3-933761-17-4
- 115 Winkler, Angela: *Prozesse des Wärme- und Stofftransports bei der In-situ-Sanierung mit festen Wärmequellen*, 2003, ISBN 3-933761-18-2
- 116 Marx, Walter: *Wasserkraft, Bewässerung, Umwelt - Planungs- und Bewertungsschwerpunkte der Wasserbewirtschaftung*, 2003, ISBN 3-933761-19-0
- 117 Hinkelmann, Reinhard: *Efficient Numerical Methods and Information-Processing Techniques in Environment Water*, 2003, ISBN 3-933761-20-4
- 118 Samaniego-Eguiguren, Luis Eduardo: *Hydrological Consequences of Land Use / Land Cover and Climatic Changes in Mesoscale Catchments*, 2003, ISBN 3-933761-21-2
- 119 Neunhäuserer, Lina: *Diskretisierungsansätze zur Modellierung von Strömungs- und Transportprozessen in geklüftet-porösen Medien*, 2003, ISBN 3-933761-22-0
- 120 Paul, Maren: *Simulation of Two-Phase Flow in Heterogeneous Poros Media with Adaptive Methods*, 2003, ISBN 3-933761-23-9

- 121 Ehret, Uwe: *Rainfall and Flood Nowcasting in Small Catchments using Weather Radar*, 2003, ISBN 3-933761-24-7
- 122 Haag, Ingo: *Der Sauerstoffhaushalt staugeregelter Flüsse am Beispiel des Neckars - Analysen, Experimente, Simulationen -*, 2003, ISBN 3-933761-25-5
- 123 Appt, Jochen: *Analysis of Basin-Scale Internal Waves in Upper Lake Constance*, 2003, ISBN 3-933761-26-3
- 124 Hrsg.: Schrenk, Volker; Batereau, Katrin; Barczewski, Baldur; Weber, Karolin und Koschitzky, Hans-Peter: *Symposium Ressource Fläche und VEGAS - Statuskolloquium 2003, 30. September und 1. Oktober 2003*, 2003, ISBN 3-933761-27-1
- 125 Omar Khalil Ouda: *Optimisation of Agricultural Water Use: A Decision Support System for the Gaza Strip*, 2003, ISBN 3-933761-28-0
- 126 Batereau, Katrin: *Sensorbasierte Bodenluftmessung zur Vor-Ort-Erkundung von Schadensherden im Untergrund*, 2004, ISBN 3-933761-29-8
- 127 Witt, Oliver: *Erosionsstabilität von Gewässersedimenten mit Auswirkung auf den Stofftransport bei Hochwasser am Beispiel ausgewählter Stauhaltungen des Oberrheins*, 2004, ISBN 3-933761-30-1
- 128 Jakobs, Hartmut: *Simulation nicht-isothermer Gas-Wasser-Prozesse in komplexen Kluft-Matrix-Systemen*, 2004, ISBN 3-933761-31-X
- 129 Li, Chen-Chien: *Deterministisch-stochastisches Berechnungskonzept zur Beurteilung der Auswirkungen erosiver Hochwasserereignisse in Flusstauhaltungen*, 2004, ISBN 3-933761-32-8
- 130 Reichenberger, Volker; Helmig, Rainer; Jakobs, Hartmut; Bastian, Peter; Niessner, Jennifer: *Complex Gas-Water Processes in Discrete Fracture-Matrix Systems: Up-scaling, Mass-Conservative Discretization and Efficient Multilevel Solution*, 2004, ISBN 3-933761-33-6
- 131 Hrsg.: Barczewski, Baldur; Koschitzky, Hans-Peter; Weber, Karolin; Wege, Ralf: *VEGAS - Statuskolloquium 2004*, Tagungsband zur Veranstaltung am 05. Oktober 2004 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2004, ISBN 3-933761-34-4
- 132 Asie, Kemal Jabir: *Finite Volume Models for Multiphase Multicomponent Flow through Porous Media*. 2005, ISBN 3-933761-35-2
- 133 Jacoub, George: *Development of a 2-D Numerical Module for Particulate Contaminant Transport in Flood Retention Reservoirs and Impounded Rivers*, 2004, ISBN 3-933761-36-0
- 134 Nowak, Wolfgang: *Geostatistical Methods for the Identification of Flow and Transport Parameters in the Subsurface*, 2005, ISBN 3-933761-37-9
- 135 Süß, Mia: *Analysis of the influence of structures and boundaries on flow and transport processes in fractured porous media*, 2005, ISBN 3-933761-38-7
- 136 Jose, Surabhin Chackiath: *Experimental Investigations on Longitudinal Dispersive Mixing in Heterogeneous Aquifers*, 2005, ISBN: 3-933761-39-5
- 137 Filiz, Fulya: *Linking Large-Scale Meteorological Conditions to Floods in Mesoscale Catchments*, 2005, ISBN 3-933761-40-9
- 138 Qin, Minghao: *Wirklichkeitsnahe und recheneffiziente Ermittlung von Temperatur und Spannungen bei großen RCC-Staumauern*, 2005, ISBN 3-933761-41-7
- 139 Kobayashi, Kenichiro: *Optimization Methods for Multiphase Systems in the Subsurface - Application to Methane Migration in Coal Mining Areas*, 2005, ISBN 3-933761-42-5
- 140 Rahman, Md. Arifur: *Experimental Investigations on Transverse Dispersive Mixing in Heterogeneous Porous Media*, 2005, ISBN 3-933761-43-3
- 141 Schrenk, Volker: *Ökobilanzen zur Bewertung von Altlastensanierungsmaßnahmen*, 2005, ISBN 3-933761-44-1
- 142 Hundecha, Hirpa Yeshewatesfa: *Regionalization of Parameters of a Conceptual Rainfall-Runoff Model*, 2005, ISBN: 3-933761-45-X
- 143 Wege, Ralf: *Untersuchungs- und Überwachungsmethoden für die Beurteilung natürlicher Selbstreinigungsprozesse im Grundwasser*, 2005, ISBN 3-933761-46-8

- 144 Breiting, Thomas: *Techniken und Methoden der Hydroinformatik - Modellierung von komplexen Hydrosystemen im Untergrund*, 2006, ISBN 3-933761-47-6
- 145 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Müller, Martin: *Ressource Untergrund: 10 Jahre VEGAS: Forschung und Technologieentwicklung zum Schutz von Grundwasser und Boden*, Tagungsband zur Veranstaltung am 28. und 29. September 2005 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2005, ISBN 3-933761-48-4
- 146 Rojanschi, Vlad: *Abflusskonzentration in mesoskaligen Einzugsgebieten unter Berücksichtigung des Sickerraumes*, 2006, ISBN 3-933761-49-2
- 147 Winkler, Nina Simone: *Optimierung der Steuerung von Hochwasserrückhaltebeckensystemen*, 2006, ISBN 3-933761-50-6
- 148 Wolf, Jens: *Räumlich differenzierte Modellierung der Grundwasserströmung alluvialer Aquifere für mesoskalige Einzugsgebiete*, 2006, ISBN: 3-933761-51-4
- 149 Kohler, Beate: *Externe Effekte der Laufwasserkraftnutzung*, 2006, ISBN 3-933761-52-2
- 150 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Stuhmann, Matthias: *VEGAS-Statuskolloquium 2006*, Tagungsband zur Veranstaltung am 28. September 2006 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2006, ISBN 3-933761-53-0
- 151 Niessner, Jennifer: *Multi-Scale Modeling of Multi-Phase - Multi-Component Processes in Heterogeneous Porous Media*, 2006, ISBN 3-933761-54-9
- 152 Fischer, Markus: *Beanspruchung eingeeerdeter Rohrleitungen infolge Austrocknung bindiger Böden*, 2006, ISBN 3-933761-55-7
- 153 Schneck, Alexander: *Optimierung der Grundwasserbewirtschaftung unter Berücksichtigung der Belange der Wasserversorgung, der Landwirtschaft und des Naturschutzes*, 2006, ISBN 3-933761-56-5
- 154 Das, Tapash: *The Impact of Spatial Variability of Precipitation on the Predictive Uncertainty of Hydrological Models*, 2006, ISBN 3-33761-57-3
- 155 Bielinski, Andreas: *Numerical Simulation of CO₂ sequestration in geological formations*, 2007, ISBN 3-933761-58-1
- 156 Mödinger, Jens: *Entwicklung eines Bewertungs- und Entscheidungsunterstützungssystems für eine nachhaltige regionale Grundwasserbewirtschaftung*, 2006, ISBN 3-933761-60-3
- 157 Manthey, Sabine: *Two-phase flow processes with dynamic effects in porous media - parameter estimation and simulation*, 2007, ISBN 3-933761-61-1
- 158 Pozos Estrada, Oscar: *Investigation on the Effects of Entrained Air in Pipelines*, 2007, ISBN 3-933761-62-X
- 159 Ochs, Steffen Oliver: *Steam injection into saturated porous media – process analysis including experimental and numerical investigations*, 2007, ISBN 3-933761-63-8
- 160 Marx, Andreas: *Einsatz gekoppelter Modelle und Wetterradar zur Abschätzung von Niederschlagsintensitäten und zur Abflussvorhersage*, 2007, ISBN 3-933761-64-6
- 161 Hartmann, Gabriele Maria: *Investigation of Evapotranspiration Concepts in Hydrological Modelling for Climate Change Impact Assessment*, 2007, ISBN 3-933761-65-4
- 162 Kebede Gurmessa, Tesfaye: *Numerical Investigation on Flow and Transport Characteristics to Improve Long-Term Simulation of Reservoir Sedimentation*, 2007, ISBN 3-933761-66-2
- 163 Trifković, Aleksandar: *Multi-objective and Risk-based Modelling Methodology for Planning, Design and Operation of Water Supply Systems*, 2007, ISBN 3-933761-67-0
- 164 Göttinger, Jens: *Distributed Conceptual Hydrological Modelling - Simulation of Climate, Land Use Change Impact and Uncertainty Analysis*, 2007, ISBN 3-933761-68-9
- 165 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Stuhmann, Matthias: *VEGAS – Kolloquium 2007*, Tagungsband zur Veranstaltung am 26. September 2007 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2007, ISBN 3-933761-69-7
- 166 Freeman, Beau: *Modernization Criteria Assessment for Water Resources Planning; Klamath Irrigation Project, U.S.*, 2008, ISBN 3-933761-70-0

- 167 Dreher, Thomas: *Selektive Sedimentation von Feinstschwebstoffen in Wechselwirkung mit wandnahen turbulenten Strömungsbedingungen*, 2008, ISBN 3-933761-71-9
- 168 Yang, Wei: *Discrete-Continuous Downscaling Model for Generating Daily Precipitation Time Series*, 2008, ISBN 3-933761-72-7
- 169 Kopecki, Ianina: *Calculational Approach to FST-Hemispheres for Multiparametrical Benthos Habitat Modelling*, 2008, ISBN 3-933761-73-5
- 170 Brommundt, Jürgen: *Stochastische Generierung räumlich zusammenhängender Niederschlagszeitreihen*, 2008, ISBN 3-933761-74-3
- 171 Papafotiou, Alexandros: *Numerical Investigations of the Role of Hysteresis in Heterogeneous Two-Phase Flow Systems*, 2008, ISBN 3-933761-75-1
- 172 He, Yi: *Application of a Non-Parametric Classification Scheme to Catchment Hydrology*, 2008, ISBN 978-3-933761-76-7
- 173 Wagner, Sven: *Water Balance in a Poorly Gauged Basin in West Africa Using Atmospheric Modelling and Remote Sensing Information*, 2008, ISBN 978-3-933761-77-4
- 174 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Stuhmann, Matthias; Schrenk, Volker: *VEGAS-Kolloquium 2008 Ressource Fläche III*, Tagungsband zur Veranstaltung am 01. Oktober 2008 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2008, ISBN 978-3-933761-78-1
- 175 Patil, Sachin: *Regionalization of an Event Based Nash Cascade Model for Flood Predictions in Ungauged Basins*, 2008, ISBN 978-3-933761-79-8
- 176 Assteerawatt, Anongnart: *Flow and Transport Modelling of Fractured Aquifers based on a Geostatistical Approach*, 2008, ISBN 978-3-933761-80-4
- 177 Karnahl, Joachim Alexander: *2D numerische Modellierung von multifraktionalem Schwebstoff- und Schadstofftransport in Flüssen*, 2008, ISBN 978-3-933761-81-1
- 178 Hiester, Uwe: *Technologieentwicklung zur In-situ-Sanierung der ungesättigten Bodenzone mit festen Wärmequellen*, 2009, ISBN 978-3-933761-82-8
- 179 Laux, Patrick: *Statistical Modeling of Precipitation for Agricultural Planning in the Volta Basin of West Africa*, 2009, ISBN 978-3-933761-83-5
- 180 Ehsan, Saqib: *Evaluation of Life Safety Risks Related to Severe Flooding*, 2009, ISBN 978-3-933761-84-2
- 181 Prohaska, Sandra: *Development and Application of a 1D Multi-Strip Fine Sediment Transport Model for Regulated Rivers*, 2009, ISBN 978-3-933761-85-9
- 182 Kopp, Andreas: *Evaluation of CO₂ Injection Processes in Geological Formations for Site Screening*, 2009, ISBN 978-3-933761-86-6
- 183 Ebigbo, Anozie: *Modelling of biofilm growth and its influence on CO₂ and water (two-phase) flow in porous media*, 2009, ISBN 978-3-933761-87-3
- 184 Freiboth, Sandra: *A phenomenological model for the numerical simulation of multiphase multicomponent processes considering structural alterations of porous media*, 2009, ISBN 978-3-933761-88-0
- 185 Zöllner, Frank: *Implementierung und Anwendung netzfreier Methoden im Konstruktiven Wasserbau und in der Hydromechanik*, 2009, ISBN 978-3-933761-89-7
- 186 Vasin, Milos: *Influence of the soil structure and property contrast on flow and transport in the unsaturated zone*, 2010, ISBN 978-3-933761-90-3
- 187 Li, Jing: *Application of Copulas as a New Geostatistical Tool*, 2010, ISBN 978-3-933761-91-0
- 188 AghaKouchak, Amir: *Simulation of Remotely Sensed Rainfall Fields Using Copulas*, 2010, ISBN 978-3-933761-92-7
- 189 Thapa, Pawan Kumar: *Physically-based spatially distributed rainfall runoff modelling for soil erosion estimation*, 2010, ISBN 978-3-933761-93-4
- 190 Wurms, Sven: *Numerische Modellierung der Sedimentationsprozesse in Retentionsanlagen zur Steuerung von Stoffströmen bei extremen Hochwasserabflussereignissen*, 2011, ISBN 978-3-933761-94-1

- 191 Merkel, Uwe: *Unsicherheitsanalyse hydraulischer Einwirkungen auf Hochwasserschutzdeiche und Steigerung der Leistungsfähigkeit durch adaptive Strömungsmodellierung*, 2011, ISBN 978-3-933761-95-8
- 192 Fritz, Jochen: *A Decoupled Model for Compositional Non-Isothermal Multiphase Flow in Porous Media and Multiphysics Approaches for Two-Phase Flow*, 2010, ISBN 978-3-933761-96-5
- 193 Weber, Karolin (Hrsg.): *12. Treffen junger WissenschaftlerInnen an Wasserbauinstituten*, 2010, ISBN 978-3-933761-97-2
- 194 Bliedernicht, Jan-Geert: *Probability Forecasts of Daily Areal Precipitation for Small River Basins*, 2011, ISBN 978-3-933761-98-9
- 195 Hrsg.: Koschitzky, Hans-Peter; Braun, Jürgen: *VEGAS-Kolloquium 2010 In-situ-Sanierung - Stand und Entwicklung Nano und ISCO -*, Tagungsband zur Veranstaltung am 07. Oktober 2010 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2010, ISBN 978-3-933761-99-6
- 196 Gafurov, Abror: *Water Balance Modeling Using Remote Sensing Information - Focus on Central Asia*, 2010, ISBN 978-3-942036-00-9
- 197 Mackenberg, Sylvia: *Die Quellstärke in der Sickerwasserprognose: Möglichkeiten und Grenzen von Labor- und Freilanduntersuchungen*, 2010, ISBN 978-3-942036-01-6
- 198 Singh, Shailesh Kumar: *Robust Parameter Estimation in Gauged and Ungauged Basins*, 2010, ISBN 978-3-942036-02-3
- 199 Doğan, Mehmet Onur: *Coupling of porous media flow with pipe flow*, 2011, ISBN 978-3-942036-03-0
- 200 Liu, Min: *Study of Topographic Effects on Hydrological Patterns and the Implication on Hydrological Modeling and Data Interpolation*, 2011, ISBN 978-3-942036-04-7
- 201 Geleta, Habtamu Itafa: *Watershed Sediment Yield Modeling for Data Scarce Areas*, 2011, ISBN 978-3-942036-05-4
- 202 Franke, Jörg: *Einfluss der Überwachung auf die Versagenswahrscheinlichkeit von Staustufen*, 2011, ISBN 978-3-942036-06-1
- 203 Bakimchandra, Oinam: *Integrated Fuzzy-GIS approach for assessing regional soil erosion risks*, 2011, ISBN 978-3-942036-07-8
- 204 Alam, Muhammad Mahboob: *Statistical Downscaling of Extremes of Precipitation in Mesoscale Catchments from Different RCMs and Their Effects on Local Hydrology*, 2011, ISBN 978-3-942036-08-5
- 205 Hrsg.: Koschitzky, Hans-Peter; Braun, Jürgen: *VEGAS-Kolloquium 2011 Flache Geothermie - Perspektiven und Risiken*, Tagungsband zur Veranstaltung am 06. Oktober 2011 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2011, ISBN 978-3-933761-09-2
- 206 Haslauer, Claus: *Analysis of Real-World Spatial Dependence of Subsurface Hydraulic Properties Using Copulas with a Focus on Solute Transport Behaviour*, 2011, ISBN 978-3-942036-10-8
- 207 Dung, Nguyen Viet: *Multi-objective automatic calibration of hydrodynamic models – development of the concept and an application in the Mekong Delta*, 2011, ISBN 978-3-942036-11-5
- 208 Hung, Nguyen Nghia: *Sediment dynamics in the floodplain of the Mekong Delta, Vietnam*, 2011, ISBN 978-3-942036-12-2
- 209 Kuhlmann, Anna: *Influence of soil structure and root water uptake on flow in the unsaturated zone*, 2012, ISBN 978-3-942036-13-9
- 210 Tuhtan, Jeffrey Andrew: *Including the Second Law Inequality in Aquatic Ecodynamics: A Modeling Approach for Alpine Rivers Impacted by Hydropeaking*, 2012, ISBN 978-3-942036-14-6
- 211 Tolossa, Habtamu: *Sediment Transport Computation Using a Data-Driven Adaptive Neuro-Fuzzy Modelling Approach*, 2012, ISBN 978-3-942036-15-3

- 212 Tatomir, Alexandru-Bodgan: *From Discrete to Continuum Concepts of Flow in Fractured Porous Media*, 2012, ISBN 978-3-942036-16-0
- 213 Erbertseder, Karin: *A Multi-Scale Model for Describing Cancer-Therapeutic Transport in the Human Lung*, 2012, ISBN 978-3-942036-17-7
- 214 Noack, Markus: *Modelling Approach for Interstitial Sediment Dynamics and Reproduction of Gravel Spawning Fish*, 2012, ISBN 978-3-942036-18-4
- 215 De Boer, Cjestmir Volkert: *Transport of Nano Sized Zero Valent Iron Colloids during Injection into the Subsurface*, 2012, ISBN 978-3-942036-19-1
- 216 Pfaff, Thomas: *Processing and Analysis of Weather Radar Data for Use in Hydrology*, 2013, ISBN 978-3-942036-20-7
- 217 Lebreuz, Hans-Henning: *Addressing the Input Uncertainty for Hydrological Modeling by a New Geostatistical Method*, 2013, ISBN 978-3-942036-21-4
- 218 Darcis, Melanie Yvonne: *Coupling Models of Different Complexity for the Simulation of CO₂ Storage in Deep Saline Aquifers*, 2013, ISBN 978-3-942036-22-1
- 219 Beck, Ferdinand: *Generation of Spatially Correlated Synthetic Rainfall Time Series in High Temporal Resolution - A Data Driven Approach*, 2013, ISBN 978-3-942036-23-8
- 220 Guthke, Philipp: *Non-multi-Gaussian spatial structures: Process-driven natural genesis, manifestation, modeling approaches, and influences on dependent processes*, 2013, ISBN 978-3-942036-24-5
- 221 Walter, Lena: *Uncertainty studies and risk assessment for CO₂ storage in geological formations*, 2013, ISBN 978-3-942036-25-2
- 222 Wolff, Markus: *Multi-scale modeling of two-phase flow in porous media including capillary pressure effects*, 2013, ISBN 978-3-942036-26-9
- 223 Mosthaf, Klaus Roland: *Modeling and analysis of coupled porous-medium and free flow with application to evaporation processes*, 2014, ISBN 978-3-942036-27-6
- 224 Leube, Philipp Christoph: *Methods for Physically-Based Model Reduction in Time: Analysis, Comparison of Methods and Application*, 2013, ISBN 978-3-942036-28-3
- 225 Rodríguez Fernández, Jhan Ignacio: *High Order Interactions among environmental variables: Diagnostics and initial steps towards modeling*, 2013, ISBN 978-3-942036-29-0
- 226 Eder, Maria Magdalena: *Climate Sensitivity of a Large Lake*, 2013, ISBN 978-3-942036-30-6
- 227 Greiner, Philipp: *Alkoholinjektion zur In-situ-Sanierung von CKW Schadensherden in Grundwasserleitern: Charakterisierung der relevanten Prozesse auf unterschiedlichen Skalen*, 2014, ISBN 978-3-942036-31-3
- 228 Lauser, Andreas: *Theory and Numerical Applications of Compositional Multi-Phase Flow in Porous Media*, 2014, ISBN 978-3-942036-32-0
- 229 Enzenhöfer, Rainer: *Risk Quantification and Management in Water Production and Supply Systems*, 2014, ISBN 978-3-942036-33-7
- 230 Faigle, Benjamin: *Adaptive modelling of compositional multi-phase flow with capillary pressure*, 2014, ISBN 978-3-942036-34-4
- 231 Oladyshkin, Sergey: *Efficient modeling of environmental systems in the face of complexity and uncertainty*, 2014, ISBN 978-3-942036-35-1
- 232 Sugimoto, Takayuki: *Copula based Stochastic Analysis of Discharge Time Series*, 2014, ISBN 978-3-942036-36-8
- 233 Koch, Jonas: *Simulation, Identification and Characterization of Contaminant Source Architectures in the Subsurface*, 2014, ISBN 978-3-942036-37-5
- 234 Zhang, Jin: *Investigations on Urban River Regulation and Ecological Rehabilitation Measures, Case of Shenzhen in China*, 2014, ISBN 978-3-942036-38-2
- 235 Siebel, Rüdiger: *Experimentelle Untersuchungen zur hydrodynamischen Belastung und Standsicherheit von Deckwerken an überströmbaren Erddämmen*, 2014, ISBN 978-3-942036-39-9

- 236 Baber, Katherina: *Coupling free flow and flow in porous media in biological and technical applications: From a simple to a complex interface description*, 2014, ISBN 978-3-942036-40-5
- 237 Nuske, Klaus Philipp: *Beyond Local Equilibrium — Relaxing local equilibrium assumptions in multiphase flow in porous media*, 2014, ISBN 978-3-942036-41-2
- 238 Geiges, Andreas: *Efficient concepts for optimal experimental design in nonlinear environmental systems*, 2014, ISBN 978-3-942036-42-9
- 239 Schwenck, Nicolas: *An XFEM-Based Model for Fluid Flow in Fractured Porous Media*, 2014, ISBN 978-3-942036-43-6
- 240 Chamorro Chávez, Alejandro: *Stochastic and hydrological modelling for climate change prediction in the Lima region, Peru*, 2015, ISBN 978-3-942036-44-3
- 241 Yulizar: *Investigation of Changes in Hydro-Meteorological Time Series Using a Depth-Based Approach*, 2015, ISBN 978-3-942036-45-0
- 242 Kretschmer, Nicole: *Impacts of the existing water allocation scheme on the Limarí watershed – Chile, an integrative approach*, 2015, ISBN 978-3-942036-46-7
- 243 Kramer, Matthias: *Luftbedarf von Freistrahlturbinen im Gegendruckbetrieb*, 2015, ISBN 978-3-942036-47-4
- 244 Hommel, Johannes: *Modeling biogeochemical and mass transport processes in the subsurface: Investigation of microbially induced calcite precipitation*, 2016, ISBN 978-3-942036-48-1
- 245 Germer, Kai: *Wasserinfiltration in die ungesättigte Zone eines makroporösen Hanges und deren Einfluss auf die Hangstabilität*, 2016, ISBN 978-3-942036-49-8
- 246 Hörning, Sebastian: *Process-oriented modeling of spatial random fields using copulas*, 2016, ISBN 978-3-942036-50-4
- 247 Jambhekar, Vishal: *Numerical modeling and analysis of evaporative salinization in a coupled free-flow porous-media system*, 2016, ISBN 978-3-942036-51-1
- 248 Huang, Yingchun: *Study on the spatial and temporal transferability of conceptual hydrological models*, 2016, ISBN 978-3-942036-52-8
- 249 Kleinknecht, Simon Matthias: *Migration and retention of a heavy NAPL vapor and remediation of the unsaturated zone*, 2016, ISBN 978-3-942036-53-5
- 250 Kwakye, Stephen Oppong: *Study on the effects of climate change on the hydrology of the West African sub-region*, 2016, ISBN 978-3-942036-54-2
- 251 Kissinger, Alexander: *Basin-Scale Site Screening and Investigation of Possible Impacts of CO₂ Storage on Subsurface Hydrosystems*, 2016, ISBN 978-3-942036-55-9
- 252 Müller, Thomas: *Generation of a Realistic Temporal Structure of Synthetic Precipitation Time Series for Sewer Applications*, 2017, ISBN 978-3-942036-56-6
- 253 Grüninger, Christoph: *Numerical Coupling of Navier-Stokes and Darcy Flow for Soil-Water Evaporation*, 2017, ISBN 978-3-942036-57-3
- 254 Suroso: *Asymmetric Dependence Based Spatial Copula Models: Empirical Investigations and Consequences on Precipitation Fields*, 2017, ISBN 978-3-942036-58-0
- 255 Müller, Thomas; Mosthaf, Tobias; Gunzenhauser, Sarah; Seidel, Jochen; Bárdossy, András: *Grundlagenbericht Niederschlags-Simulator (NiedSim3)*, 2017, ISBN 978-3-942036-59-7
- 256 Mosthaf, Tobias: *New Concepts for Regionalizing Temporal Distributions of Precipitation and for its Application in Spatial Rainfall Simulation*, 2017, ISBN 978-3-942036-60-3
- 257 Fenrich, Eva Katrin: *Entwicklung eines ökologisch-ökonomischen Vernetzungsmodells für Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher*, 2018, ISBN 978-3-942036-61-0
- 258 Schmidt, Holger: *Microbial stabilization of lotic fine sediments*, 2018, ISBN 978-3-942036-62-7
- 259 Fetzer, Thomas: *Coupled Free and Porous-Medium Flow Processes Affected by Turbulence and Roughness – Models, Concepts and Analysis*, 2018, ISBN 978-3-942036-63-4

- 260 Schröder, Hans Christoph: *Large-scale High Head Pico Hydropower Potential Assessment*, 2018, ISBN 978-3-942036-64-1
- 261 Bode, Felix: *Early-Warning Monitoring Systems for Improved Drinking Water Resource Protection*, 2018, ISBN 978-3-942036-65-8
- 262 Gebler, Tobias: *Statistische Auswertung von simulierten Talsperrenüberwachungsdaten zur Identifikation von Schadensprozessen an Gewichtsstaumauern*, 2018, ISBN 978-3-942036-66-5

Die Mitteilungshefte ab der Nr. 134 (Jg. 2005) stehen als pdf-Datei über die Homepage des Instituts: www.iws.uni-stuttgart.de zur Verfügung.