

# Hybride Modellierung des Verformungsverhaltens einer Gewichtsmauer

Beispiel Sperre *Großer Mühdorfer See*

---

M A S T E R A R B E I T

verfasst am

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft  
der

Technischen Universität Graz

Juni 2011

Verfasser	<b>Edwin STAUDACHER</b> , BSc Matrikelnummer: 0330850
Betreuer	Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald Zenz, Dipl.-Ing. Rupert Feldbacher

## **Eid (Ehrenwörtliche Erklärung)**

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ich versichere, dass ich diese Masterarbeit bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin oder einem Beurteiler) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

**Graz**, im Juni 2011

---

EDWIN STAUDACHER

## Danksagung

Der größte Dank gebührt meinen Eltern, für die großzügigen Rahmenbedingungen während des Studiums und meiner gesamten Ausbildung.

Ein herzliches Dankeschön möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Rupert Feldbacher aussprechen, der während der Entstehung dieser Arbeit mit großer Motivation meine Fragen beantwortet hat.

Weiters geht ein großer Dank an Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald Zenz, für das entgegengebrachte Vertrauen und die engagierte Betreuung und Begutachtung dieser Arbeit. Ich möchte mich auch dafür bedanken, dass diese Arbeit in Verbindung mit der Verbund Hydro Power entstehen konnte.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Johannes Grillitsch und Herrn Ing. Werner Kremsl, für das Bereitstellen der Daten und Unterlagen. Auch danke ich dafür, dass mir die Teilnahme an der Sperrenbegehung ermöglicht wurde. Zusätzlich danke ich Herrn Ing. Konrad Pissnig für die Übermittlung der Unterlagen.

## Kurzfassung

In Oberkärnten betreibt die *Verbund Hydro Power AG (VHP)* die Speicherkraftwerke *Malta* und *Reißeck/Kreuzeck*. Der Jahresspeicher *Großer Mühlendorfer See* ist der größte Stausee der Kraftwerksgruppe *Reißeck/Kreuzeck* und wird durch die gleichnamige Gewichtsmauer aufgestaut.

Zur Erfassung der auftretenden Verformungen sind im Block 14 der Sperre ein Schwimm- und ein Pendellot installiert. Das Ziel dieser Arbeit ist, diese Verformungen durch mathematische Funktionen zu beschreiben. Dazu wird ein statistisches Verfahren zur Datenanalyse, die sogenannte *hybride Regressionsanalyse*, eingesetzt. Die hybride Regressionsanalyse ist eine Mischform der *deterministischen* und *statistischen Regressionsanalyse*. Die physikalischen Zusammenhänge (deterministischer Anteil) werden mit der Finite - Elemente - Methode in Form von Verformungen zufolge der *hydrostatischen Wasserlast* und der *Temperatureinwirkung* ausgedrückt. Die Verformungen fließen mit weiteren Messwerten (statistischer Anteil) in die Regressionsanalyse ein.

Mit den so gewonnenen Funktionen ist es in Zukunft möglich, die Messwerte der Lotanlagen vorherzusagen sowie die *Alarmgrenzen* für die jeweils vorherrschende Situation zu berechnen. Befinden sich die gemessenen Verformungen außerhalb dieser Grenzen, wird ein Alarm ausgelöst.

Gegenwärtig wird das Pumpspeicherkraftwerk *Reißeck II* errichtet. Nach dessen Fertigstellung ist eine geänderte Bewirtschaftung des Speichers *Großer Mühlendorfer See*, welcher als Oberbecken dient, zu erwarten. Um die Auswirkungen auf das Verformungsverhalten der Sperre zeigen zu können, werden die Verformungen für zwei mögliche Szenarien der Betriebsführung ermittelt und mit dem derzeitigen Verhalten der Sperre verglichen.

## Abstract

In upper Carinthia, in the south of Austria, the *Verbund Hydro Power AG* operates the power station groups *Malta* and *Reißeck/Kreuzeck*. The biggest reservoir in the group *Reißeck/Kreuzeck* is the annual storage reservoir *Großer Mühlendorfer See*, which is impounded by a gravity dam.

The deformations of this dam are monitored in the block 14 by two pendulums, one inverted pendulum and one direct pendulum. The aim of this master thesis is the determination two mathematical functions that describe these deformations. For this purpose a statistical method, the so-called *multiple, hybrid regression analysis*, is used. The hybrid regression analysis is a combination of the deterministic and statistical regression analysis. The *deterministic* part is described by the displacements that are the result of the structural analysis, using the *finite element method*. The data of the dam monitoring devices represent the *statistical* part of the hybrid regression analysis. With these functions it is possible to predict the readings of the pendulums. The knowledge of the predicted values is important for the determination of the *threshold values* of the pendulums. If the reading of one of the pendulums is outside the range of the threshold values, an alarm is triggered.

Currently, the pumped storage power plant *Reißeck II* is under construction. When it's completed, a *different reservoir operation model* can be expected, because the *Großer Mühlendorfer See* reservoir will be the upper basin of the new power station. Therefore two *alternative operation models* are created. The deformations due the new operation schemes are calculated with the previously determined functions. To show the effects on the deformation behavior of the dam, the deformations of the existing operation scheme are compared with the deformations of the new reservoir operation models.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Ziel der Arbeit . . . . .	1
1.2	Gliederung der Arbeit . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Sperre Großer Mühdorfer See</b>	<b>4</b>
2.1	Allgemeines . . . . .	4
2.2	Lage . . . . .	4
2.3	Speicher . . . . .	5
2.4	Querschnitt . . . . .	6
2.5	Ausführung im Grundriss . . . . .	8
2.6	Bauwerksüberwachung . . . . .	8
2.6.1	Allgemeines . . . . .	8
2.6.2	Bereitgestellte Daten . . . . .	10
2.6.3	Betontemperaturen – T01 und T02 . . . . .	10
2.6.4	Lufttemperatur – MT1 . . . . .	11
2.6.5	Pegel – PG1 . . . . .	11
2.6.6	Hängelot – HL1 . . . . .	12
2.6.7	Schwimmlot – SL1 . . . . .	12
<b>3</b>	<b>FE – Modellierung</b>	<b>13</b>
3.1	Berechnungszeiträume . . . . .	15
3.2	Thermisches Modell . . . . .	16
3.2.1	Initialtemperatur des Betons . . . . .	17
3.2.2	Endgültiges Temperaturfeld für die Verformungsberechnung . . . . .	22
3.3	Mechanisches Modell . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Regressionsanalyse</b>	<b>28</b>
4.1	Einfache Regression . . . . .	29
4.2	Multiple Regression . . . . .	30
4.3	Prüfung der Regressionsfunktion . . . . .	31

4.3.1	Bestimmtheitsmaß . . . . .	31
4.3.2	F - Test . . . . .	31
4.3.3	Standardfehler . . . . .	32
4.3.4	t - Test . . . . .	32
4.3.5	Multikollinearität . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Anwendung der Regressionsanalyse</b>	<b>34</b>
5.1	Regression - Hängelot . . . . .	34
5.1.1	Regression mit <i>EXCEL</i> (zweiteiliger Ansatz) . . . . .	34
5.1.2	Regression mit der Statistiksoftware R . . . . .	35
5.2	Regression - Schwimmlot . . . . .	47
5.3	Endgültige Regressionsfunktionen . . . . .	52
<b>6</b>	<b>Variantenstudie</b>	<b>53</b>
6.1	Ermittlung der Speicherinhaltslinie . . . . .	54
6.2	Bewirtschaftungskonzepte . . . . .	54
6.3	FE - Berechnung . . . . .	56
6.4	Vorhersage mit der Statistiksoftware R . . . . .	57
6.5	Vorhersage mit <i>EXCEL</i> . . . . .	63
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>65</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>70</b>
A.1	Varianten des FE - Modells . . . . .	70
A.2	Varianten der Regressionsanalyse . . . . .	72
A.2.1	Hängelot . . . . .	72
A.2.2	Schwimmlot . . . . .	74
A.3	R - Skript . . . . .	77

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Sperre <i>Großer Mühdorfer See</i> . . . . .	3
2.1	Schematische Darstellung – Kraftwerksgruppe Reißbeck/Kreuzeck . . .	5
2.2	Sperre <i>Großer Mühdorfer See</i> – Querschnitt (Block 14) . . . . .	6
2.3	Sperre <i>Großer Mühdorfer See</i> – Lageplan der Sperrenstelle . . . . .	8
2.4	Sperre <i>Großer Mühdorfer See</i> – Funktionsüberprüfung des Grundablasses . . . . .	10
2.5	Signalverarbeitung der Messstellen T01 und T02 . . . . .	11
2.6	Hängelot – Messnische mit automatischer (unten) und manueller Ableseeinrichtung (oben) . . . . .	12
2.7	Schwimmlot . . . . .	12
3.1	FE-Netz – gesamtes Modell . . . . .	13
3.2	FE-Netz – Lage der relevanten Knoten . . . . .	14
3.3	Verlauf des Wasserspiegels und Einteilung der verschiedenen Zeiträume	16
3.4	Ablauf der Temperaturfeldberechnung . . . . .	17
3.5	Aufteilung der Temperatureinflüsse entlang des Querschnittes . . . . .	19
3.6	Verlauf der Knotentemperatur für den Zeitraum 2 und dessen Wiederholungen . . . . .	20
3.7	Temperaturfeld - Initialzustand ( $T_{\text{init},2}$ ) . . . . .	21
3.8	Thermisches Modell - Randbedingungen . . . . .	23
3.9	Beispiel für das Temperaturfeld (Step 796) . . . . .	24
3.10	1000-fach überhöhte Darstellung der Verformungsanteile (Step 796) . .	26
3.11	Verformung der Wasserseite über die Höhe der Sperre (Step 796) . . .	27
5.1	Regressionsanalyse mit $R$ : Ergebnis - Modell V485_1_1 . . . . .	38
5.2	Verlauf des Wasserspiegels im Zeitraum leer . . . . .	41
5.3	Regressionsanalyse mit $R$ : Ergebnis - Modell V485_4L1 . . . . .	42
5.4	Regressionsanalyse mit $R$ : Ergebnis - Modell V485_4L3 . . . . .	43
5.5	Regressionsanalyse mit $R$ : Prognose des Modells V485_4L1 . . . . .	44
5.6	Hängelot – Vergleich der Schätz- und Messwerte . . . . .	45

5.7	Residuen und Abweichungen zu den Messwerten des Hängelotes (HL1)	46
5.8	Regressionsanalyse mit $R$ : Ergebnis - Modell $SLV485_0_3$	48
5.9	Regressionsanalyse mit $R$ : Ergebnis - Modell $SLV485_4_3$	49
5.10	Schwimmlot – Vergleich der Schätz- und Messwerte	50
5.11	Residuen und Abweichungen zu den Messwerten des Schwimmlotes (SL1)	51
6.1	Schema – Lage Pumpspeicherkraftwerk Reißbeck 2	53
6.2	<i>Großer Mühlendorfer See</i> – Speicherinhaltslinie	55
6.3	Wochenspeicher mit dynamischen Alarmgrenzen	60
6.4	Vorhersage der Verformungen mit $R$ – Wochenspeicher	61
6.5	Vorhersage der Verformungen mit $R$ – Monatsspeicher	62
6.6	Vorhersage der Verformungen mit <i>EXCEL</i> – Ablauf	63
6.7	Vorhersage der Verformungen mit <i>EXCEL</i> – Layout der Tabelle	64
A.1	Regressionsanalyse mit $R$ : Ergebnis - Modell $V485_2_1$	72
A.2	Regressionsanalyse mit $R$ : Ergebnis - Modell $V485_3_1$	73
A.3	Regressionsanalyse mit $R$ : Ergebnis - Modell $V485_4_1$	73
A.4	Regressionsanalyse mit $R$ : Multikollinearitätsanalyse der Variablen $U_{R,W}$ und $PG1_L$	74
A.5	Regressionsanalyse mit $R$ : Ergebnis - Modell $SLV485_1_3$	74
A.6	Regressionsanalyse mit $R$ : Ergebnis - Modell $V485_4L3$	75
A.7	Regressionsanalyse mit $R$ : Ergebnis - Modell $V485_5_3$	75
A.8	Regressionsanalyse mit $R$ : Ergebnis - Modell $V485_6_3$	76

# Tabellenverzeichnis

2.1	Sperre <i>Großer Mühdorfer See</i> – Eckdaten [ATCOLD (1991) S. 125] . . . . .	7
3.1	FE-Netz – Absolute Höhen der Knoten der Lotanlagen . . . . .	15
3.2	Materialkennwerte des thermischen FE-Modells . . . . .	17
3.3	Berechnung der Betontemperaturen . . . . .	18
3.4	Gegenüberstellung der Auswahlkriterien . . . . .	21
3.5	Materialkennwerte des mechanischen FE-Modells . . . . .	25
6.1	Ausbaudurchflüsse der Kraftwerke <i>Reißeck</i> und <i>Reißeck II</i> . . . . .	55
6.2	Prognose – Zusammenfassung der Verformungen (Extremwerte) . . . . .	60

# 1 Einleitung

Talsperren sind Bauwerke mit einem großen *Gefährdungspotential* für die unterhalb dieser Bauten liegenden Gebiete. Deshalb werden die Talsperren nach dem Stand der Technik geplant und während der Baudurchführung im Hinblick auf die geforderte Qualität überprüft. Das sichere Tragverhalten wird in der Planung mittels Modellen simuliert. Zur späteren Überprüfung der Modellannahmen bzw. um bei Differenzen oder unerwartetem Verhalten Maßnahmen zur Sicherheitskontrolle durchführen zu können, wird das Bauwerk mit Hilfe von *Messinstrumenten* überwacht.

Zur Beurteilung der *Standesicherheit* einer Talsperre ist die Erfassung und Überprüfung der auftretenden Verformungen essentiell. Die Automatisierung der Bauwerksüberwachung ermöglicht die Übertragung und Protokollierung der Messdaten. Dadurch kann eine qualifizierte Aussage über den aktuellen *Zustand* des Sperrenbauwerkes unterstützt werden.

Aufgrund der Erfahrung im Betrieb einer Talsperre oder mit Hilfe von Vorhersagemodellen werden die *Alarmgrenzen* (Soll-Werte) festgelegt. Befinden sich beobachteten die Werte der Lotanlagen (Ist-Werte) innerhalb dieser Grenzen, ist die Standesicherheit der Sperre gegeben, andernfalls wird der *Talsperrenverantwortliche* verständigt. Dieser hat die Aufgabe die Situation zu beurteilen und die erforderlichen Maßnahmen einzuleiten.

## 1.1 Ziel der Arbeit

Ziel ist es, die Verformungen dieser Sperre *Großer Mühlendorfer See* (*Verbund Hydro Power AG*) mit *mathematischen Funktionen* beschreiben zu können. Mit der Kenntnis dieser Funktionen ist es möglich, die Verformungen für den jeweils herrschenden Randbedingungen (Wasserstand, Temperatur) vorherzusagen.

Im Detail handelt es sich in dieser Arbeit, um eine Analyse der radialen Verformungen die durch ein Pendel- und ein Schwimmot gemessen werden. Zur Nach-

bildung der Sperrverformungen wurde ein zweidimensionales *Finite Elemente*-Modell (FE-Modell) jenes Mauerquerschnittes erstellt, in dem die Lotanlagen installiert sind. Damit können die Auswirkungen der *Wasserlast* und der Einfluss der *Temperatur* auf die Gesamtverformung quantifiziert werden.

Mit den berechneten Verformungen der beiden Lastfälle und weiteren zustandsbeschreibenden Messerwerten (z.B. Betontemperatur, Pegelstand), werden mit Hilfe der hybriden Methode der *multiplen, linearen Regressionsanalyse* mehrere Regressionsmodelle zum Verformungsverhalten der Sperre erstellt. Die *hybride Regression* ist eine Mischform der *deterministischen* und *statistischen* Regression. Zur Modellbildung werden als Variablen die Verformungen aus der FE-Berechnung (deterministischer Anteil) und die Daten der weiterer Messwerte (statistischer Einfluss) verwendet.

## 1.2 Gliederung der Arbeit

Grundsätzlich werden zu Beginn der Arbeit die unterschiedlichen Aspekte betreffend der Bauwerksmodellierung und den Grundlagen der Regressionsanalyse getrennt und allgemein erarbeitet. In späteren Kapiteln werden sie zusammengeführt und ergeben die Lösung für das spezielle Problem der Arbeit.

In Kapitel 2 wird die *Konstruktion* der Sperre *Großer Mühdorfer See* und deren Besonderheiten beleuchtet. In Kapitel 3 wird die *Diskretisierung* des *FE-Modells* des maßgebenden Mauerquerschnittes und die Modellierung der *Lastfälle hydrostatischer Wasserdruck* und *Temperatureinwirkung* erläutert.

Die Grundlagen der *einfachen* und der *multiplen, linearen Regressionsanalyse* sowie die Möglichkeiten der statistischen Modellüberprüfung werden in Kapitel 4 besprochen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden in Kapitel 5 zur Erstellung der Regressionsmodelle genutzt. Zu diesem Zweck wird das Tabellenkalkulationsprogramm *Microsoft EXCEL*<sup>1</sup> sowie die Open Source Statistiksoftware *R*<sup>2</sup> eingesetzt. Des Weiteren werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der Regressionsmodelle besprochen und die Probleme der Modellfindung aufgezeigt.

---

<sup>1</sup> <http://office.microsoft.com/de-at/excel/> (Stand 11.04.2011)

<sup>2</sup> [www.r-project.org/](http://www.r-project.org/) (Stand 11.04.2011)

In Anbetracht dessen, dass ab dem Jahr 2014<sup>3</sup> durch das neue Pumpspeicherkraftwerk *Reißeck II* eine andere Speicherbewirtschaftung zu erwarten ist, werden in Kapitel 6 zwei mögliche *Bewirtschaftungskonzepte* vorgestellt. Die Auswirkungen auf die Mauerverformungen zufolge dieser Konzepte und der Vergleich mit den derzeitigen Verformungen sind im zweiten Teil dieses Kapitels zu finden. Die Arbeit wird in Kapitel 7 mit einer *Zusammenfassung* und mit einem *Fazit* abgeschlossen



**Abbildung 1.1:** Sperre *Großer Mühldorfer See*

---

<sup>3</sup> Vgl. Freitag u. a. (2011) S. 127

# 2 Sperre Großer Mühldorfer See

## 2.1 Allgemeines

Die *Verbund Hydro Power AG (VHP)* betreibt in Oberkärnten die Kraftwerksgruppen *Reißeck/Kreuzeck* und *Malta*. Der Speicher *Großer Mühldorfer See* ist Bestandteil des Jahresspeicherkraftwerkes der Kraftwerksgruppe *Reißeck/Kreuzeck*, welche zusätzlich noch aus den beiden Tagesspeicherkraftwerken *Kreuzeck* und *Reißeck* besteht. Das Wasser aus den verschiedenen Speichern wird im gemeinsamen Krafthaus in *Kolbnitz*<sup>4</sup> abgearbeitet und im Anschluss in die *Möll* abgeleitet.

Die Anlagen der Kraftwerksgruppe *Reißeck/Kreuzeck* wurden von der *Österreichischen Draukraftwerke AG (ÖDK)* geplant und in den Jahren 1948 bis 1961 errichtet. Der Baubeginn für die Sperre *Großer Mühldorfer See* war im Jahr 1955 und nach zweijähriger Bauzeit konnte mit dem Aufstau begonnen werden.<sup>5</sup>

## 2.2 Lage

Der Große Mühldorfer See ist einer von den sechs natürlichen, hochalpinen Karseen, welche im *Reißeckmassiv* (Hohe Tauern) liegen und die *Speicherstufe Reißeck* bilden (Abb. 2.1<sup>6</sup>).

Er liegt zusammen mit dem höher gelegenen *Kleinen Mühldorfer See* in einer nordwestlich ausgerichteten Furche. Am südöstlichen Ende dieser Furche wurde während der Eiszeit, der zur Talseite gerichtete Felsrücken vom Gletscher abgeschliffen. Die so entstandene Lücke wurde durch das diese Arbeit betreffende Sperrbauwerk gefüllt, um den Inhalt des Sees zu vergrößern und so wirtschaftlich nutzen zu können.<sup>7</sup>

---

<sup>4</sup> Gemeinde Reißeck

<sup>5</sup> Vgl. ATCOLD (1991) S. 126

<sup>6</sup> Quelle: Verbund (2005) S. 14

<sup>7</sup> Vgl. Horninger (1960) S. 261



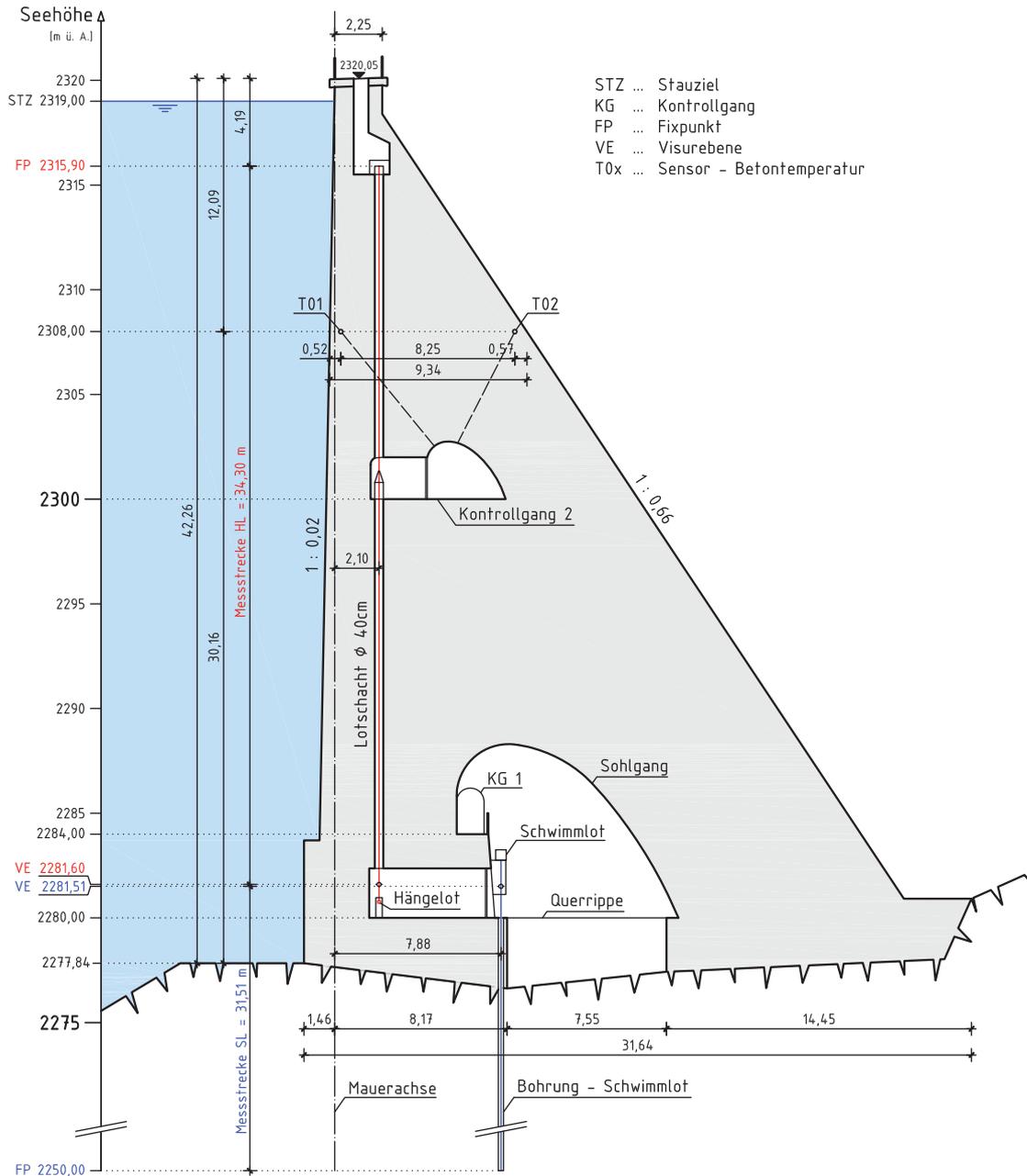


Abbildung 2.2: Sperre Großer Mühdorfer See – Querschnitt (Block 14)

## 2.4 Querschnitt

Im Querschnitt (siehe Abb. 2.2), fallen der obere *Kontroll-* sowie der *Sohlhohlgang* durch ihre *elliptische Gewölbeform* auf. Der Sohlhohlgang erstreckt sich zwischen Block 9 und Block 19 über eine Länge von 154 m und geht beiderseits in den unteren Kontrollgang über. In fünf der 33 Mauerblöcke wurde mit der geplanten Aushub-

Höhe Krone	2320,05 m ü. A.	max. Höhe	46,5 m
Länge Krone	432,7 m	max. Basisbreite	31,3 m
Neigung Luftseite	1 : 0,66	Kronenbreite	2,00 m
Neigung Wasserseite	1 : 0,02	Betonkubatur	152900 m <sup>3</sup>

**Tabelle 2.1:** Sperre *Großer Mühdorfer See* – Eckdaten [ATCOLD (1991) S. 125]

tiefe kein gesunder Fels erreicht, weshalb diese Blöcke tiefer gegründet worden sind. Durch den tieferen Aushub wurde es notwendig, je Block zwei 2,50 m breite *Querrippen* vom wasserseitigem zum luftseitigen Mauerfuß einzubauen, um die horizontalen Kräfte übertragen zu können und die Gleitsicherheit der wasserseitigen Mauerbasis zu garantieren.<sup>8</sup>

Ein auftretendes *Hochwasser* wird über einen *Kronenüberfall* abgeführt. Bei einem zulässigen Überstau von 0,74 m beträgt der maximale Abfluss 17 m<sup>3</sup>/s. Der *Grundablass* ist im Bereich des natürlichen Seeabflusses situiert und wird als Stahlrohrleitung mit einem Nenndurchmesser von 900 mm durch die Mauer geführt. Das Einlaufbauwerk mit einem Grob- und Feinrechen ist der Mauer vorgelagert. Eine Absperrklappe, die im Hohlraum zugänglich ist sowie ein Ringschieber (DN600), der in einer separaten Schieberkammer am luftseitigen Mauerfuß angeordnet wurde, bilden die zwei Absperrorgane des Grundablasses. Das maximale Abflussvermögen ist mit 4,2 m<sup>3</sup>/s beziffert und das Wasser schießt nach dem Ringschieber in einen ca. 30 m langen, unterirdischen Kanal, der es in Richtung des Mühdorfer Grabens weiterleitet.<sup>9 10</sup>

Die Oberfläche der Mauer wurde mit *Betonfertigteilen* hergestellt, welche gleichzeitig als Oberflächenschutz dienen. Die Abmessungen der Platten betragen 2,0 m mal 1,5 m, die Plattendicke beträgt 6 bis 10 cm. Durch die Höhe der Platten war somit auch die Schichthöhe für den Betoneinbau vorgegeben. Die Verwendung von Betonfertigteilen als verlorene Schalung stellte, zum Zeitpunkt der Errichtung; ein Novum in Österreich dar.<sup>11 12</sup>

<sup>8</sup> Vgl. Steinböck u. a. (1960) S. 272 ff

<sup>9</sup> Vgl. Steinböck u. a. (1960) S. 276 f

<sup>10</sup> Vgl. ATCOLD (1991) S. 125

<sup>11</sup> Vgl. Steinböck u. a. (1960) S. 275 f

<sup>12</sup> Vgl. Partl (1977) S. 94

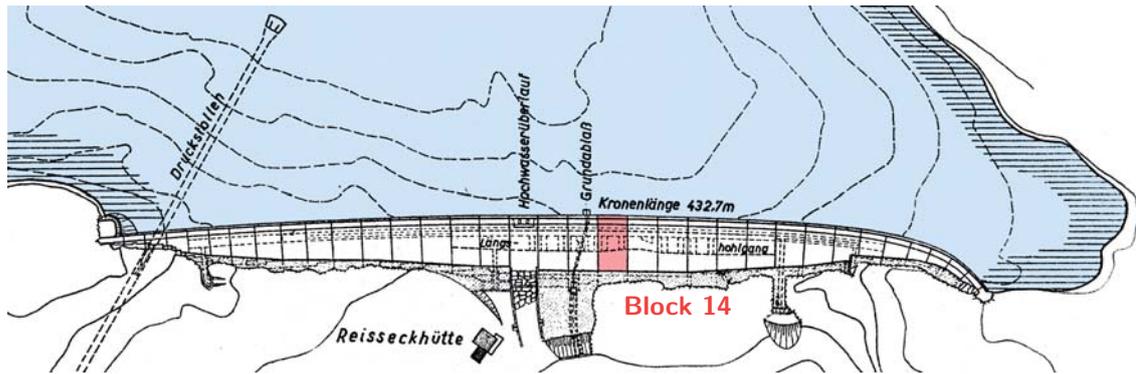


Abbildung 2.3: Sperre Großer Mühdorfer See – Lageplan der Sperrenstelle

## 2.5 Ausführung im Grundriss

Im Grundriss verläuft die Mauerachse parallel zur Furche, beginnend vom orographisch rechten Widerlager, als Kreisbogen (Radius = 2630 m) und geht nach ca. 2/3 der Kronenlänge in einen Korbbogen über, der in der linken Flanke endet. Die Mauer ist in 33 Blöcke, mit Blockbreiten von 10 bis 14 m unterteilt, welche weder verzahnt noch durch Injektionen miteinander verbunden sind. Um den luftseitigen Fuß der Mauer auf gesunden Fels (*porphyrischer Granitgneis*) gründen zu können, wurde die Achse soweit Richtung Wasserseite verschoben, bis dies möglich war.<sup>13</sup>

Abbildung 2.3<sup>14</sup> zeigt den Grundriss der Stauanlage und die Position von Block 14, in welchem die Lotanlagen und die Betontemperatursensoren untergebracht sind.

## 2.6 Bauwerksüberwachung

### 2.6.1 Allgemeines

In Österreich basiert die Überwachung und Überprüfung von Talsperren auf drei Ebenen<sup>15</sup>:

1. Eigenverantwortung der Betreiber (laufend),
2. Kontrolle durch das zuständige Amt der Landesregierung (jährlich) und
3. durch die österreichische Wasserrechtsbehörde, vertreten durch den Unterausschuss der Staubeckenkommission (alle 5 Jahre).

<sup>13</sup> Vgl. Steinböck u. a. (1960) S. 274

<sup>14</sup> Quelle: Steinböck u. a. (1960) S. 273

<sup>15</sup> Vgl. Czerny und Zenz (2010) S. 316 (Abb. 1)

Für die verantwortungsvolle Eigenüberwachung schreibt das *Wasserrechtsgesetz (WRG)* des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft für alle Staubauwerke, welche höher als 15 m sind oder deren aufgestautes Volumen größer als  $500\,000\text{ m}^3$  ist, einen *Talsperrenverantwortlichen* vor<sup>16</sup>. Dieser wird vom Betreiber der Anlage gestellt und hat Sorge zu tragen, dass ein sicherer und vorschriftsgemäßer Betrieb der Anlage gewährleistet ist<sup>17</sup>. Im *WRG* werden zusätzlich die Rechte und Pflichten des Talsperrenverantwortlichen geregelt.

Auf der Betreiberebene wird der Talsperrenverantwortliche vom *Sperrenwärter* unterstützt. Der Sperrenwärter kontrolliert vor Ort in regelmäßigen Abständen den Bauwerkszustand und führt, zusätzlich zu der automatischen Ablesung der Messpunkte, manuelle Messungen nach einem vorbestimmten Messprogramm durch und protokolliert diese.

Einmal pro Jahr werden die gewonnenen Erkenntnisse und Auswertungen der Messpunkte vom Talsperrenverantwortlichen in einem *Bericht* zusammengefasst. Dieser ist der zuständigen Behörde vorzulegen. Im Fall der Großen Mühldorfer Sperre ist die zuständige Behörde für die jährlichen Kontrollen das *Amt der Kärntner Landesregierung (Abt. 18 - Wasserwirtschaft)*. Unter die jährliche Kontrolle fällt auch eine Inspektion des Bauwerks mit den von der Behörde beauftragten Personen. Bei der Begehung wird neben der visuellen Kontrolle des Bauwerkszustandes auch die Funktionstüchtigkeit der Messeinrichtungen, der Messwertübertragung und der Einbauten (z.B. Öffnung des Grundablasses, siehe Abb. 2.4) überprüft.

Die *Staubeckenkommission* ist, als Bestandteil der Wasserrechtsbehörde, in Belangen betreffend der technischen Problemstellungen im Bereich der Planung und Errichtung von Talsperren und deren Überwachung verantwortlich. Zusätzlich stellt die Staubeckenkommission einen *Unterausschuss* mit Experten welche für die Überprüfung der Talsperren verantwortlich sind. Jene Talsperren, welche laut dem *WRG* zu überwachen und überprüfen sind, werden vom Unterausschuss in Zusammenarbeit mit dem Talsperrenverantwortlichen und dem Sperrenwärter im 5 - Jahres Rhythmus einer detaillierten Kontrolle unterzogen. Zu diesen Kontrollen zählen u. a. auch die Funktionsüberprüfung der Einbauten (Grundablass), die Kontrolle der Messwertübertragung und die Kontrolle ob bei Überschreiten der Grenzwerte der Alarm ausgelöst wird.<sup>18</sup>

Wird der Anlage ein positives Gutachten ausgestellt, ist der Betrieb ohne einschränkende Auflagen gestattet.

---

<sup>16</sup> Vgl. WRG (1959) § 23a(1)

<sup>17</sup> Vgl. WRG (1959) § 23a(1) (3)

<sup>18</sup> Vgl. Czerny und Zenz (2010) S. 314 ff



**Abbildung 2.4:** Sperre *Großer Mühlendorfer See* – Funktionsüberprüfung des Grundablasses

## 2.6.2 Bereitgestellte Daten

Die historischen Messaufzeichnungen der genannten Messpunkte sind von der *VHP* zur Verfügung gestellt worden. Es handelt sich dabei um die Tageswerte welche um 09:00 Uhr (MEZ) gemessen werden. Die bereitgestellten Daten stammen aus der Periode von Oktober 2007 bis Jänner 2011. Die im Datensatz nicht vorhandenen Werte wurden zwischen den angrenzenden Werten linear interpoliert. Die Messwerte des Schwimmlothes sind seit seiner Inbetriebnahme am 03. September 2009 vorhanden. Die Berechnungen und Analysen in dieser Arbeit erfolgten mit den Daten folgender Messeinrichtungen (die Kurzbezeichnungen in Klammern werden im Laufe der Arbeit immer wieder verwendet):

- Betontemperaturen (T01 und T02)
- Lufttemperatur (MT1)
- Pegel (PG1)
- Radialverformungen – Hängelot (HL1)
- Relativverschiebungen zwischen Untergrund und Sperre – Schwimmlothe (SL1)

## 2.6.3 Betontemperaturen – T01 und T02

Die Messung der Betontemperatur erfolgt durch jeweils einen Fühler an der Wasserseite (T01) bzw. Luftseite (T02). Um die Temperaturegeber im Mauerkörper in-

stallieren zu können, wurden vom oberen Kontrollgang aus Bohrlöcher soweit vortrieben, dass der Messhorizont auf 2308,00 m ü. A. liegt und die Betondeckung ungefähr 0,50 m beträgt. Zur Fixierung der Geber wurden die Bohrungen mit einer Zementsuspension injiziert. Im oberen Kontrollgang sind auch die zwei Anzeigen zur manuellen Werterfassung angebracht (Abb. 2.5).



Abbildung 2.5: Signalverarbeitung der Messstellen T01 und T02

## 2.6.4 Lufttemperatur – MT1

Die Lufttemperatur MT1 wird nicht direkt an der Staumauer gemessen, sondern beim ca. 500 m von der Mauer entfernten *Berghotel Reißbeck*.

## 2.6.5 Pegel – PG1

Der Pegel PG1 wird in der tiefer gelegenen Apparatenummer, in welcher die Druckrohrleitung der oberen drei Seen mit jener des *Großen Mühlendorfer Sees* zusammengeführt werden, gemessen. Hierfür wird eine Präzisionsdruckwaage verwendet. Die Funktion dieser Druckmessmethode, dem sogenannten *Quartzresonator-Prinzip*, beruht auf der Schwingung eines Quarzkristalls dessen Frequenz bei Druckänderung variiert<sup>19</sup>. Die jeweilige Frequenz wird in die Höhe des Wasserspiegels umgerechnet.

<sup>19</sup> Vgl. [http://www.rittmeyer.com/site/index.cfm?id\\_art=3083&vsprache=de](http://www.rittmeyer.com/site/index.cfm?id_art=3083&vsprache=de)  
Stand 20.04.2011

### 2.6.6 Hängelot – HL1

Das verbaute Hängelot hat eine Länge (gemessen zwischen dem Festpunkt und der Visurebene) von 34,30 m und verläuft in einem kreisrunden Schacht ( $\varnothing 0,4$  m). Man hat über Nischen vom oberen Kontrollgang bzw. vom Hohlraum aus Zutritt zum Lot. Die Technik zum manuellen und automatischen Ablesen der Lotauslenkung ist nur in der unteren Mauernische (Abb. 2.6) vorhanden. Die für die Bauwerksüberwachung einer Gewichtsmauer (große Länge der Mauer) aussagekräftigere radiale Komponente (HL1) ist jene, die in der Analyse Verwendung findet.



**Abbildung 2.6:** Hängelot – Messnische mit automatischer (unten) und manueller Ableseeinrichtung (oben)

### 2.6.7 Schwimmot – SL1

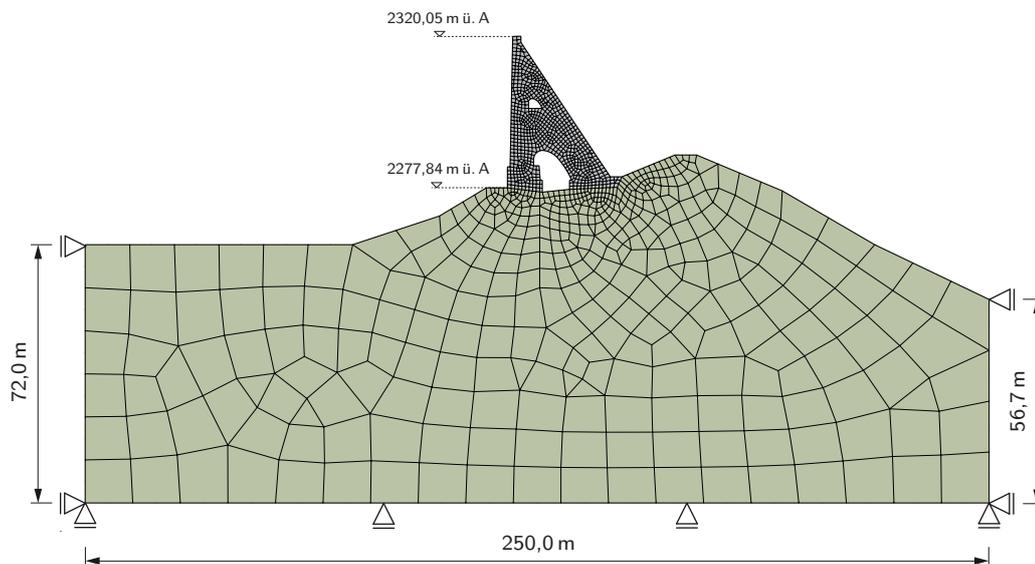
Um die horizontale Verschiebung zwischen dem Untergrund und der Sperre messen zu können, wurde im Jahr 2009 ein Schwimmot installiert. Der Draht ist am Ende einer ca. 25 m tiefen Bohrung im Fels fixiert. Die Messwerterfassung wird, wie beim Hängelot, automatisch in radialer und tangentialer Richtung durchgeführt. Die Verschiebungen können auch manuell mit dem *Koordiskop* ermittelt werden. Der Abstand zwischen dem Fixpunkt des Drahtes und der Visurebene beträgt 31,51 m. Wie beim Hängelot wird auch beim Schwimmot nur die radiale Komponente in der Regressionsanalyse betrachtet (SL1).



**Abbildung 2.7:** Schwimmot

### 3 FE – Modellierung

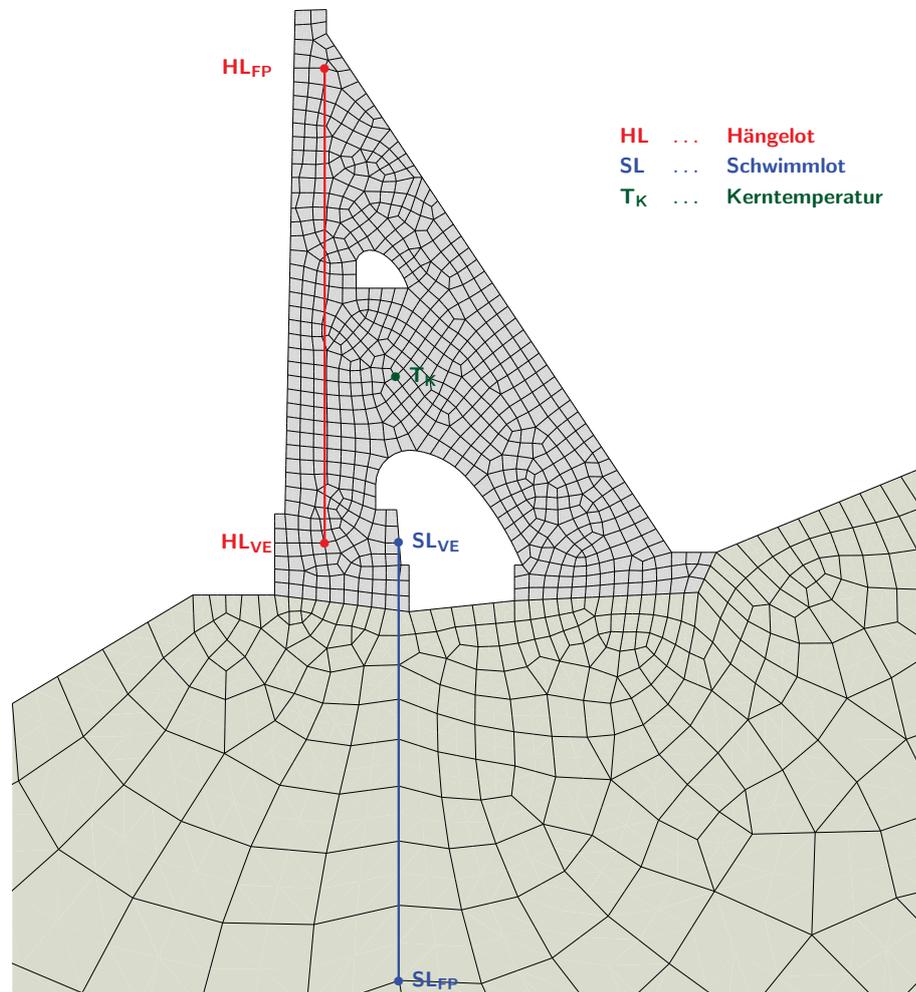
Die Berechnung der Verformungen zufolge Temperatur bzw. der hydrostatischen Wasserlast, welche in die Regressionsanalyse einfließen, wurden mit der Unterstützung der Finiten Elemente Methode berechnet. Die komplette FE- Analyse, Netzerstellung bis Ergebnisauswertung, ist mit der FE- Software *ABAQUS/CAE* durchgeführt worden. Das zweidimensionale Modell ist ein Schnitt durch den Block 14 der Staumauer und des Untergrundes in näherer Umgebung. Die Verbindung der Elemente der Mauer zu den Elementen im Untergrund wurde als mechanisch gekoppelt modelliert. Dadurch kann sich der wasserseitige Sperrenfuß nicht vom Fels abheben.



**Abbildung 3.1:** FE-Netz – gesamtes Modell

Da die Länge der Sperre entlang der Mauerachse um ein vielfaches Größer ist als die Höhe, bzw. die Breite, wird ein *ebener Verzerrungszustand* angenommen. Insgesamt wurde das Modell in 1142 Elemente mit 3592 Knoten unterteilt. Es sind für beide Bereiche des Netzes drei- und viereckige *plain strain* Elemente mit *quadratischen Verformungsansatz* verwendet worden. Das Elementnetz der Mauer wurde durch die Unterteilung des Umrisses in ein Meter lange Abschnitte generiert. Das Netz

des Felsuntergrundes wurde gröber gestaltet und zwar in Teile mit dreizehn Meter Länge. In der näheren Umgebung der Mauer wurde das Netz verfeinert und in der Aufstandsfläche wurde die gleiche Netzteilung wie bei der Mauer angewendet.



**Abbildung 3.2:** FE-Netz – Lage der relevanten Knoten

Für die äußere statische Bestimmtheit des Modells wurden drei Randbedingungen gesetzt. An den zwei vertikalen Abgrenzungen des Felsblockes wurde die Verschiebung in x-Richtung, an der unteren in y-Richtung gesperrt. Wie in Abbildung 3.1 ersichtlich ist, entsprechen diese Randbedingungen einer Lagerung auf beweglichen Lagern.

Die Verformung der Mauer wird in der Realität durch die Ausschläge der Lote angegeben. Im FE-Modell erreicht man dies durch setzen von Zwangspunkten, die genau an der Stelle der Lotpunkte liegen (siehe Abb. 3.2 und Tab. 3.1). An den Zwangspunkten wird bei der Netzgenerierung je ein Knoten gesetzt, deren Relativverschiebungen ausgelesen werden können. Daraus lässt sich die Verformung des Modells für jedes der beiden Lote berechnen.

Die Knoten des Schwimmlotes entsprechen nicht genau der Lage der Verankerungspunkte, denn die Konsole auf der das Schwimmlot angebracht ist, wurde nicht modelliert. Durch eine Parallelverschiebung des Schwimmlotes Richtung Wasserseite konnten die Knoten am bestehenden Mauerkörper gesetzt werden. Diese Abweichung der Lage um 0,42 Meter kann im Vergleich zur Wirklichkeit vernachlässigt werden, denn sie hat nur einen geringen Einfluss auf die Rechenergebnisse. Das kann damit begründet werden, da sich die Strecke zum Kippunkt am Mauerfuß nur verhältnismäßig gering erhöht. Andererseits werden mit der Regressionsanalyse die Verschiebungen des Schwimmlotes aus der FE-Rechnung, welche durch die Parallelverschiebung tendenziell trotzdem noch mit den realen Messwerten übereinstimmen, an die gemessenen Werte angepasst.

	Knoten Bez.	Höhe ü. Adria	Anm.
<b>HL</b>	<b>FP</b>	2315,90	Fixpunkt
	<b>VE</b>	2281,60	Visurebene
<b>SL</b>	<b>FP</b>	2250,00	Fixpunkt
	<b>VE</b>	2281,51	Visurebene

**Tabelle 3.1:** FE-Netz – Absolute Höhen der Knoten der Lotanlagen

## 3.1 Berechnungszeiträume

In Abhängigkeit vom Wasserspiegel (PG1) wurden zur besseren Durchführbarkeit der Berechnung vier Zeiträume eingeführt. Dies war notwendig, weil die verschiedenen Analysen und Berechnungen auf der jeweiligen Charakteristik des Wasserspiegelverlaufes aufbauen (siehe Abb. 3.3). Die Einzelheiten werden nun genauer beleuchtet:

- **Zeitraum 1**

Hier handelt es sich um die Periode vom 19.10.2007 bis 04.10.2010, die einer Länge von 1082 Tagen entspricht. Wenn man den Verlauf des Wasserspiegels betrachtet fällt auf, dass im Jahr 2008 der See komplett entleert wurde. Nach dem annähernden Wiedererreichen des Vollstaus, wurde in den Frühlingsmonaten der zwei folgenden Jahre, das Jahresminimum des Wasserspiegels erreicht. Diese Speicherbewirtschaftung entspricht der Charakteristik eines Jahresspeichers.

- **Zeitraum 2**

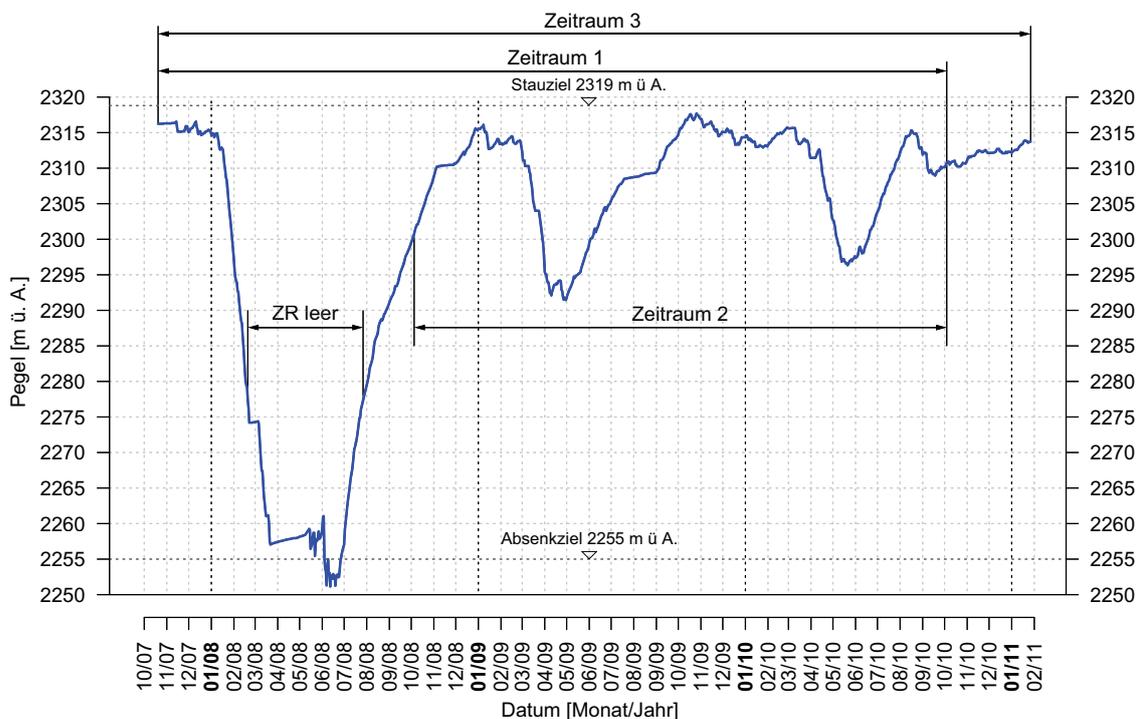
Dieser Zeitraum umfasst die Zeit vom 04.10.2008 bis 04.10.2010 und repräsentiert den Normalbetrieb des Jahresspeichers.

- **Zeitraum 3**

Der Zeitraum 3 ist mit einer Länge von 1197 Tagen vom 19.10.2007 bis 27.01.2011 definiert und stellt somit den verlängerten Zeitraum 1 bis Ende Jänner 2011 dar.

- **Zeitraum leer**

Bei der Speicherentleerung im Jahr 2008 befand sich der Pegel vom 19. Februar bis 26. Juli unterhalb der Mauerbasis, wodurch dieser Zeitraum fixiert ist. Die Deformation der Sperre resultiert daher ausschließlich aus den Einflüssen der Umgebungstemperatur.



**Abbildung 3.3:** Verlauf des Wasserspiegels und Einteilung der verschiedenen Zeiträume

## 3.2 Thermisches Modell

In *ABAQUS* wird die Verformung zufolge Temperatur auf der Grundlage eines Temperaturfeldes berechnet. Hierfür wurde das gleiche Netz wie für die mechanische

Berechnung verwendet, mit dem Unterschied, dass bei der Berechnung der Temperaturverläufe *heat transfer*-Elemente zur Anwendung kamen. Sie sind nur für den Wärmetransport über den Querschnitt zuständig und werden in *ABAQUS* mit *DC2D8* (viereckig, quadratische Ordnung) und *DC2D6* (dreieckig, quadratische Ordnung) bezeichnet. Die Temperaturverteilung über den Querschnitt wurde, für jeden einzelnen Tag, ausgehend von einer sogenannten Initialtemperatur ermittelt. Das Temperaturfeld wurde nur für die Mauer berechnet, da es für den Untergrund keine Daten gibt.

Kennwert	Einheit	Sperrenbeton
spez. Wärmekapazität	$[J/(kg \cdot K)]$	879,0
Wärmeleitfähigkeit	$[J/(K \cdot m \cdot s)]$	2,5

**Tabelle 3.2:** Materialkennwerte des thermischen FE-Modells

### 3.2.1 Initialtemperatur des Betons

Über die Jahre in der die Mauer besteht, in diesem Fall sind es mittlerweile 54 Jahre, schwankt die mittlere Betontemperatur innerhalb gewisser Grenzen. Da die Hydratation des Betons abgeschlossen ist, wird die Betontemperatur nur mehr durch die äußeren, jahreszeitlich bedingten Gegebenheiten und die Speicherbewirtschaftung beeinflusst. Zur Erreichung realistischer Ergebnisse ist es wichtig, bei der Berechnung des Temperaturfeldes die Betontemperatur so schnell wie möglich an die wahren Verhältnisse heranzuführen. *ABAQUS* bietet für diesen Zweck die Definition der sogenannten *Initialtemperatur* an.



**Abbildung 3.4:** Ablauf der Temperaturfeldberechnung

### Abschätzung von $T_{\text{init},1}$

Für die Berechnung des Initialtemperaturfeldes ( $T_{\text{init},2}$ ) wurde ebenfalls eine Starttemperatur ( $T_{\text{init},1}$ ) benötigt, um das stabile Temperaturfeld so rasch wie möglich zu erreichen (siehe Abb. 3.4).

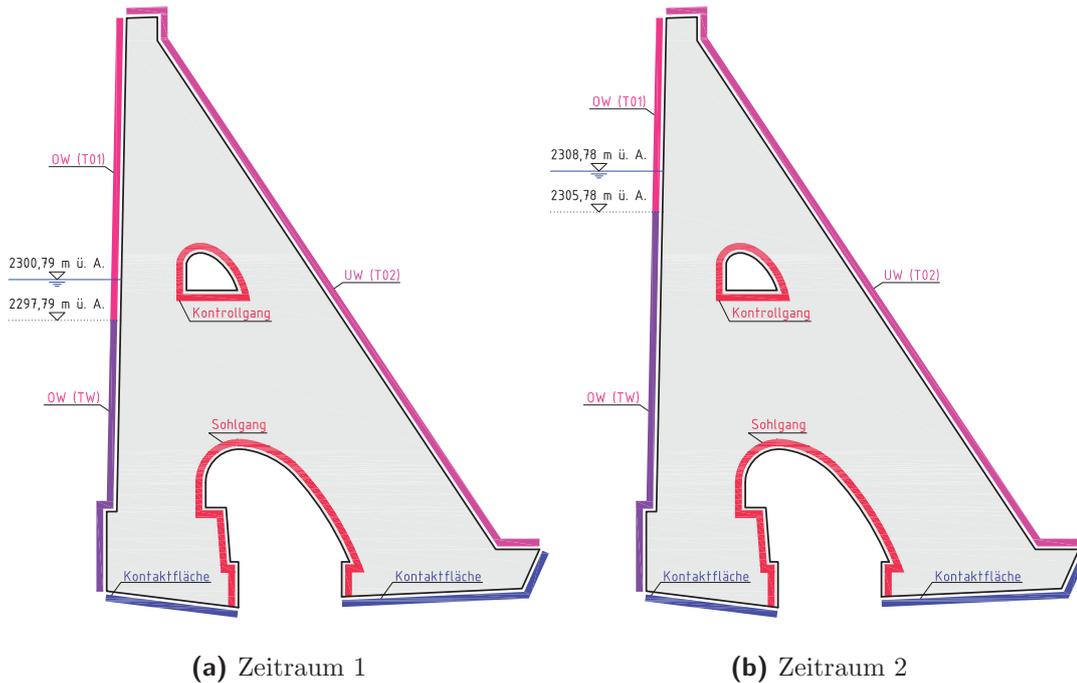
Die Abschätzung von  $T_{\text{init},1}$  wurde für zwei Zeiträume durchgeführt. Es wurde je eine Variante für den Zeitraum 1 ( $T_{\text{init},1,1}$ ) und den Zeitraum 2 ( $T_{\text{init},1,2}$ ) erstellt. Bei den Berechnungen sind die Mittelwerte, der jeweiligen Zeiträume, von der Lufttemperatur und den zwei Betontemperaturen verwendet worden. Die konstanten Werte für die Wassertemperatur, der Temperatur in der Fundierung und der Temperatur im Kontroll- bzw. Sohlgang fanden ebenfalls Einzug in die Berechnung (siehe Tab. 3.3).

Wie die genannten Temperaturen entlang des Querschnittes aufgeteilt sind, ist in der Abbildung 3.5 ersichtlich. Im Zeitraum 1 ist der Mittelwert des Pegels um ca. 8 m geringer, weil in diesem Zeitraum der Stausee komplett entleert wurde (siehe Abb. 3.3). Die Teilstrecke des über dem Wasserspiegel liegenden Bereichs der Wasserseite (OW (T01)) wurde bis drei Meter unter die Wasseroberfläche geführt.

	Zeitraum 1			Zeitraum 2		
	L	T	L · T	L	T	L · T
Teilstrecke	[m]	[°C]	[°C · m]	[m]	[°C]	[°C · m]
UW (T02)	52,07	5,92	308,25	52,07	5,92	308,25
OW (T01)	22,27	7,13	158,79	14,28	7,57	108,11
OW ( $T_{\text{Wasser}}$ )	20,69	5,00	103,45	28,68	5,00	143,40
Kontaktfläche	26,06	4,00	104,24	26,06	4,00	104,24
Sohlgang	30,44	8,00	243,52	30,44	8,00	243,52
Kontrollgang	11,15	8,00	89,20	11,15	8,00	89,20
$\Sigma$	162,68	-	1007,46	162,68	-	996,73
	$T_{\text{init},1,1} = \frac{1007,46}{162,68} = 6,19 \text{ °C}$			$T_{\text{init},1,2} = \frac{996,73}{162,68} = 6,13 \text{ °C}$		

**Tabelle 3.3:** Berechnung der Betontemperaturen

Auf der Grundlage dieser Abschätzung wurde der Wert für  $T_{\text{init},1}$  gewählt mit  $6,20 \text{ °C}$  festgesetzt



**Abbildung 3.5:** Aufteilung der Temperatureinflüsse entlang des Querschnittes

### Ermittlung von $T_{\text{init},2}$

Diese Simulation dient zur Findung des endgültigen Initialtemperaturfeldes ( $T_{\text{init},2}$ ). Hierfür wurde der Zeitraum 2, welcher den Normalbetrieb präsentiert, zwei mal wiederholt. Insgesamt entspricht dies einer Zeit von 6 Jahren. Im Gegensatz zur Berechnung von  $T_{\text{init},1}$  wurde die tatsächliche Ganglinie des Wasserspiegels verwendet.

In den Kontrollgängen wurde keine Randbedingung gesetzt. In *ABAQUS* bedeutet dies, dass die Temperaturberechnung im Bereich der Kontrollgänge als adiabatisch vollzogen wird. Somit findet keine thermische Interaktion zwischen dem Sperrenbeton und der Luft statt.

Um entscheiden zu können ab welchem Zeitpunkt sich das Temperaturfeld den „natürlichen“ Gegebenheiten angepasst hat, wurde der Temperaturverlauf eines Knotens im Kern des Mauerquerschnittes (Knoten  $T_K$  in Abbildung 3.2) betrachtet. Zwei Simulationen mit unterschiedlichen Starttemperaturen wurden dafür durchgeführt.

In der ersten Variante wurde mit  $T_{\text{init},1,\text{gewählt}} = 6,20^\circ\text{C}$  aus der Abschätzung (Tab. 3.3) begonnen und bei der zweiten mit  $T_{\text{init},1,\text{angenommen}} = 5,50^\circ\text{C}$ . Es zeigte sich, dass sich nach der ersten Wiederholung die zwei Kurven der Knotentemperatur mit den unter-

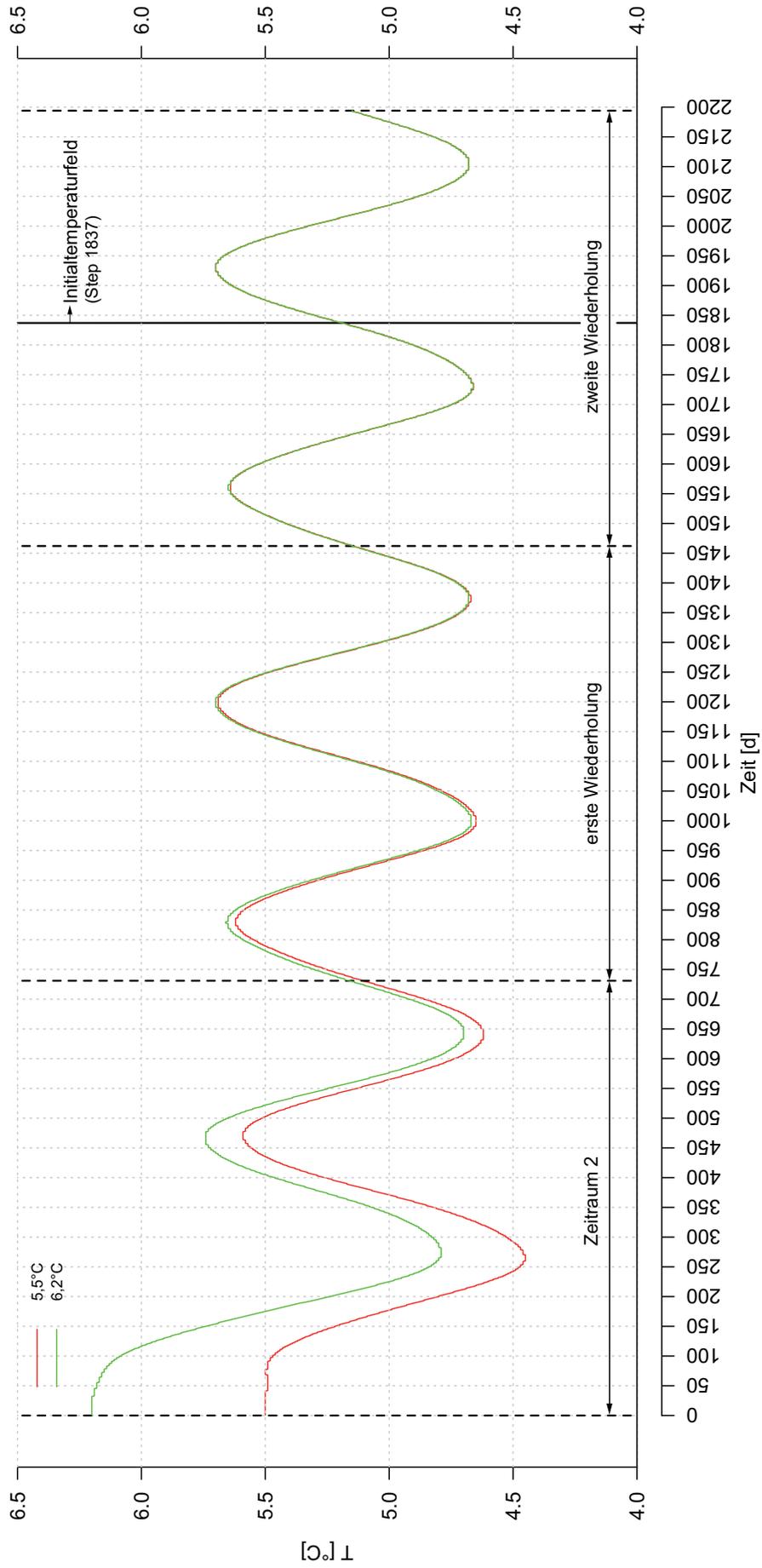


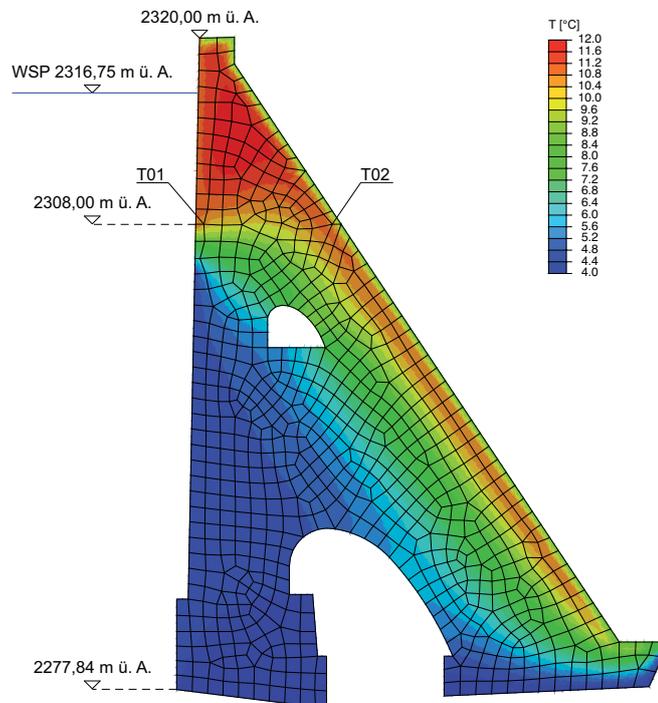
Abbildung 3.6: Verlauf der Knotentemperatur für den Zeitraum 2 und dessen Wiederholungen

schiedlichen Starttemperaturen nur mehr geringfügig unterscheiden (siehe Abb. 3.6). Während der zweiten Wiederholung gleichen sich die Werte bis zur zweiten Nachkommastelle, womit das Kriterium des natürlichen Temperaturfeldes als erfüllt betrachtet werden kann.

Der Übergang des Temperaturfeldes von  $T_{init,2}$  auf jenes vom Zeitraum 1 sollte möglichst gemäßigt erfolgen, weil die Starttage (Datum) der Zeiträume nicht die selben sind. Aus diesem Grund wurde im Zeitraum 2 ein Tag ausgesucht, der jahreszeitlich gesehen im gleichen Bereich liegt und dessen Messwerte dem Step 1 im Zeitraum 1 am nächsten sind. Als  $T_{init,2}$  wurde schlussendlich der Step 1837 aus der vorherigen Simulation ausgewählt. Folgende Kriterien wurden für diese Wahl herangezogen:

Kriterium	$T_{init,2}$	Step 1 im Zeitraum 1
T01 [°C]	10,9	9,1
T02 [°C]	8,8	9,3
PG1 [m ü. A.]	2316,75	2316,25
HL1 [mm]	5,5	5,0
Datum	19.10.2007	13.10.2009

**Tabelle 3.4:** Gegenüberstellung der Auswahlkriterien



**Abbildung 3.7:** Temperaturfeld - Initialzustand ( $T_{init,2}$ )

### 3.2.2 Endgültiges Temperaturfeld für die Verformungsberechnung

Das Temperaturfeld wurde für jeden Tag des Zeitraum 1 berechnet. Der Umfang des Mauerquerschnittes wurde in drei Abschnitte unterteilt, welche gleichzeitig die einzelnen Randbedingungen darstellen. Dies sind:

1. die Oberwasserseite,
2. die Unterwasserseite mit Mauerkrone und
3. die Aufstandsfläche.

Die Randbedingungen an der Ober- und Unterwasserseite übergeben die gemessenen Temperaturen der jeweiligen Temperaturfühler an das Modell. Dies ist ohne Adaption der Messwerte möglich, weil die Fühler oberflächennahe eingebaut sind und folglich stellt sich die Außentemperatur im Bereich der Fühler relativ schnell ein. Wie in der Berechnung von  $T_{\text{init},2}$  wurde in den Kontrollgängen keine thermische Interaktion mittels der Randbedingungen gesetzt, was wiederum eine adiabatische Berechnung bedeutet.

#### Oberwasserseite

Nach der Analyse der Werte von den Messstellen T01 (Betontemperatur Wasserseite) und PG1 (Pegel) hat sich herausgestellt, dass der Einfluss der Temperatur auf die oberwasserseitige Sperrenfläche in Abhängigkeit vom Wasserspiegel nachgebildet werden muss. In einer Subroutine wurden zwei Fallunterscheidungen, in Abhängigkeit des Pegels, implementiert:

1. **PG1 < 2308 m ü. A. :**

Befindet sich der Pegel unterhalb des Sensors, wird T01 wegen der relativ geringen Betondeckung stark von der Lufttemperatur der Umgebung beeinflusst. Dieser Zusammenhang wird in der Subroutine so geregelt, dass der Messwert von T01 ab der Krone bis zum Wasserspiegel reicht und um einen gemäßigten Übergang zwischen den beiden Temperaturen zu schaffen, wurde eine Strecke eingeführt, auf der T01 linear an die Wassertemperatur angepasst wird.

2. **PG1 ≥ 2308 m ü. A. :**

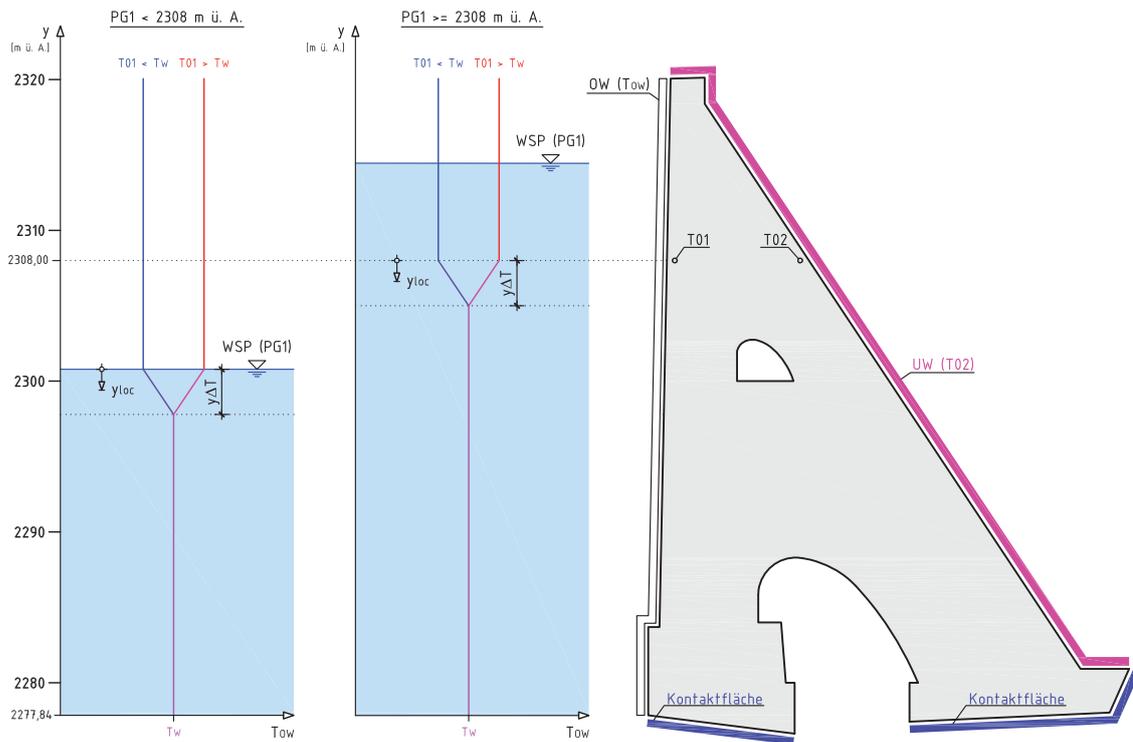
Wenn sich der Wasserspiegel oberhalb des Sensors befindet nimmt T01 nicht sofort die Wassertemperatur an, sondern nähert sich dieser nur langsam. Aus diesem Grund wird der Temperaturverlauf der Randbedingung von der Krone

abwärts bis auf die Höhe der Sensoren mit T01 beaufschlagt, um sich auf der Übergangstrecke der Wassertemperatur zu nähern.

Der lineare Temperaturübergang wird durch folgende Beziehung angenähert:

$$T_{(yloc)} = T_W \cdot \frac{yloc}{y \Delta T} + T01 \cdot \frac{y \Delta T - yloc}{y \Delta T} \quad (3.1)$$

- $T_{(yloc)}$  ... Temperatur im Übergangsbereich
- $T_W$  ... Wassertemperatur (= 4,5 °C)
- $T01$  ... oberwasserseitige Betontemperatur
- $yloc$  ... lokale Laufvariable
- $y \Delta T$  ... Mächtigkeit des Übergangsbereiches (= 4,0 m)



**Abbildung 3.8:** Thermisches Modell - Randbedingungen

Die Laufvariable  $yloc$  ist im Übergangsbereich definiert, dessen Mächtigkeit mehrere Meter erreichen kann<sup>20</sup>. In den Berechnungen wurden für die Variablen  $y \Delta T$  und  $T_W$  konstante Werte von 4,0 m bzw. 4,5 °C angenommen.

<sup>20</sup>Vgl. Widmann (1999) S. 289

## Unterwasserseite

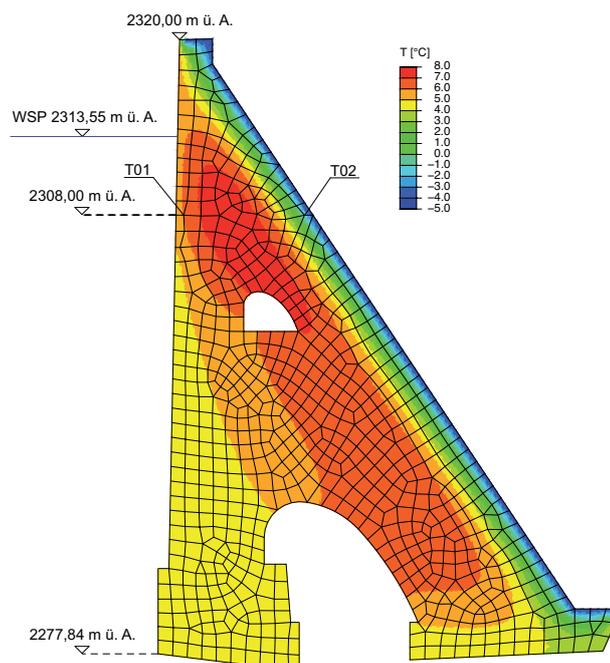
Für diese Randbedingung wurden die Werte vom Sensor T02 verwendet, weil keine weitere Messtelle für die unterwasserseitige Betontemperatur vorhanden ist. Die Randbedingung erstreckt sich von der Kronenoberseite bis zur Plombe am Mauerfuß (siehe Abb. 3.8).

## Aufstandsfläche

Die Temperatur in der Aufstandsfläche wurde über den gesamten Berechnungszeitraum mit  $4^{\circ}\text{C}$  angenommen.

## Beispiel zum Temperaturfeld

Ein Beispiel für das Temperaturfeld der Mauer ist in der Abbildung 3.9 dargestellt. An der Unterwasserseite (T02) herrscht eine Temperatur von  $-4,7^{\circ}\text{C}$  und in der Aufstandsfläche beträgt der Temperaturwert für die gesamte Berechnung konstant  $4^{\circ}\text{C}$ . Der Wasserspiegel befindet sich auf  $2313,55\text{ m ü. A.}$ , folglich tritt für die Temperaturverteilung an der oberwasserseitigen Randbedingung der zweite Fall ein. Das bedeutet, dass bis zur Höhe des Betontemperaturfühlers der gemessene Wert von T01 ( $5,6^{\circ}\text{C}$ ) aufgebracht wird. Unterhalb der Kote  $2308,00\text{ m ü. A.}$  beginnt der Übergangsbereich, in dem sich die Temperatur von T01 der Wassertemperatur  $T_W$  annähert.  $T_W$  wirkt ab dem Übergangsbereich bis zur Mauerbasis.



**Abbildung 3.9:** Beispiel für das Temperaturfeld (Step 796)

### 3.3 Mechanisches Modell

Mit diesem Modell wurden die eigentlichen Verformungsberechnungen über den Zeitraum 1 durchgeführt. Wie bereits zu Beginn des Kapitels 3 erwähnt wurde, ist die Länge der Mauer um das Vielfache größer als die Breite bzw. Höhe. Dem zufolge kamen für die mechanische Berechnung *plain strain*-Elemente, quadratischer Ordnung, mit viereckiger (*CPE8R*) und dreieckiger (*CPE6*) Form zur Anwendung. Die verwendeten Materialeigenschaften der beiden Materialien Beton und Fels sind in der Tabelle 3.5 aufgelistet.

Kennwert	Einheit	Sperrenbeton	Fels (Granitgneis)
Wichte	[MN/m <sup>3</sup> ]	0,024	0,027
E-Modul	[MPa]	20000	15000
Poisson'sche Zahl ( $\nu$ )	[-]	0,17	0,17
Wärmeausdehnungskoeff. ( $\alpha$ )	[1/K]	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$

**Tabelle 3.5:** Materialkennwerte des mechanischen FE-Modells

Da die Lote nach der Fertigstellung der Mauer eingebaut wurden, hat der Lastfall Eigengewicht keinen Einfluss mehr auf die gemessenen Verformungen. Folglich wurde bei der Modellierung und Berechnung das Eigengewicht vernachlässigt.

Die simulierte Gesamtverformung setzt sich somit aus zwei Teilen zusammen. Der erste Anteil wird dem Einfluss aus der Temperatur zugeschrieben, welcher auf Grundlage des zuvor vorgestellten Temperaturfeldes (siehe Abschnitt 3.2.1) berechnet wurde. Der zweite Teil kommt aus der Wasserlast. Der gemessene Pegel wurde in einer Subroutine in den entsprechenden hydrostatischen Wasserdruck umgerechnet und als Randbedingung an der Oberwasserseite aufgebracht.

Eine Belastung die aus dem Sediment welches sich im Stauraum absetzt, ist im Modell nicht aufgebracht worden. Dies kann damit begründet werden, dass die Mauer auf dem Felsrücken steht und sich somit nicht im Einflussbereich des Sediments befindet. Die Eislast wurde ebenfalls vernachlässigt, weil in den Wintermonaten eine Luftperlanlage betrieben wird. Des weiteren wurden destabilisierende Lasten, welche durch den Auftrieb entstehen, bei der Berechnung nicht berücksichtigt.

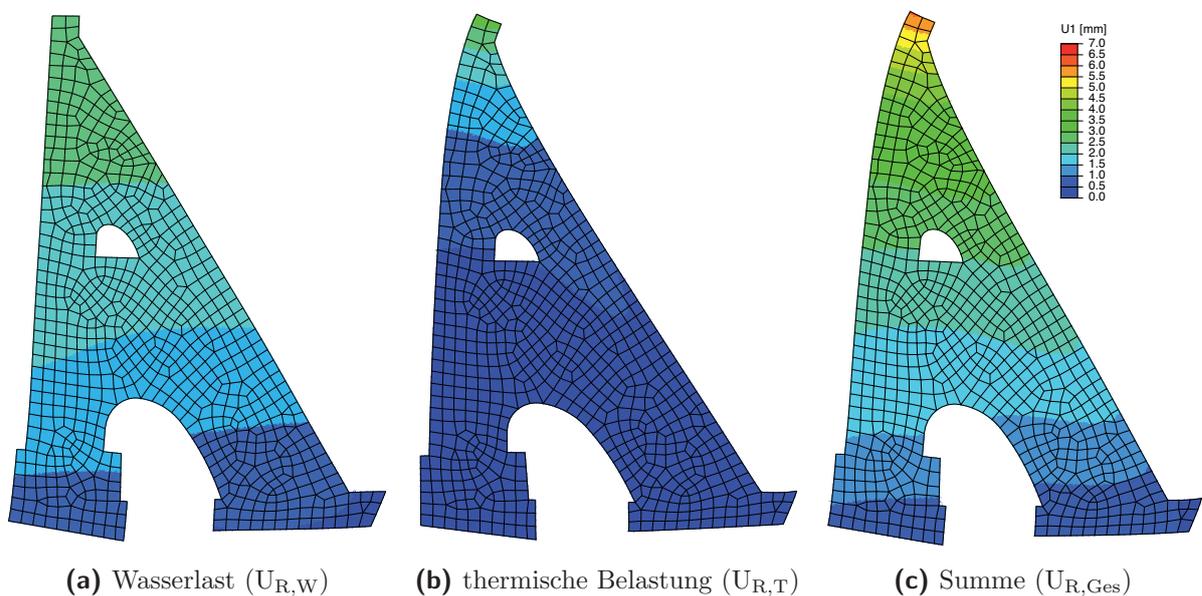
Um die Verformungsanteile trennen zu können wurde die Berechnung in zwei Schritte unterteilt. Im Ersten wirkte nur die Wasserlast und im zweiten Schritt hat die

Wasserlast kombiniert mit der Temperatur die Gesamtverformung beeinflusst. Die Trennung der Gesamtverformung in die Einzelteile kann durch die Annahme, dass sich die gesamte Berechnung im linear - elastischen Bereich abspielt, folgendermaßen durchgeführt werden:

$$U_{R,T} = U_{R,Ges} - U_{R,W} \quad (3.2)$$

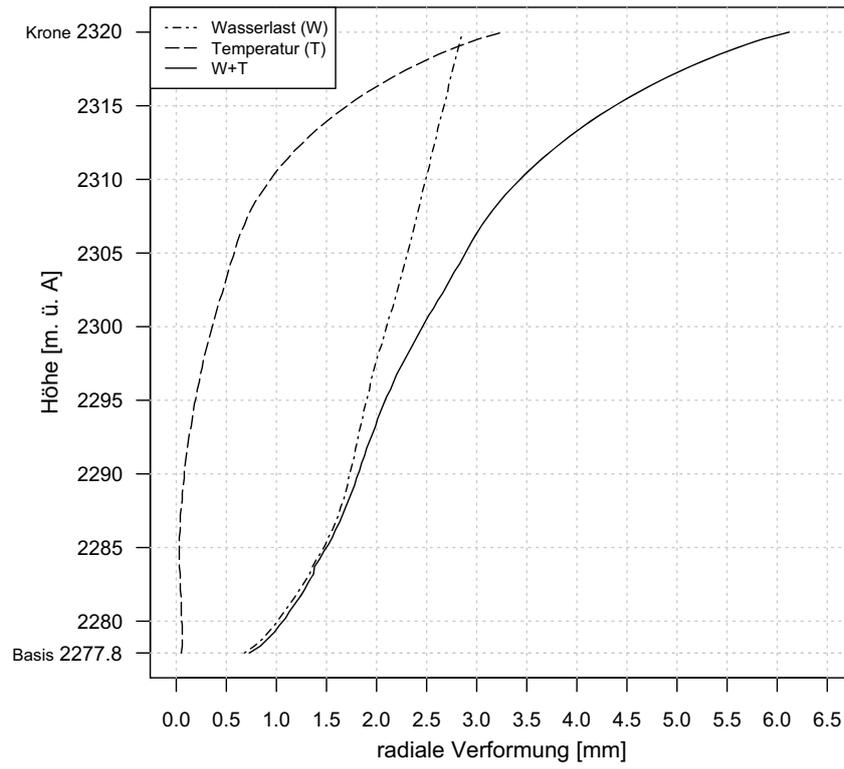
- $U_{R,T}$  ... rechnerische Verformung in radialer Richtung,  
zufolge des Temperatureinflusses
- $U_{R,W}$  ... rechnerische, radiale Verformung zufolge der Wasserlast
- $U_{R,Ges}$  ... rechnerische Gesamtrradialverformung

Die Teilverformungen wurden nach dem oben genannten Schema für die Knoten der jeweiligen Lotanlage ermittelt. Die rechnerischen „Ablesewerte“ der Lote ( $U_{R,T}$  und  $U_{R,W}$ ) wurden durch Subtrahieren der entsprechenden Knotenverschiebungen gebildet. In der Regressionsanalyse fließen die Verformungsanteile in die Regressionsfunktionen ein.



**Abbildung 3.10:** 1000-fach überhöhte Darstellung der Verformungsanteile (Step 796)

Die Abbildung 3.10 zeigt die einzelnen Verformungsfiguren für das zugehörige Temperaturfeld, welches in der Abbildung 3.9 dargestellt ist. In der Abbildung 3.11 werden die Verformungen der Sperrenwasserseite zufolge der Lastfälle dargestellt.



**Abbildung 3.11:** Verformung der Wasserseite über die Höhe der Sperre (Step 796)

## 4 Regressionsanalyse

Die Regressionsanalyse ist in der Statistik ein weitverbreitetes Analyseverfahren. Das Grundprinzip dieser Methode ist, dass die Zusammenhänge zwischen einer abhängigen Variablen (Regressand) und einer oder mehreren unabhängigen Variablen (Regressoren) untersucht werden. Wird nur eine unabhängige Variable verwendet, spricht man von der *Einfachregression*. Komplexere Modelle lassen sich meist nur durch mehrere Regressoren mit einer annehmbaren Genauigkeit bilden – dies ist die *multiple Regressionsanalyse*.<sup>21</sup>

In den folgenden Abschnitten wird nur die lineare Regression erwähnt, da ausschließlich diese Form der Regressionsanalyse zur Anwendung kam.

Die Definition der Regressionsfunktion durch die unabhängigen Variablen kann auf unterschiedliche Art und Weise formuliert werden:

- **Statistische Methode:** Bei dieser Art der Regression werden die gemessenen Regressoren welche ausschließlich durch mathematische Funktionen approximiert werden, zu einem Modell zusammengefasst. Für diese Methode wird eine lange und möglichst lückenlose Messperiode aus der Vergangenheit vorausgesetzt. Zum Beispiel kann die Wirkung der hydrostatischen Last auf die Verformung durch eine Funktion dargestellt werden.<sup>22</sup>
- **Deterministische Methode:** Hier werden die physikalischen Zusammenhänge mit mechanischen Modellen formuliert. Im Unterschied zu den Prognosefunktionen des statistischen Ansatzes werden die Einflüsse auf das Verhalten einer Sperre (Stauspiegel, Temperatur, Untergrund, Geometrie, . . .) durch eine FE-Simulation unter der Einbeziehung der Materialgesetze berechnet. Wenn man das vorherige Beispiel aufgreift bedeutet dies, dass mit dieser Methode die Mauerverformung mit der FE-Methode und den genannten Randbedingungen berechnet wird. Diese Verformungen werden als Regressoren verwendet.<sup>23</sup>

---

<sup>21</sup> Vgl. Backhaus u. a. (2011) S. 56 ff

<sup>22</sup> Vgl. STK (2010) S. 15

<sup>23</sup> Vgl. STK (2010) S. 14 f

- **Hybride Methode:** In dieser Arbeit ist die abhängige Variable die radiale Auslenkung eines Lotes. Die Regressoren sind der Pegel, die Betontemperaturen, die Lufttemperatur und die gerechneten Verformungen ( $U_{R,T}$  und  $U_{R,W}$ ) aus *ABAQUS*. Man spricht hier somit von einem *hybriden Modell*, welches die zwei genannten Methoden miteinander kombiniert.<sup>24</sup>

## 4.1 Einfache Regression

Der Ansatz für die einfache Regression lautet<sup>25</sup>:

$$\hat{y}_k = b_0 + b_1 x_k \quad (k = 1, 2, \dots, K) \quad (4.1)$$

$$e_k = y_k - \hat{y}_k \quad (4.2)$$

$\hat{y}_k$	...	Schätzwerte der abhängigen Variablen
$y_k$	...	Beobachtungswerte der abhängigen Variablen
$b_0$	...	konstantes Glied
$b_1$	...	Regressionskoeffizient
$x_k$	...	Werte der unabhängigen Variablen
$e_k$	...	Residuen
$K$	...	Zahl der Beobachtungen

Die Abweichungen der beobachteten Werten ( $y_k$ ) zu den Schätzwerten ( $\hat{y}_k$ ) der Regressionsfunktion (*Regressionsgerade*) werden als Residuen ( $e_k$ ) bezeichnet (Gl. (4.2)). Die *Residuen* stellen die von der Regressionsfunktion nicht quantifizierten Einflüsse auf die geschätzten Werte dar. Um eine möglichst gute Annäherung an die beobachteten Werte zu erreichen, müssen die einzelnen Abweichungen so klein wie möglich werden.<sup>26</sup>

Hierfür kommt die *Methode der kleinsten Quadrate* (*KQ-Schätzung*) zum Einsatz, welche die Summe der Quadrate der Residuen minimiert (siehe Gl. (4.4))<sup>27</sup>.

$$S = \sum_{k=1}^K e_k^2 \quad (4.3)$$

$$S = \sum_{k=1}^K [y_k - (b_0 + b_1 x_k)]^2 \rightarrow \min! \quad (4.4)$$

<sup>24</sup> Vgl. STK (2010) S. 16

<sup>25</sup> Vgl. Backhaus u. a. (2011) S. 63 ff

<sup>26</sup> Vgl. Backhaus u. a. (2011) S. 65

<sup>27</sup> Vgl. Backhaus u. a. (2011) S. 67

Durch partielle Differentiation der Gleichung (4.4) nach  $b_0$  und  $b_1$  und anschließendem Nullsetzen der so entstandenen Gleichungen erhält man ein Gleichungssystem, dessen Lösung die Gleichungen 4.7 und 4.8 ergeben<sup>28</sup>:

$$\frac{\delta S}{\delta b_0} = 2 \sum (y_k - b_0 - b_1 x_k)(-1) = 0 \quad (4.5)$$

$$\frac{\delta S}{\delta b_1} = 2 \sum (y_k - b_0 - b_1 x_k)(-x_k) = 0 \quad (4.6)$$

$$b_1 = \frac{K \sum (x_k y_k) - \sum (x_k) \sum (y_k)}{K \sum (x_k^2) - \sum (x_k)^2} \quad (k = 1, 2, \dots, K) \quad (4.7)$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x} \quad (4.8)$$

Mit diesem Ablauf werden die zuvor unbekanntenen Regressionsparameter  $b_0$  (konstantes Glied) und  $b_1$  (Regressionsparameter) so bestimmt, dass das *KQ-Kriterium* eingehalten wird<sup>29</sup>. In der Gleichung (4.8) sind die Variablen  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  als Mittelwerte zu verstehen. Wendet man den Ansatz (Gl. (4.1)) mit den Parametern ( $b_0$  und  $b_1$ ) und den beobachteten Werten ( $x_k$ ) an, so erhält man für jede Beobachtung den entsprechenden Schätzwert  $\hat{y}_k$ .

## 4.2 Multiple Regression

Komplexere Zusammenhänge lassen sich meist nur durch die Einbindung zusätzlicher unabhängiger Variablen in die Regressionsfunktion darstellen. Dadurch erweitert sich der Regressionsansatz wie folgt:

$$\hat{y}_k = b_0 + b_1 x_{1k} + b_2 x_{2k} + \dots + b_j x_{jk} + \dots + b_J x_{Jk} \quad (j = 1, 2, \dots, J) \quad (4.9)$$

Mit der *KQ-Methode* lässt sich ebenfalls die Zielfunktion zur Minimierung der Summe der Residualquadrate definieren<sup>30</sup>:

$$\sum_{k=1}^K e_k^2 = \sum_{k=1}^K [y_k - (b_0 + b_1 x_{1k} + b_2 x_{2k} + \dots + b_j x_{jk} + \dots + b_J x_{Jk})]^2 \rightarrow \min! \quad (4.10)$$

Die Ermittlung der Regressionsparameter läuft nach dem selben Schema wie bei der einfachen Regression ab. Das so entstandene Gleichungssystem kann nur mit großem Rechenaufwand gelöst werden<sup>31</sup>.

Für diese Aufgabe können unterschiedliche Softwarepakete angewendet werden, zum Beispiel: *IBM<sup>©</sup> SPSS<sup>©</sup>* als kommerzielle Anwendung oder das frei verfügbare Open Source Statistikprogramm *R*.

<sup>28</sup> Vgl. Backhaus u. a. (2011) S. 67 und S. 114 ff

<sup>29</sup> Vgl. Backhaus u. a. (2011) S. 67

<sup>30</sup> Vgl. Backhaus u. a. (2011) S. 69

<sup>31</sup> Vgl. Backhaus u. a. (2011) S. 69

$e_k$	...	Residuen	( $k=1,2,\dots, K$ )
$y_k$	...	Beobachtungswerte der abhängigen Variablen	
$b_0$	...	konstantes Glied	
$b_j$	...	Regressionskoeffizienten	( $j=1,2,\dots, J$ )
$x_{jk}$	...	Werte der unabhängigen Variablen	( $j=1,2,\dots, J; k=1,2,\dots, K$ )
$J$	...	Zahl der unabhängigen Variablen	
$K$	...	Zahl der Beobachtungen	

## 4.3 Prüfung der Regressionsfunktion

Zur Beurteilung der Qualität eines Regressionsmodells werden unterschiedliche Prüfmethoden angewendet. Die Aussagekraft der gesamten Regressionsfunktion wird durch das *Bestimmtheitsmaß*, den *F-Test* und durch den *Standardfehler* beschrieben. Die Regressionsparameter werden ebenfalls einer Überprüfung unterzogen und zwar mit dem *t-Test*.<sup>32</sup>

### 4.3.1 Bestimmtheitsmaß

Mit dem Bestimmtheitsmaß (kurz  $R^2$ ) wird die Qualität der Adaption des Regressionsmodells an die Beobachtungswerte angegeben. Anders gesagt, gibt es Auskunft wie gut die Anpassung der durch die Regression geschätzten Werte  $\hat{y}_k$  an die gemessenen Beobachtungswerte  $y_k$  erfolgt ist. Die Werte für  $R^2$  liegen zwischen 0 und 1, wobei  $R^2 = 1$  als optimale Anpassung gewertet werden kann.<sup>33</sup>

Bei der multiplen Regression nimmt  $R^2$  bei der Aufnahme weiterer Regressoren in das Modell immer zu, auch wenn die unabhängigen Variablen keine Verbesserung des Modells bringen. Dieser Effekt wird mit dem *korrigiertem Bestimmtheitsmaß*  $R_{korr}^2$  ausgeblendet. Dies bedeutet, dass bei einer Verschlechterung des Modells  $R_{korr}^2$  auch wieder abnehmen kann.<sup>34 35</sup>

### 4.3.2 F-Test

Mit der F-Statistik wird überprüft, ob die Regressionsfunktion auch außerhalb des untersuchten Stichprobenumfangs zur Beschreibung der abhängigen Variablen ver-

<sup>32</sup> Vgl. Backhaus u. a. (2011) S. 72

<sup>33</sup> Vgl. Backhaus u. a. (2011) S. 72 ff

<sup>34</sup> Vgl. Backhaus u. a. (2011) S. 76

<sup>35</sup> Vgl. Groß (2010) S. 208

wendet werden kann. Der F - Test überprüft, ob eine Nullhypothese  $H_0$  zutrifft oder nicht.  $H_0$  besagt, dass alle Regressionskoeffizienten Null sind und somit die Regressionsfunktion keinen kausalen Zusammenhang mit den Beobachtungswerten herstellt. Das Ergebnis des F - Tests ist der sogenannte F - Wert. Ist dieser Null wird die Nullhypothese bestätigt. Grundsätzlich kann gesagt werden, je weiter sich der F - Wert von Null entfernt desto größer ist die Wahrscheinlichkeit das  $H_0$  verworfen wird.<sup>36</sup>

### 4.3.3 Standardfehler

Der Standardfehler der Residuen gibt Auskunft über die Größenordnung der *Abweichung* zwischen den *geschätzten* und *beobachteten Werten*<sup>37</sup>. Die Qualität der Regressionsfunktion nimmt zu, wenn der Standardfehler der Residuen abnimmt und umgekehrt.

### 4.3.4 t - Test

Die ersten drei Tests beurteilen die Güte des gesamten Regressionsmodells. Mit diesem Test wird der Einfluss der einzelnen unabhängigen Variablen auf aus Regressionsmodell untersucht. Der t - Test beruht auf den gleichen Prinzipien wie der F - Test. Auch hier wird eine Nullhypothese  $H_0$  aufgestellt die besagt, dass der Regressionskoeffizient Null ist. Zur Kontrolle von  $H_0$  wird der t - Wert ermittelt und wenn dieser markant von Null abweicht kann die Nullhypothese nicht bestätigt werden. In diesem Fall übt die untersuchte Variable einen Einfluss auf die abhängige Variable aus. Mit anderen Worten, der Regressionskoeffizient  $b_j$  ist ungleich Null.<sup>38</sup>

Alternativ kann auch der *p - Wert* ermittelt werden welcher die Wahrscheinlichkeit angibt, mit der die Nullhypothese eintritt. Ist der p - Wert kleiner als 0,05 so kann behauptet werden, dass der Regressionskoeffizient ungleich Null ist.<sup>39 40</sup>

### 4.3.5 Multikollinearität

Bei der multiplen Regression kann die sogenannte Multikollinearität auftreten was bedeutet, dass zwischen einem Regressor und mindestens einem der anderen Re-

---

<sup>36</sup> Vgl. Backhaus u. a. (2011) S. 76 ff

<sup>37</sup> Vgl. Backhaus u. a. (2011) S. 80

<sup>38</sup> Vgl. Backhaus u. a. (2011) S. 81 f

<sup>39</sup> Vgl. Weber (2001) S. 5 f

<sup>40</sup> Vgl. Groß (2010) S. 197

gressoren ein linearer Zusammenhang besteht. Durch diesen Zusammenhang wird dem Regressionsmodell keine zusätzliche Information zur Beschreibung der abhängigen Variablen hinzugefügt. Bei starker Multikollinearität wird die Berechnung der Regressionsparameter negativ beeinflusst, was sich in der Zunahme des Standardfehlers der Regressionskoeffizienten manifestiert. Bis zu einem bestimmten Ausmaß kann die Multikollinearität aber geduldet werden, da sie bei empirischen Beobachtungswerten ohnehin auftritt.<sup>41</sup>

Mit dem *Variance Inflation Factor* (kurz *VIF*) kann eine gegebenenfalls vorhandene Multikollinearität ermittelt werden. Der *VIF* wird für jeden einzelnen Regressor berechnet. Mit größer werdender Kollinearität nimmt dessen Wert zu.<sup>42</sup>

Um das Problem der Multikollinearität zu beseitigen, wird Schritt für Schritt immer derjenige Regressor mit dem höchsten *VIF* aus dem Modell ausgeschlossen, bis der *VIF* aller Regressoren kleiner gleich 10,0 ist.<sup>43</sup>

---

<sup>41</sup> Vgl. Backhaus u. a. (2011) S. 93 f

<sup>42</sup> Vgl. Backhaus u. a. (2011) S. 93 f

<sup>43</sup> Vgl. Weber (2001) S. 7

# 5 Anwendung der Regressionsanalyse

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise zum Aufstellen und zur Optimierung der Regressionsmodelle beschrieben.

## 5.1 Regression - Hängelot

Das erste Regressionsmodell ist für den *Zeitraum leer* aufgestellt worden. Mit einem einfachen Regressionsmodell wurden die Verformungen aus dem Lastfall Temperatur formuliert. Der Grundgedanke hinter diesem Ansatz ist, dass die Gesamtverformung der Mauer in diesem Zeitraum nur aus der Umgebungstemperatur resultiert, weil in diesem Zeitraum der Speicher komplett entleert war (siehe Abschnitt 3.1).

### 5.1.1 Regression mit EXCEL (zweiteiliger Ansatz)

Die Umsetzung der Parameterbestimmung für das erste Regressionsmodell wurde mit den im Abschnitt 4.1 vorgestellten Formeln (4.7) und (4.8) im Tabellenkalkulationsprogramm *Microsoft EXCEL* durchgeführt. Als unabhängige Variable wurde die Verformung zufolge Temperatureinwirkung ( $U_{R,T}$ ) aus der FE-Simulation verwendet.  $U_{R,T}$  entspricht im Zeitraum leer der beobachteten Verformung des Hängelotes (HL1) und deshalb stellt HL1 die abhängige Variable der Regressionsfunktion dar. Mit der so bestimmten Regressionsfunktion konnten die Werte der Temperaturverformung aus der FE-Rechnung an die an wie vorhandenen Gegebenheiten der Sperre angepasst werden. In weiterer Folge wurde mit der Regressionsfunktion  $U_{R,T}$  für den gesamten Zeitraum 1 neu berechnet.

Ein multiples Regressionsmodell wurde zur Modellierung der Gesamtverformung aufgestellt. Als Regressoren dienten die mit dem vorherigen Modell neu berechnete Verformung  $U_{R,T}$  sowie die Verformung zufolge der Wasserlast  $U_{R,W}$  aus der FE-Rechnung. Das Ergebnis dieses Modells zeigte eine mäßige Anpassung an die

Beobachtungswerte vom Hängelot, d.h. die Residuen konnten nicht auf ein brauchbares Maß verkleinert werden. Aus diesem Grund wurde ein umfangreicheres multiples Regressionsmodell formuliert.

### 5.1.2 Regression mit der Statistiksoftware R

Die Berechnung der Regressionskoeffizienten eines komplexen multiplen Modells wäre mit *EXCEL* nur mit großem Aufwand umsetzbar gewesen. Aus diesem Grund kam die Statistiksoftware *R* zum Einsatz.

*R* ist eine objektorientierte Programmiersprache zur statistischen Datenanalyse und bietet unter anderem auch die Möglichkeit die Daten zu visualisieren und zu verwalten. *R* ist ein *Open Source* Projekt und läuft auf allen gängigen Betriebssystemen<sup>44</sup>.

Wie bereits erwähnt wurde ist *R* auch eine Programmiersprache, die es ermöglicht immer wiederkehrende Abläufe als *Skript* in einer Datei zu speichern und auszuführen. Von dieser Form der Analyse und Visualisierung der Daten wurde auch in dieser Arbeit Gebrauch gemacht. In einem Skript wurden die Regressionsfunktionen sowie deren Ergebnisausgabe, aber auch die verschiedenen Parameter zur Diagrammerstellung implementiert. Die für die Regressionsanalyse notwendigen Daten, dazu zählen die Messwerte der relevanten Messpunkte und die Verformungsanteile aus der FE-Analyse, wurden in Tabellenform (Tabstoppgetrennter Text) in einer Textdatei (\*.txt) gespeichert und aus dieser in die Statistiksoftware importiert.

#### Zweiteiliges Modell

Mit der Verwendung von *R* wurde die Analyse mit den multiplen Regressionsfunktionen erheblich erleichtert. Wie bei der Berechnung mit *EXCEL* wurde das Konzept mit dem geteilten Ansatz weiter verfolgt. Zuerst wurde eine multiple Regressionsfunktion aufgestellt welche die Effekte des Temperatureinflusses im Zeitraum leer darstellt. Als Regressoren wurden die Daten der Betontemperaturmessstellen T01 und T02 sowie die Verformung zufolge des Temperatureinflusses verwendet, welcher durch eine Polynomfunktion dritten Grades von  $U_{R,T}$  dargestellt wurde. Mit diesem Ansatz konnte eine erhebliche Verbesserung gegenüber dem Ansatz der Einfachregression erreicht werden. Dieses Regressionsmodell für den Verformungsanteil  $U_{R,T}$

---

<sup>44</sup> Vgl. <http://www.r-project.org/> (Stand 11.04.2011)

wurde im Anschluss auf den Zeitraum 1 angewendet, dessen Ergebnis  $U_{R,T,1}$  benannt worden ist.

In mehreren multiplen Regressionsmodellen, mit den unabhängigen Variablen  $U_{R,T,1}$ , dem Pegel PG1 und einem Polynom bis zum vierten Grad von  $U_{R,W}$  (Verformung zufolge Wasserdruck), konnte eine schrittweise aber keine befriedigende Verkleinerung der Residuen erreicht werden. Die beste Übereinstimmung brachte das letzte Modell mit dem Polynom vierten Grades von  $U_{R,W}$ .

Um das Ergebnis der Regressionsfunktion zu verbessern wurde mehrere Variationen der Materialparameter und der Randbedingungen des FE-Modells durchgeführt. Genauer gesagt sind im mechanischen Modell die E-Moduli der beteiligten Materialien (Beton und Fels) und der Wärmeausdehnungskoeffizient des Betons variiert worden. Beim thermischen Modell wurden die Randbedingungen der Kontaktfläche zum Fels und der Kontrollgänge überarbeitet. Die Auswertung der Regressionsergebnisse der verschiedenen Varianten hat ergeben, dass auch mit den Modifikationen des FE-Modells keine optimale Anpassung der Schätzwerte an die Messwerte des Hängelotes erreicht werden konnte.

Aus diesem Verhalten lässt sich schließen, dass der Ansatz mit der Temperaturverformung vom Zeitraum leer sich nicht auf den gesamten Zeitraum 1 übertragen lässt, da die Wassertemperatur einen entscheidenden Einfluss auf das Verformungsverhalten der Mauer ausübt.

### Anmerkung zu den Modellbezeichnungen

Um die unterschiedlichen Varianten des FE-Modells und die verschiedenen Regressionsmodelle unterscheiden zu können, wird hiermit eine mehrstellige Modellbezeichnung eingeführt. Die einzelnen Stellen der Bezeichnung  $V485_4(l)_1$  bedeuten:

- $V$  ... Variante,
- $4$  ... vierte Variation der Materialparameter der mechanischen Modells,
- $8$  ... achte Modifikation der thermischen Randbedingung der luftseitigen Kontaktfläche zum Fels ( $RB_{Fels}$ ),
- $5$  ... fünfte Version der thermischen RB der Kontrollgänge ( $RB_{KG}$ ),
- $4(l)$  ... viertes Regressionsmodell ( $l \hat{=}$  modifizierter Pegel im Zeitraum leer),
- $1$  ... Zeitraum für den das Modell erstellt wurde.

In  $R$  werden den Verformungen  $U_{R,T}$  und  $U_{R,W}$  zur besseren Unterscheidbarkeit

und Durchführbarkeit der Berechnungen, die Bezeichnung der jeweiligen Variante des FE-Modells hinzugefügt (z.B. V485URT).

### Details zum FE - Modell V485

Die erste Variante des FE-Modells und dessen Eigenschaften sind im Kapitel 3 beschrieben. Um die Abweichungen der Regressionsfunktion zu verkleinern sind mehrere Variationen der ersten Variante erstellt worden. Die Veränderungen des Modells V485 zum Modell V1 lassen sich folgendermaßen beschreiben:

Kennwert	Einheit	Sperrenbeton	Fels (Granitgneis)
E-Modul	[MPa]	20000	20000
Wärmeausdehnungskoeff. ( $\alpha$ )	[1/K]	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$

**RB<sub>Fels</sub>** Gleitender Mittelwert (20 Tage) von  $T_{02}$ ;  
 $T_{\max} = 5^{\circ}\text{C}$

**RB<sub>KG</sub>** Gleitender Mittelwert (20 Tage) von  $(T_{01} + T_{02}) \cdot 0,5$ ;  
 $T_{\min} = 4^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\max} = 10^{\circ}\text{C}$

**Zu RB<sub>Fels</sub>:** Der wasserseitige Teil des Fundaments wird durch das Wasser im Speicher vor dem Auskühlen geschützt und somit blieb die Temperatur von dieser Randbedingung mit  $4^{\circ}\text{C}$  unverändert. An der *Luftseite* wurde die Randbedingung auf Grund des fehlenden Wasserkörpers modifiziert. Weil es in diesem Teil der Mauer keinen Temperatursensor gibt, sind näherungsweise die Messdaten des *Betontemperatursensors* der Luftseite verwendet worden. Mit den Messwerten ist der gleitende Durchschnitt von 20 Tagen, 10 Tage vor und 10 Tage nach dem aktuellen Tag, gebildet worden. Des Weiteren wurde die Annahme getroffen, dass die Temperatur im Sommer die  $5^{\circ}\text{C}$ -Marke nicht übersteigt.

**Zu RB<sub>KG</sub>:** In der Basisvariante des thermischen Modells sind in den beiden Kontrollgängen keine Randbedingungen am Übergang Beton – Luft gesetzt worden. Dadurch in der Simulation kein Temperatureaustausch zwischen den beiden Medien erfolgt. Um die Interaktion in diesem Modell zu ermöglichen wurde in *ABAQUS* die *film*-Subroutine zur angewendet. Die Temperatur der Randbedingung ist ebenfalls mit dem gleitenden Durchschnitt von 20 Tagen gebildet worden, diesmal aber mit dem Mittelwert der beiden Betontemperaturen.

**Anmerkung:** Die Details zu den anderen Varianten des FE-Modell sind im Anhang A.1 aufgelistet.

## Gesamtmodell für den Zeitraum 1

Der Ansatz mit den zwei Regressionsmodellen wurde verworfen und ist durch einen neuen multiplen Ansatz ersetzt worden. Eine einzelne Regressionsfunktion für den kompletten Zeitraum 1 führte schlussendlich zu einem bedeutend besseren Regressionsergebnis.

$$\widehat{HL1} = b_0 + U_T + U_W \quad (5.1)$$

$$U_T = b_1 U_{R,T} + b_2 U_{R,T}^2 + b_3 U_{R,T}^3 + b_4 MT1 + b_5 T01 + b_6 T02 \quad (5.2)$$

$$U_W = b_7 U_{R,W} + b_8 U_{R,W}^2 + b_9 PG1 + b_{10} PG1^3 \quad (5.3)$$

Das oben vorgestellte Regressionsmodell wurde auf die verschiedenen Varianten des FE-Modells angewendet. Das Regressionsmodell *V485\_1\_1*, auf der Basis der Daten der FE-Variante *V485*, brachte das beste Ergebnis, welches in der Abbildung 5.1 (Output der Regressionsanalyse mit *R*) dargestellt ist. Diese Variante des FE-Modells wird im Verlauf dieser Arbeit für die folgenden Berechnungen verwendet.

```

1 Call:
2 lm(formula = (HL1 ~ V485URT + I(V485URT^2) + I(V485URT^3) +
3     MT1 + T01 + T02 + V485URW + I(V485URW^2) + PG1_o + I(PG1_o^3)),
4     data = Inp_1, na.action = na.exclude)
5
6 Residuals:
7     Min       1Q   Median       3Q      Max
8 -0.72268 -0.15718 -0.00201  0.17098  0.63520
9
10 Coefficients:
11             Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)      VIF
12 (Intercept) -2.207e+03  2.664e+02  -8.281 3.60e-16 *** ---
13 V485URT      3.919e-01  1.300e-02  30.148 < 2e-16 *** 1.220e+01
14 I(V485URT^2) 4.717e-02  2.723e-03  17.324 < 2e-16 *** 2.175e+00
15 I(V485URT^3) 8.274e-03  1.151e-03   7.188 1.23e-12 *** 7.241e+00
16 MT1         1.145e-02  2.166e-03   5.284 1.53e-07 *** 4.377e+00
17 T01        -4.160e-02  4.373e-03  -9.513 < 2e-16 *** 5.314e+00
18 T02         1.470e-01  5.070e-03  29.001 < 2e-16 *** 1.575e+01
19 V485URW     1.780e+00  9.775e-02  18.211 < 2e-16 *** 1.212e+02
20 I(V485URW^2) 1.308e-01  2.696e-02   4.850 1.42e-06 *** 4.084e+01
21 PG1_o       1.467e+00  1.755e-01   8.354 < 2e-16 *** 2.007e+05
22 I(PG1_o^3)  -9.529e-08  1.129e-08  -8.443 < 2e-16 *** 2.045e+05
23 ---
24 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
25
26 Residual standard error: 0.2383 on 1071 degrees of freedom
27 (18 observations deleted due to missingness)
28 Multiple R-squared:  0.9923, Adjusted R-squared:  0.9922
29 F-statistic: 1.381e+04 on 10 and 1071 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

**Abbildung 5.1:** Regressionsanalyse mit *R*: Ergebnis - Modell *V485\_1\_1*

## Analyse der Regressionsergebnisse

Zum besseren Verständnis werden die wichtigsten Einzelheiten des Outputs erklärt. `Call` wiederholt die Regressionsfunktion mit welcher die Anpassung erfolgt ist und der Punkt `Residuals` gibt einen kurzen Überblick über die vorhandenen Residuen. Die geschätzten Regressionskoeffizienten und die Ergebnisse der statistischen Tests werden in der Tabelle `Coefficients` dargestellt. In der ersten Spalte sind die unabhängigen Variablen aufgelistet, `(Intercept)` steht für das konstante Glied  $b_0$ , die Namen der restlichen Variablen sind selbsterklärend. `Estimate` beinhaltet die Werte der zugehörigen Regressionskoeffizienten  $b_j$ , `Std. Error` versteht sich als Standardfehler des Koeffizienten. Das Ergebnis des t-Tests wird in der Spalte `t value` und der jeweilige p-Wert wird in der darauffolgenden Spalte angezeigt. Die vorletzte Spalte kennzeichnet den p-Wert mit den in der Zeile 24 angegebenen Codes.<sup>45</sup>

Einen Hinweis auf eine eventuell vorhandene Multikollinearität gibt die letzte Spalte. Die `VIF`-Werte werden nicht standardmäßig bei der Regressionsanalyse berechnet und wurden daher manuell in die Tabelle des Outputs geschrieben. Für die Berechnung der `VIF`-Werte wurde das Paket `car` verwendet<sup>46</sup>.

Unterhalb der Tabelle (Zeile 26 bis 29) werden die Gütemaße der Regressionsfunktion aufgelistet. `Residual standard error` stellt den Standardfehler der Residuen dar. Die Werte der Bestimmtheitsmaße  $R^2$  (`Multiple R-squared`) und  $R^2_{\text{korrr}}$  (`Adjusted R-squared`) befinden sich in der vorletzten Zeile. Die globale Signifikanz der Regressionsfunktion zur Beschreibung der abhängigen Variablen wird mit `F-statistic`, gefolgt vom `p-value` (Wahrscheinlichkeit mit der die Nullhypothese eintritt) angegeben.<sup>47</sup>

Ein Blick auf die letzte Spalte der `Coefficients`-Tabelle zeigt, dass unter einigen Regressoren lineare Zusammenhänge vorhanden sind ( $\text{VIF} > 10$ ). Die Lösung des *Multikollinearitätsproblems* ist das schrittweise Entfernen von den betroffenen Regressoren, gefolgt von der Neuberechnung der Koeffizienten.

## Entfernen der Multikollinearität

Während des Ausschlussprozesses wurde der Punkt erreicht, wo die Entscheidung über den Verbleib der Variablen `MT1` (Lufttemperatur) und `T02` (luftseitige Be-

<sup>45</sup> Vgl. Wollschläger (2010) S. 222

<sup>46</sup> Siehe <http://cran.r-project.org/web/packages/car/index.html> (Stand 14.04.2011)

<sup>47</sup> Vgl. Wollschläger (2010) S. 222 f

tontemperatur) gefällt werden musste. Die Regressionsfunktion hatte diese Form angenommen:

$$\widehat{HL1} = b_0 + b_1U_{R,T} + b_2U_{R,T}^2 + b_3MT1 + b_4T01 + b_5T02 + b_6U_{R,W} + b_7PG1 \quad (5.4)$$

Der *VIF* aller unabhängigen Variablen lag unter der Grenze von 10, bis auf den *VIF* der Variablen T02 (*VIF* = 14.3). Als nächstes wurde T02 entfernt, die Regression erneut berechnet und mit *V485\_3\_1* benannt. Die Auswertung der *VIF* - Werte ergab, dass diese alle unter dem Grenzwert lagen. Der Standardfehler, das Bestimmtheitsmaß und der F - Wert des Modells haben jedoch auf eine markante Verschlechterung des Modells hingewiesen.

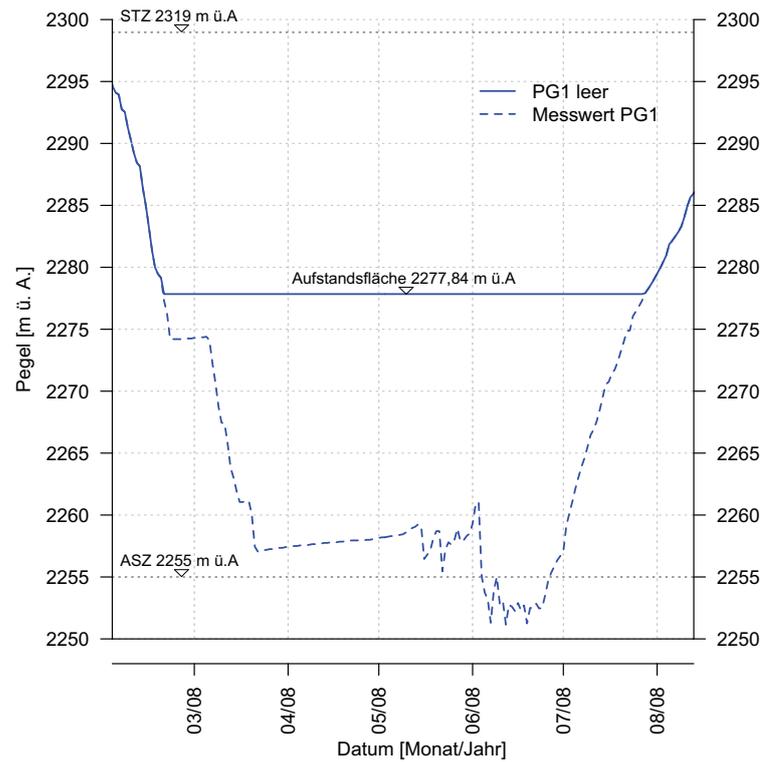
Im nächsten Schritt wurde T02 wieder ins Modell aufgenommen und im Gegenzug ist die Variable MT1 ausgeschlossen worden. Das Ergebnis dieser Modellvariante zeigte eine positive Entwicklung der Gütemaße. Auch der *VIF* des Regressors T02 reduzierte sich auf 10,7. Auf den Ausschluss der Variablen T02 wurde schlussendlich verzichtet. Die Begründung dafür ist, dass T02 viel mehr zur Verkleinerung der Residuen beiträgt als MT1. Des weiteren spricht die Tatsache, dass der *VIF* von T02 nur marginal über dem Grenzwert liegt, ebenfalls für den Regressor T02.

Nach dem Durchlauf der Prüfung des Regressionsmodells lässt sich die endgültige Funktion, mit der Bezeichnung *V485\_4\_1*, wie folgt anschreiben:

$$\widehat{HL1} = b_0 + b_1U_{R,T} + b_2U_{R,T}^2 + b_3T01 + b_4T02 + b_5U_{R,W} + b_6PG1 \quad (5.5)$$

### **Modifizierung des Wasserspiegelverlaufes**

Alle bisherigen Regressionsuntersuchungen wurden mit dem gemessenen, tatsächlichen Wasserspiegelverlauf durchgeführt. Der Verdacht liegt nahe, dass der gemessene Verlauf die Schätzung der Regressionskoeffizienten nachteilig beeinflusst weil das Absenkziel tiefer liegt als der Gründungshorizont der Mauer. Durch das Kriterium der *KQ-Schätzung* werden die Regressionskoeffizienten an den Verlauf der gemessenen Verformungen (HL1) angepasst, obwohl die beobachteten Werte von HL1 im Zeitraum leer nicht vom Wasserdruck abhängen.



**Abbildung 5.2:** Verlauf des Wasserspiegels im Zeitraum leer

Um diese Behauptung belegen zu können, wurde der Pegel für den gesamten Zeitraum leer als konstant angenommen. Die Höhe des konstanten Wasserspiegels entspricht der Höhenkote des wasserseitigen Fußpunktes. Die Abbildung 5.2 zeigt den gemessenen und den modifizierten Verlauf der Wasserspiegellinie im Zeitraum leer. Mit einem weiteren Regressionsmodell (Modell  $V485\_4L1$ ) sind die Auswirkungen des modifizierten Pegelverlaufes untersucht worden.

Das Regressionsergebnis bestätigt die zuvor aufgestellte Behauptung, wenngleich die Steigerung der Güte in bescheidenem Maße ausfällt. Dazu sind die Ergebnisse des Modells  $V485\_4L1$  (Abbildung A.3 im Anhang A.2) und die des Modells mit dem modifizierten Pegel ( $V485\_4L1$ , siehe Abb. 5.3) zu vergleichen. Für die weiteren Regressionen der Messtelle HL1 wurden jeweils die modifizierten Messwerte des Pegels benutzt.

```

1 Call:
2 lm(formula = (HL1 ~ V485URT + I(V485URT^2) + T01 + T02 +
3   V485URW + PG1_l), data = Inp_1, na.action = na.exclude)
4
5 Residuals:
6     Min       1Q   Median       3Q      Max
7 -0.84540 -0.16729  0.01881  0.18870  0.60240
8
9 Coefficients:
10              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)    VIF
11 (Intercept)  96.001521   2.746548   34.95 <2e-16 *** ---
12 V485URT      0.445675   0.008658   51.47 <2e-16 *** 4.855e+00
13 I(V485URT^2) 0.046926   0.002484   18.89 <2e-16 *** 1.623e+00
14 T01         -0.048125   0.004382  -10.98 <2e-16 *** 4.786e+00
15 T02          0.167149   0.004411   37.89 <2e-16 *** 1.069e+01
16 V485URW     1.601830   0.021348   75.04 <2e-16 *** 5.187e+00
17 PG1_l       -0.038670   0.001200  -32.23 <2e-16 *** 4.335e+00
18 ---
19 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
20
21 Residual standard error: 0.2516 on 1075 degrees of freedom
22   (18 observations deleted due to missingness)
23 Multiple R-squared:  0.9914, Adjusted R-squared:  0.9913
24 F-statistic: 2.063e+04 on 6 and 1075 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

**Abbildung 5.3:** Regressionsanalyse mit *R*: Ergebnis - Modell *V485\_4L1*

### Regression im Zeitraum 3

Wie bereits in Abschnitt 3.1 erwähnt wurde, ist der Zeitraum 3 die Verlängerung des Zeitraum 1 bis Ende Jänner 2011. Mit den Messdaten des Zeitraum 3 sind die Regressionskoeffizienten des Modells *V485\_4L1* aus dem Zeitraum 1 aktualisiert worden. Entsprechend der Bezeichnungskonvention erhielt dieses Modell die Bezeichnung *V485\_4L3*. Die erneute Berechnung des Regressionsmodells hat zwei Gründe:

1. Die Überprüfung der Entwicklung der Gütemaße des neuen Modells.
2. Die Prognose des Modells *V485\_4L1* mit dem erweiterten Messdatensatz und eine Gegenüberstellung der Messwerte mit den Werten für  $\widehat{HL1}$  vom Modell *V485\_4L3*.

### Ergebnis - Modell *V485\_4L3*

Der größere Stichprobenumfang des Zeitraum 3 beinhaltet mehr Informationen, vergrößert aber auch den Bereich in dem  $\widehat{HL1}$  geschätzt werden muss. Die Bestimmtheitsmaße  $R_{kor}^2$  der beiden Modelle weichen kaum voneinander ab. Der Standard-

fehler der Residuen nimmt im Gegensatz zum Zeitraum 1 leicht zu und die Multikollinearität verringert sich in geringem Maße (siehe Abb. 5.4). Ein Blick auf den *VIF* des Regressors T02 zeigt, dass sich die Multikollinearität verringert hat.

```

1 Call:
2 lm(formula = (HL1 ~ V485URT + I(V485URT^2) + T01 + T02 +
3   V485URW + PG1_1), data = Inp_3, na.action = na.exclude)
4
5 Residuals:
6     Min       1Q   Median       3Q      Max
7  -0.78852 -0.18642  0.01725  0.22325  0.63213
8
9 Coefficients:
10              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)      VIF
11 (Intercept)  96.854976   2.942982  32.910 <2e-16 *** ---
12 V485URT      0.408358   0.008764  46.593 <2e-16 *** 4.981e+00
13 I(V485URT^2) 0.047522   0.002481  19.158 <2e-16 *** 1.580e+00
14 T01         -0.041999   0.004549  -9.232 <2e-16 *** 4.411e+00
15 T02          0.169343   0.004428  38.247 <2e-16 *** 1.002e+01
16 V485URW     1.591573   0.022577  70.497 <2e-16 *** 4.977e+00
17 PG1_1       -0.039064   0.001285 -30.388 <2e-16 *** 4.332e+00
18 ---
19 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
20
21 Residual standard error: 0.2754 on 1190 degrees of freedom
22   (18 observations deleted due to missingness)
23 Multiple R-squared:  0.9894, Adjusted R-squared:  0.9894
24 F-statistic: 1.855e+04 on 6 and 1190 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

**Abbildung 5.4:** Regressionsanalyse mit *R*: Ergebnis - Modell *V485\_4L3*

Im ersten Diagramm der Abbildung 5.6 sind die Messwerte von HL1 und die Schätzwerte  $\widehat{HL1}$  der genannten Modelle gegenübergestellt. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass die Abweichungen zu den beobachteten Werten gering ausfallen, was bei den Ergebnissen der Regression auch zu erwarten war. Der zweite Teil der Abbildung stellt den Wasserspiegelverlauf mit der zuvor angesprochenen Modifizierung im Zeitraum leer dar. Die Verformungen der beiden Modelle ( $\widehat{HL1}$ ) werden nur für den zugehörigen Zeitraum dargestellt.

Das Verformungsdiagramm ist folgendermaßen zu interpretieren: Wenn sich die Mauer talwärts neigt, nehmen gemessenen Werte ab und umgekehrt. Das Minimum (1,59 mm) wurde am 27. Februar 2010 gemessen und der maximale Ausschlag (10,42 mm) des Lotes ist am 13. Juni 2010 erreicht worden. Somit ist die Maximaldifferenz für den Zeitraum 3 mit 8,83 mm zu beziffern.

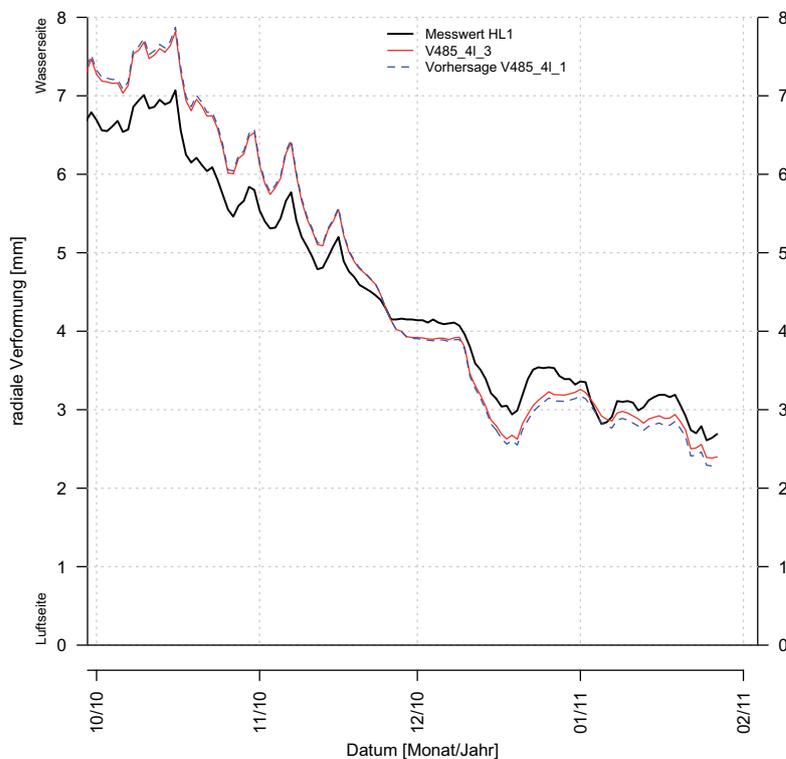
In den Wintermonaten lässt sich sehr gut der Einfluss der Temperatur erkennen, denn bei annähernd konstantem Pegel neigt sich die Sperre immer weiter talwärts.

Ein Erklärungsgrund für dieses Verhalten ist, dass sich die unterwasserseitige Fläche der Mauer immer weiter abkühlt und der Beton an der Oberwasserseite durch das Wasser vor der Auskühlung geschützt wird. Durch diesen Temperaturgradienten wird die Tendenz der Verformung zufolge des Wasserdruckes noch zusätzlich verstärkt.

Die Differenzen der gemessenen zu den berechneten Werten sind in der Abbildung 5.7 sichtbar. Das obere Diagramm beinhaltet die Residuen und das untere Diagramm veranschaulicht die Differenzen bezogen auf den Mittelwert der gemessenen Daten des Hängelotes.

### Prognose des Modells V485\_4L1

Die Abbildung 5.5 zeigt, dass die Differenz der Vorhersage von  $V_{485-4L1}$  (Zeitraum 1) im Vergleich zu den Schätzwerten von  $\widehat{HL1}$  des Modells  $V_{485-4L3}$  (Zeitraum 3) irrelevant klein ist. Dies bedeutet, dass das Modell  $V_{485-4L1}$  sehr gut zur Vorhersage eingesetzt werden kann. Andererseits konnte das Modell mit den Daten des Zeitraum 3, auf Grund des größeren Stichprobenumfanges verbessert werden. Infolgedessen wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit das Regressionsmodell  $V_{485-4L3}$  verwendet.



**Abbildung 5.5:** Regressionsanalyse mit  $R$ : Prognose des Modells  $V_{485-4L1}$

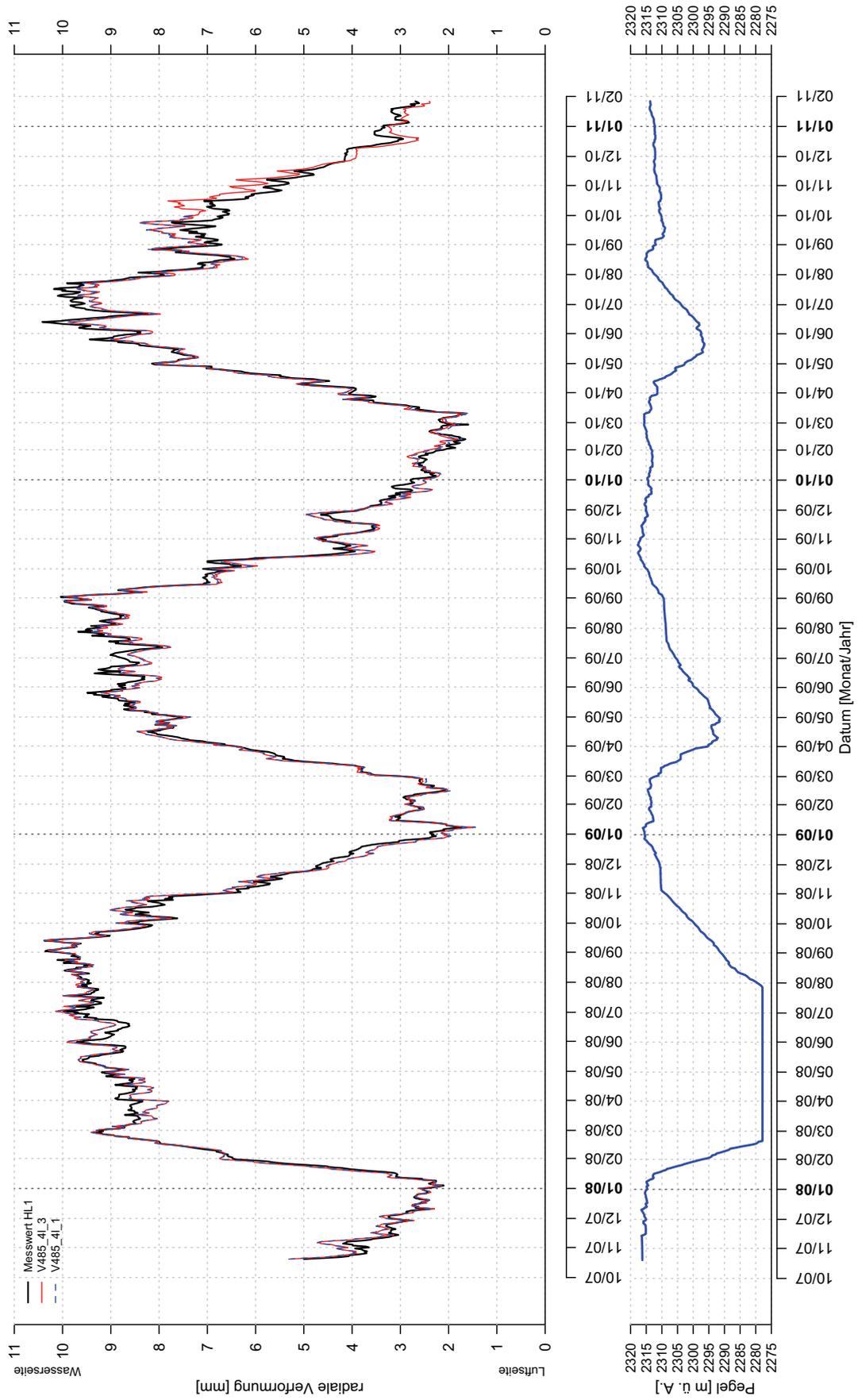
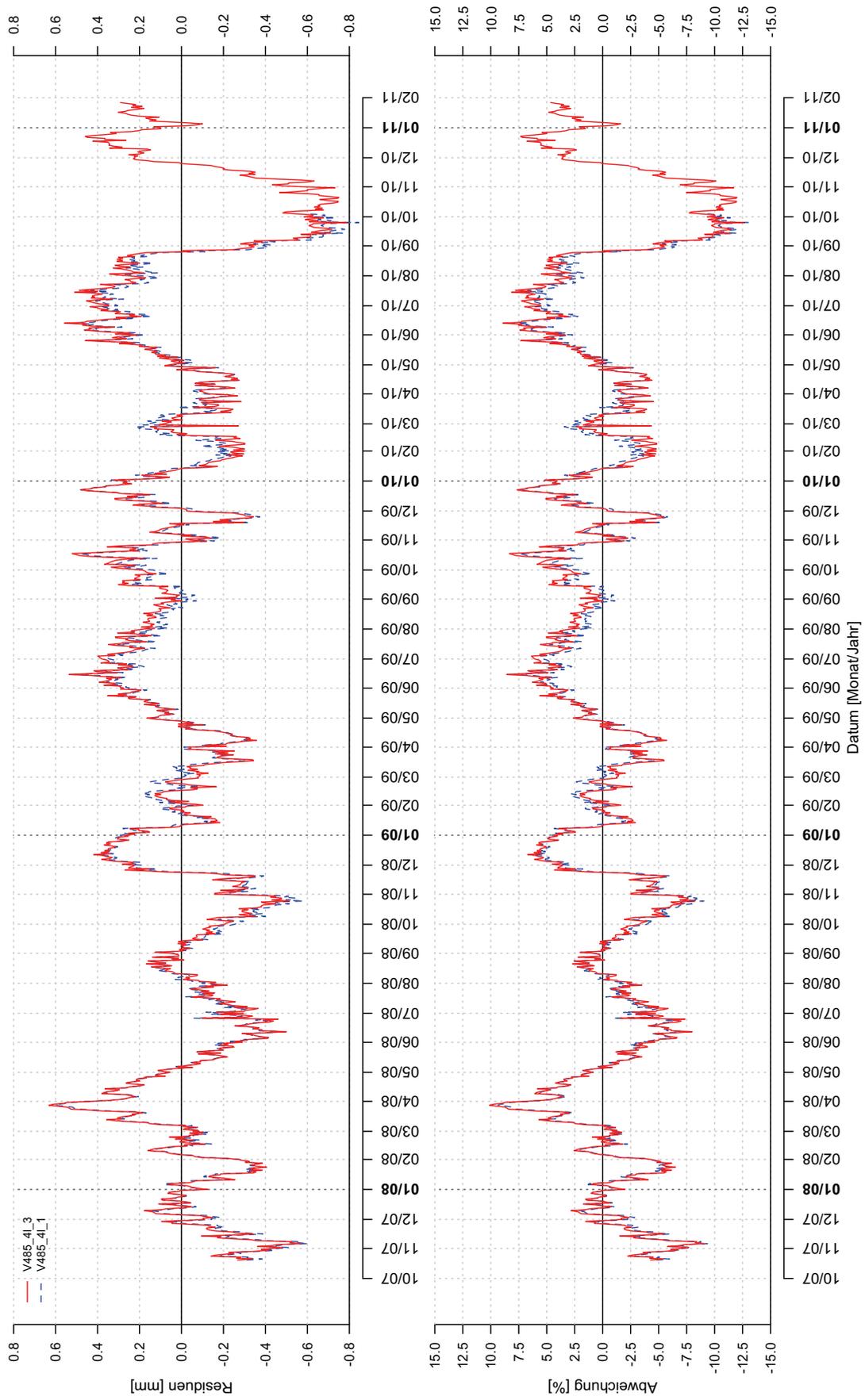


Abbildung 5.6: Hängelot – Vergleich der Schätz - und Messwerte



**Abbildung 5.7:** Residuen und Abweichungen zu den Messwerten des Hängelotes (HL1)

## 5.2 Regression - Schwimmloot

Die Regression für das Schwimmloot ist ebenfalls mit den FE-Daten der Variante *V485* durchgeführt worden. Die Messdaten des Schwimmlootes haben einen kleineren Umfang als die des Hängelotes und der Betontemperaturen, weil das Schwimmloot erst im September des Jahres 2009 in Betrieb genommen wurde. Deswegen wurde von Anfang an mit dem kompletten, vorhandenen Datensatz gearbeitet.

Mit den gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnissen aus der ersten Regressionsanalyse wurde die Vorgangsweise bei der Modellierung des Schwimmlootes geändert. Es wurde mit einem einfachen, linearen Regressionsmodell begonnen und sukzessive sind weitere Regressoren der Funktion hinzugefügt worden. Die Modellauswahl ist von Beginn an von den bereits bekannten Gütemaßen und durch das Ergebnis Multikollinearitätsanalyse beeinflusst worden. Mit anderen Worten, der Regressor welcher die Multikollinearität verursacht hat, wurde im nächsten Schritt wieder ausgeschlossen.

Zur besseren Unterscheidbarkeit der Regressionsmodelle des Schwimmlootes zu jenen Hängelotes, wurden der bereits bekannten Bezeichnung die Buchstaben SL (Schwimmloot) hinzugefügt. Die Variablen  $U_{R,T}$  und  $U_{R,W}$  sind in diesem Kapitel sinngemäß als die Verformungen der repräsentativen Knoten des Schwimmlootes aus dem FE-Modell zu verstehen.

### Ermittlung der Regressionsfunktion

Es wurde mit der Annahme begonnen, dass die Verschiebungen des Schwimmlootes nur von der hydrostatischen Wasserlast abhängen. Der erste Ansatz der Regressionsfunktion mit der Bezeichnung *SLV485\_0\_3* lautet folgendermaßen:

$$\widehat{SL1} = b_0 + b_1 U_{R,W}. \quad (5.6)$$

Dies ist ein einfaches, lineares Modell, welches die gerechneten Verformungen ( $U_{R,W}$ ) als Regressor beinhaltet. Das Ergebnis der Regression zeigt, dass die Anpassung mittlerer bis guter Qualität entspricht, siehe  $R_{korr}^2$  und Standardfehler der Residuen in der Abbildung 5.8.

```

1 Call:
2 lm(formula = (SL1 ~ V485URW), data = Inp_3, na.action = na.exclude)
3
4 Residuals:
5     Min       1Q   Median       3Q      Max
6 -0.47360 -0.18808  0.01855  0.19401  0.47929
7
8 Coefficients:
9             Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)    VIF
10 (Intercept)  1.52413    0.04078   37.38  <2e-16 *** ---
11 V485URW      2.90351    0.05212   55.71  <2e-16 *** ---
12 ---
13 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
14
15 Residual standard error: 0.2344 on 510 degrees of freedom
16 (2 observations deleted due to missingness)
17 Multiple R-squared:  0.8589, Adjusted R-squared:  0.8586
18 F-statistic:  3104 on 1 and 510 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

**Abbildung 5.8:** Regressionsanalyse mit *R*: Ergebnis - Modell *SLV485\_0\_3*

Vor der Auswertung der zweiten Regressionsfunktion ist ein alternativer Weg zur Bestimmung der Multikollinearität zwischen den Variablen besprochen worden. Ob ein linearer Zusammenhang besteht oder nicht, kann u. a. auch dadurch nachgewiesen werden, indem man eine Regressionsfunktion aufstellt in der eine unabhängige Variable durch die andere beschrieben wird. Konvergiert der Wert des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  gegen 1 lautet die Schlussfolgerung, dass die Variablen korrelieren.<sup>48</sup>

Zwischen den Variablen  $U_{R,W}$  und  $PG1_L$  besteht ein möglicher linearer Zusammenhang, da die Verformungen  $U_{R,W}$  aus dem jeweiligen Pegelstand resultieren. Das Ergebnis der Multikollinearitätsanalyse nach dem oben genannten Schema weist auf einen starken Zusammenhang zwischen den beiden Regressoren hin, denn  $R^2 = 0,993$  (siehe Abb. A.4). Auf Grund dieses Umstandes wurde in den weiteren Modellen nur jeweils einer der beiden Regressoren verwendet.

Im zweiten Modell (*SLV485\_1\_3*) ist, im Unterschied zum ersten Ansatz, auch die Temperaturverformung  $U_{R,T}$  aufgenommen worden. Es handelt sich hierbei um ein deterministisches, multiples Modell (vgl. Gl. (5.7)). Durch den zweiten Regressor ( $U_{R,T}$ ) konnte die Güte des Basisansatzes verbessert werden. Die Ergebnisse von diesem Modell sind im Anhang in der Abbildung A.5 aufgelistet.

$$\widehat{SL1} = b_0 + b_1 U_{R,W} + b_2 U_{R,T} \quad (5.7)$$

Das endgültige Modell mit der Bezeichnung *SLV485\_4\_3* (Gl. (5.8)), beinhaltet zusätzlich zwei weitere Regressoren (Betontemperaturen T01 und T02) und zeich-

<sup>48</sup> Vgl. Backhaus u. a. (2011) S. 94 f

net sich somit durch die geringsten Abweichungen von den Messwerten von des Schwimmlootes (SL1) aus.

$$\widehat{SL1} = b_0 + b_1 U_{R,T} + b_2 T01 + b_3 T02 + b_4 U_{R,W} \quad (5.8)$$

Der vierte Regressor ist die Verformung zufolge der Wasserlast aus der FE - Berechnung ( $U_{R,W}$ ). Es wurde ein ähnliches Regressionsmodell (*SLV485\_4L3*) formuliert, in dem der modifizierte Pegel (*PG1L*) anstelle von  $U_{R,W}$  verwendet wurde. Die Qualität der beiden Modelle unterscheidet sich geringfügig, aber auf Grund des relativ kleinen Messdatenumfanges wurde das Modell mit den besten Ergebnissen (*SLV485\_4L3*) gewählt. Die Differenzen sind in den Ergebnisausdrücken ersichtlich (siehe Abb. 5.9 und Abb. A.6).

```

1 | Call:
2 | lm(formula = (SL1 ~ V485URT + T01 + T02 + V485URW),
3 |     data = Inp_3, na.action = na.exclude)
4 |
5 | Residuals:
6 |      Min       1Q   Median       3Q      Max
7 | -0.190543 -0.071276 -0.007464  0.069777  0.214411
8 |
9 | Coefficients:
10 |              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)      VIF
11 | (Intercept)  1.094833    0.023062   47.47  <2e-16 ***  ---
12 | V485URT      1.024699    0.102241   10.02  <2e-16 ***  1.957e+00
13 | T01          0.090346    0.002887   31.30  <2e-16 ***  5.455e+00
14 | T02         -0.021551    0.001477  -14.59  <2e-16 ***  5.349e+00
15 | V485URW     3.116644    0.024939  124.97  <2e-16 ***  1.715e+00
16 | ---
17 | Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
18 |
19 | Residual standard error: 0.08565 on 507 degrees of freedom
20 | (2 observations deleted due to missingness)
21 | Multiple R-squared:  0.9813, Adjusted R-squared:  0.9811
22 | F-statistic: 6641 on 4 and 507 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

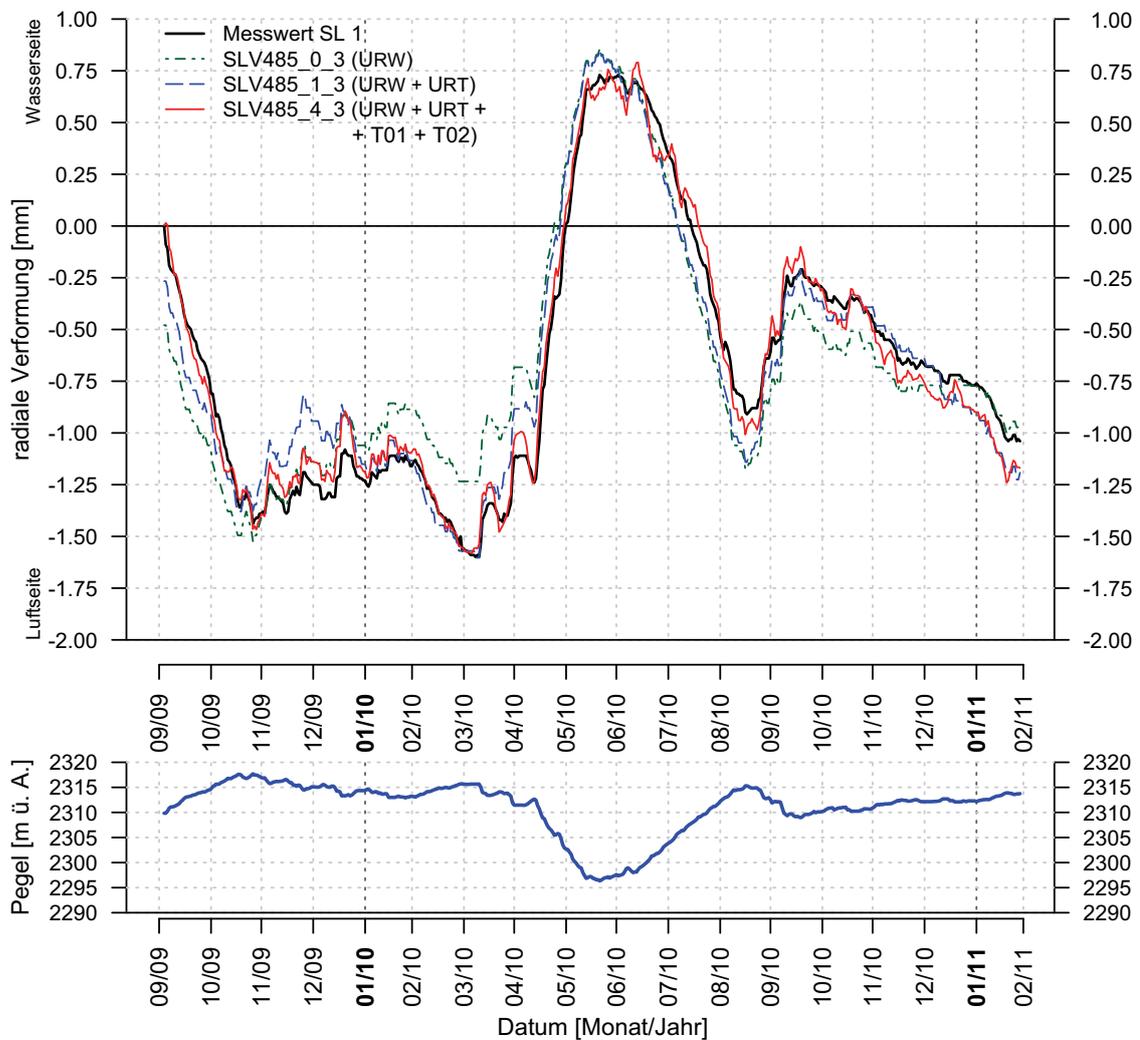
**Abbildung 5.9:** Regressionsanalyse mit *R*: Ergebnis - Modell *SLV485\_4L3*

Die Qualität des gewählten Modells für das Schwimmloot ist mit gut einzustufen (siehe Abb. 5.9). Einzig zwischen den Variablen der T01 und T02 (Betontemperaturen) ist ein linearer Zusammenhang vorhanden, die Qualität der Analyse wird dadurch aber nicht signifikant beeinträchtigt.

Die visuelle Beurteilung der Regression wird mit der Abbildung 5.10 ermöglicht. Der Verlauf der Messwerte des Schwimmlootes zeigt, dass das Schwimmloot selbst auf geringe Pegelschwankungen reagiert. Dieses Ansprechverhalten ist auch darauf

zurückzuführen, dass die Messgenauigkeit des Lotes 0,01 Millimeter beträgt und somit kleinste Verformungen registriert werden.

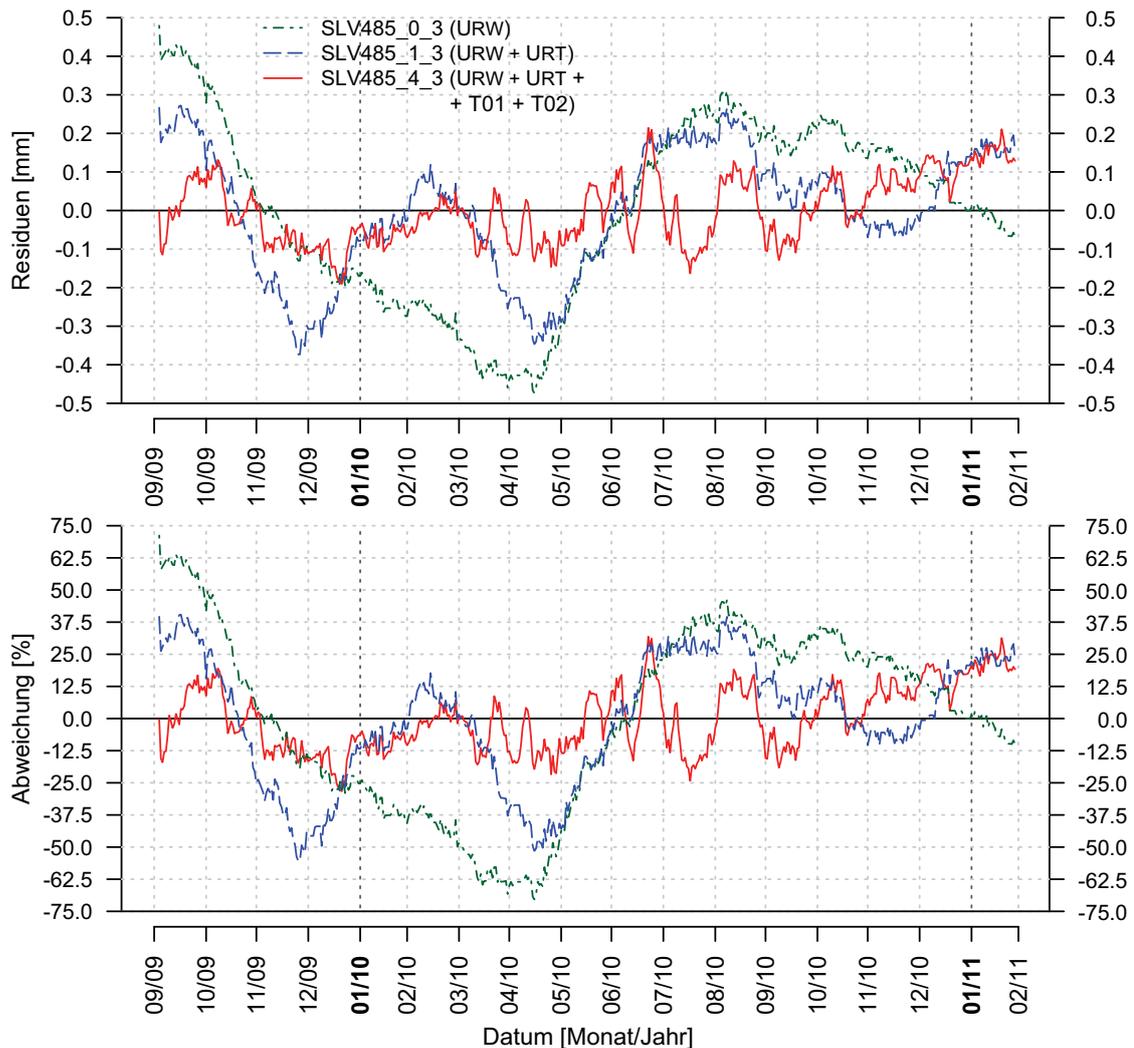
Im Verformungsdiagramm sind zusätzlich die Schätzwerte von drei Modellen eingezeichnet. Das Modell  $SLV_{485\_4\_3}$ , welches das gewählte Modell ist, weist die beste Anpassung auf. Beim ersten vorgestellten Modell ( $SLV_{485\_0\_3}$ ) sind die Differenzen in den ersten Monaten am größten. Das zweite Modell ( $SLV_{485\_1\_3}$ ) fällt vor allem durch die großen Residuen der Anfangsphase auf. Die ersten beiden Modellvarianten sind deswegen im Diagramm eingezeichnet, weil sie den Unterschied zum „besten“ Modell ( $SLV_{485\_4\_3}$ ) vor allem im Juni 2010 aufzeigen. Diese starken Ausschläge der Kurve dieses Modells (rote, durchgezogene Linie) sind durch die Aufnahme der beiden Betontemperaturen  $T_{01}$  und  $T_{02}$  in die Regressionsfunktion verursacht worden (siehe Abb. 5.10).



**Abbildung 5.10:** Schwimmlot – Vergleich der Schätz- und Messwerte

Werden die Betontemperaturen jedoch nicht verwendet erhält man die Anpassungs-

güte der ersten beiden Modelle. Durch dieses Diagramm sollte veranschaulicht werden, dass die Aufnahme von zusätzlichen Regressoren Vor- und Nachteile mit sich bringt. In diesem Fall werden die Residuen im Durchschnitt verkleinert, mit dem Nachteil, dass die Schätzung in einzelnen Teilbereichen verschlechtert wird. Das Ausmaß der Residuen wird in der Abbildung 5.11 veranschaulicht. Die Abweichungen der gewählten Funktion überschreiten, bezogen auf den Mittelwert der Messwerte von SL1, stellenweise die 30%-Marke.



**Abbildung 5.11:** Residuen und Abweichungen zu den Messwerten des Schwimmlotes (SL1)

Die Erweiterung der Regressionsfunktion mit zusätzlichen Regressoren (z.B. Lufttemperatur) hat keine Verbesserung gebracht, siehe Abbildungen A.7 und A.8 im Abschnitt A.2.2. Eine mögliche Verkleinerung der Residuen könnte durch eine erneute Schätzung der Regressionskoeffizienten mit einem größeren Datenumfang erreicht werden.

## 5.3 Endgültige Regressionsfunktionen

Die gewählten Regressionsmodelle werden im nächsten Kapitel zur Vorhersage der Verformungen zufolge der geänderten Speicherbewirtschaftung verwendet und lassen sich mit den geschätzten Regressionsparametern folgendermaßen anschreiben:

$$\widehat{HL1} = 96,855 + 0,408 \cdot U_{R,T} + 0,048 \cdot U_{R,T}^2 - 0,042 \cdot T01 + \\ + 0,169 \cdot T02 + 1,592 \cdot U_{R,W} - 0,039 \cdot PG1\_l \quad (5.9)$$

$$\widehat{SL1} = 1,095 + 1,025 \cdot U_{R,T} + 0,090 \cdot T01 - 0,022 \cdot T02 + 3,117 \cdot U_{R,W} \quad (5.10)$$

## 6 Variantenstudie

Nach der Fertigstellung des Pumpspeicherkraftwerkes *Reißeck II* und der Verbindung der hydraulischen Systeme der Kraftwerksgruppe *Reißeck/Kreuzeck* und der Kraftwerksgruppe *Malta* ist eine geänderte Bewirtschaftung der beteiligten Speicher zu erwarten. Der *Große Mühlendorfer See* wird in Zukunft zusätzlich als Oberbecken des Kraftwerkes *Reißeck II* dienen. Als Unterbecken werden die kommunizierenden Speicher *Gößkar* und *Galgenbichl* verwendet (siehe Abb. 6.1<sup>49</sup>)<sup>50</sup>.

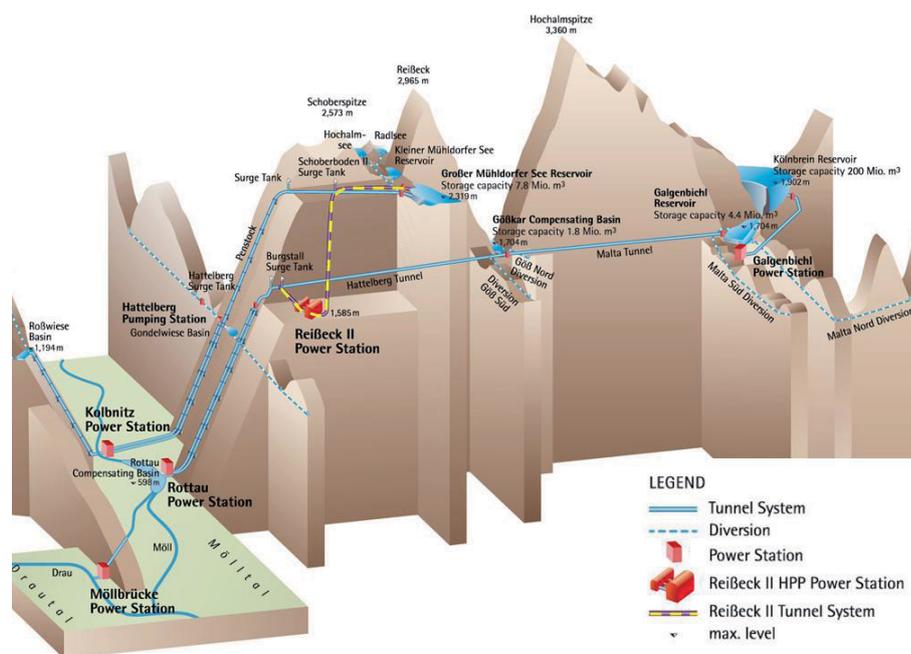


Abbildung 6.1: Schema – Lage Pumpspeicherkraftwerk Reißeck 2

Um mögliche Auswirkungen auf das Verformungsverhalten der Sperre *Großer Mühlendorfer See* aufzuzeigen, sind zwei Alternativvarianten der Betriebsführung erstellt worden. In der ersten Variante wurde ein *Wochenspeicher* und in der zweiten Variante ein *Monatsspeicher* simuliert. In den Bewirtschaftungskonzepten wurde die tägliche Änderung des Wasservolumens berechnet. Um den Verlauf des Wasserspiegels

<sup>49</sup> Quelle: Freitag u. a. (2011) S. 120 Abb. 2

<sup>50</sup> Vgl. Freitag u. a. (2011) S. 119

aufgrund der Volumsänderungen berechnen zu können, wurde zuerst die *Speicherinhaltslinie* des *Großen Mühlendorfer Sees* ermittelt. Die Speicherinhaltslinie bildet das Verhältnis zwischen dem Wasserstand und dem Wasservolumen des Sees ab. Jeder Stausee hat eine individuelle Inhaltslinie, denn diese hängt von der Talform und dem Stau- und Absenkziel der jeweiligen Sperre ab.

## 6.1 Ermittlung der Speicherinhaltslinie

Die Inhaltslinie wurde mit den Einzelvolumina der Speicherlamellen ermittelt. Um das Volumen einer solcher Lamelle berechnen zu können, werden die zwei horizontalen Oberflächen welche durch die beteiligten Höhenschichtenlinien begrenzen und der Höhenunterschied der Schichtenlinien benötigt. Für die Berechnung der Flächen sind die dafür benötigten Höhenschichtenlinien digitalisiert worden. Hierfür wurde das CAD-Programm *Autocad* verwendet. Die einzelnen Höhenschichtenlinien sind mit Polylinien nachgebildet worden und deren Flächen wurden ausgelesen.

Das Volumen der einzelnen Lamellen wurde mit der Simpsonregel berechnet<sup>51</sup>:

$$V_{i,Lam} = \frac{\Delta H}{6} \cdot \left( A_i + 4 \cdot \frac{A_i + A_{i+1}}{2} + A_{i+1} \right) \quad (6.1)$$

Der ermittelte Nutzinhalt ( $I_N$ ) beträgt  $7,62 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  und errechnet sich durch Aufsummieren aller Einzelvolumina der Lamellen ( $V_{i,Lam}$ ). Mit der Software *R* wurde die Funktion der Speicherinhaltslinie ermittelt, hierfür wurde eine Kurvenanpassung angewendet. Die Funktion lässt sich folgendermaßen anschreiben:

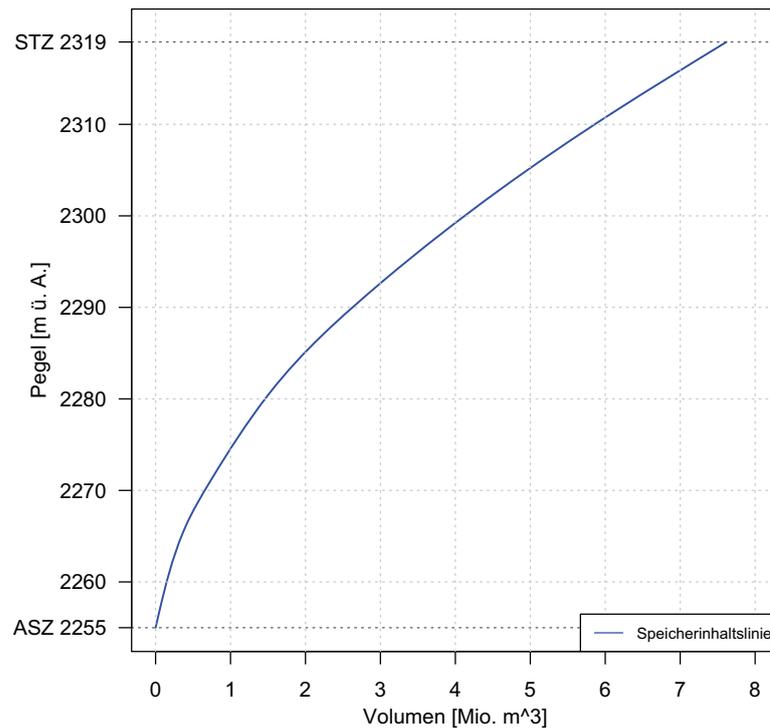
$$PG1 = 2255,469 + 28,391 \cdot V - 11,361 \cdot V^2 + 2,950 \cdot V^3 - 0,369 \cdot V^4 + 0,017 \cdot V^5 \quad (6.2)$$

In der Funktion repräsentiert die Variable  $V$  das Volumen in  $10^6 \text{ m}^3$ .

## 6.2 Bewirtschaftungskonzepte

In beiden Varianten wird der Speicher vom Vollstau beginnend bis zum Absenkziel geleert und im Pumpbetrieb wieder bis zum Stauziel gefüllt. Das Energiedargebot im Stromnetz schwankt von Tag zu Tag und bestimmt, ob Turbinen- oder Pumpbetrieb notwendig ist. Näherungsweise wurden die täglichen Betriebszeiten und somit die Volumsänderungen als konstant angenommen. Die Ab- oder Zunahme des Inhaltes

<sup>51</sup> Vgl. Bartsch (2001) S. 135



**Abbildung 6.2:** Großer Mühdorfer See – Speicherinhaltslinie

wurde über die Ausbaudurchflüsse der hydraulischen Systeme beider Kraftwerke bestimmt<sup>52 53</sup>.

max. Durchfluss	<i>Reißeck</i>	<i>Reißeck II</i>
$Q_{T,max} [m^3/s]$	4,5	80,0
$Q_{P,max} [m^3/s]$	1,5	70,0

**Tabelle 6.1:** Ausbaudurchflüsse der Kraftwerke *Reißeck* und *Reißeck II*

## Variante 1 - Wochenspeicher

Dieses Szenario sieht vor, dass im Turbinen- und Pumpbetrieb beide Kraftwerke mit voller Leistung arbeiten. Daraus summiert sich der Durchfluss im Turbinenbetrieb auf  $84,5 m^3/s$  und im Pumpbetrieb auf  $71,5 m^3/s$ . Im Turbinenbetrieb ist das Absenkziel in drei Tagen erreicht, wenn die Maschinen 8,35 Stunden pro Tag in Betrieb sind. Am dem darauffolgenden Tag wird das Wasser wieder in den *Großen Mühdor-*

<sup>52</sup> Vgl. Freitag u. a. (2011) S. 121

<sup>53</sup> Vgl. Verbund (2005) S. 17

fer See gepumpt und das Stauziel wird in vier Tagen erreicht, wenn die Maschinen 7,40 Stunden pro Tag arbeiten.

## Variante 2 - Monatsspeicher

In dieser Variante wird der Nutzinhalt innerhalb von vierzehn Tagen abgearbeitet, dies entspricht einer täglichen Laufzeit der Turbinen von 1,79 Stunden. Wenn das Absenkziel erreicht wird beginnt die zweiwöchige Phase, in der die Pumpen den Wasserspiegel bis zum Vollstau heben. Während dieser Phase sind die Pumpen 2,11 Stunden pro Tag im Einsatz.

## 6.3 FE - Berechnung

Zur Vorhersage der Sperrenverformungen wurden die Regressionsfunktionen der beiden Lote angewendet (siehe Abschnitt 5.3). Um den Vergleich zur derzeitigen Bewirtschaftung ziehen zu können, wurden die Vorhersagen mit den klimatischen Bedingungen (Betontemperaturen) des Zeitraum 3 (Oktober 2007 bis Januar 2011) erstellt. Zu diesem Zweck mussten erneut die Verformungen  $U_{R,T}$  (Temperaturverformung) und  $U_{R,W}$  (Verformung zufolge Wasserdruck) mit dem gewählten FE-Modell (siehe Abschnitt 5.1.2) berechnet werden. Dies wurde notwendig, da sich der Verlauf des Pegels von den neuen Varianten grundlegend vom dem des Jahresspeichers unterscheidet.

Zur Berechnung von  $U_{R,W}$  wurden die Ganglinien des Pegels (PG1\_1) mit der Gleichung 6.2 berechnet und in die zugehörigen *ABAQUS*-Subroutinen geschrieben. Die Ermittlung von  $U_{R,T}$  hängt u.a. von den Werten des wasserseitigen Betontemperaturfühlers (T01) ab. Da die gemessenen Werte für T01 ebenfalls von der Ganglinie des Pegels im Zeitraum 3 abhängen, konnten diese nicht für die Berechnung des Temperaturfeldes der neuen Speicherbewirtschaftungsszenarien verwendet werden. Daher wurden die Werte von T01, in Abhängigkeit von der luftseitigen Betontemperatur (T02) berechnet.

Zur Abschätzung der Temperatur T01 sind jene Perioden im Zeitraum 3 ausgewählt worden, in denen sich der Pegel unterhalb der Höhe des Temperaturfühlers (2308,00 m ü. A.) befand. In diesen Phasen sind die täglichen Differenzen der Betontemperaturen berechnet worden. Mit dem Durchschnittswert der Differenzen  $\Delta T_B$ ,

welcher sich mit  $1,5^{\circ}\text{C}$  beziffern lässt, sind die Werte für  $T01_{\text{mod}}$  durch die Abminderung der Messwerte von  $T02$  um  $\Delta T_B$  berechnet worden. Für die oberwasserseitige Randbedingung wurden die selben Fallunterscheidungen wie in Abschnitt 3.2.2 angewendet. Die Werte von  $T01_{\text{mod}}$  für den kompletten Zeitraum 3 wurden aus dem thermischen Modell ausgelesen und zwar von jenem Knoten, der sich an der Position des Temperatursensors  $T01$  befindet.

Neben der Betontemperatur  $T02$  waren, nach der Ermittlung der Verformungen  $U_{R,T}$ ,  $U_{R,W}$  und der Betontemperatur  $T01_{\text{mod}}$ , alle Variablen vorhanden welche für die Vorhersagen benötigt wurden vorhanden.

## 6.4 Vorhersage mit der Statistiksoftware R

Zur Vorhersage der Verformungen die durch die Lote ausgedrückt werden, wurde wiederum das Programm *R* eingesetzt. Zu diesem Zweck wurde der `predict`-Befehl eingesetzt. Dieser Befehl ermöglicht die Anwendung der *neuen Datensätze* mit den ausgewählten *Regressionsmodelle* der Lote. Zusätzlich sind für jeden prognostizierten Wert zwei *Prognoseintervalle* (95% und 99%ige Wahrscheinlichkeit) berechnet worden.

$$I_{UG} \leq y_p \leq I_{OG}$$

Ein solches Intervall gibt an innerhalb welcher Grenzen (Untergrenze  $I_{UG}$  und Obergrenze  $I_{OG}$ ) der vorhergesagte Wert  $y_p$  mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit liegen wird<sup>54</sup>. Die Wahrscheinlichkeit mit der sich die Prognosewerte in diesem Bereich befinden steuert die Breite des Intervalls<sup>55</sup>. So kann gesagt werden, dass die Breite des Intervalls zunimmt wenn die Wahrscheinlichkeit erhöht wird und umgekehrt.

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden in erster Linie die oberen Grenzwerte der Maxima und die unteren Grenzwerte der Minima betrachtet. Dies geschieht aus dem Grund, weil mit diesen Extremwerten überprüft werden kann, ob eine Anpassung der *Alarmgrenzen* der Lotanlagen notwendig wäre.

---

<sup>54</sup> Vgl. Backhaus u. a. (2011) S. 129

<sup>55</sup> Vgl. Wollschläger (2010) S. 225

## Diskussion der Ergebnisse

In den Abbildungen 6.4 und 6.5 sind die Ganglinien der zwei Lote für jedes der beiden Bewirtschaftungsszenarien dargestellt. Im oberen Teil der Abbildungen werden die Verläufe der Prognose und der beobachteten Werte für das Hängelot gegenübergestellt. Im unteren Teil werden sinngemäß die Verläufe für das Schwimmlot dargestellt. Zusätzlich wurden zu den Prognosewerten der Lote die relevanten Grenzwerte der Prognoseintervalle eingezeichnet. Für jene Tage an denen der Pegel den Vollstau erreicht sind dies die unteren Grenzen. Wird das Absenkziel erreicht, werden die oberen Grenzwerte der Intervalle eingezeichnet. Das 95%ige Intervall wird mit den durchgehenden Linien und das 99%ige Intervall mit den strichlierten Linien dargestellt.

### Variante 1 - Wochenspeicher

**Hängelot:** Bei der Betrachtung der Ganglinie des Hängelotes ist der jahreszeitliche Einfluss der Umgebungstemperatur sehr gut erkennbar. Des weiteren fällt auf, dass die Extrema der Prognosewerte größer ausfallen als die bisher gemessenen Extremwerte beim Jahresspeicher. Eine Erklärung dafür ist, dass Stau- und Absenkziel einmal pro Woche erreicht werden, wodurch sich eine größere Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten mit der Umgebungstemperatur ergibt.

Das Minimum (Neigung der Sperre in Richtung Luftseite) der Prognosewerte beträgt 0,04 mm, das Maximum kann mit 11,5 mm angegeben werden. Die Differenz dieser Werte beträgt somit 11,46 mm. Die durchschnittliche Differenz ( $\Delta U_m$ ) der Verformungen zwischen Vollstau und Absenkziel ergibt einen Wert von 6,40 mm.

**Schwimmlot:** Beim Schwimmlot lässt sich erkennen, dass der Haupteinfluss auf die Verformung aus der Wasserlast resultiert, weil die Extremwerte im Verlauf des Zeitraum 3 geringere Schwankungen als die des Hängelotes aufweisen. Die größte Verschiebung in Richtung Luftseite wird durch das Minimum repräsentiert, welches für den Vorhersagezeitraum -2,48 mm beträgt. Bei leerem Speicher kann die maximale Verschiebung mit 1,89 mm angegeben werden. Ein Vergleich der Extrema der gemessenen Werte des Schwimmlotes ist nur eingeschränkt möglich, da sich der Pegel seit der Inbetriebnahme des Schwimmlotes nur innerhalb der Grenzen von 2296 m ü. A. und 2317 m ü. A. bewegte. Der ermittelte Wert für  $\Delta U_m$  beträgt 3,48 mm, die Extrema sind in der Tabelle 6.2 aufgelistet.

## Variante 2 - Monatsspeicher

**Hängelot:** Grundsätzlich zeigt die Mauer ein ähnliches Verhalten wie bei der Variante des Wochenspeichers. Auffällig ist, dass bei entleertem Speicher der Einfluss der Temperatur auf die Verformung sichtbar wird. Dies lässt sich im Diagramm an den Maximalwerten erkennen. Beim Wochenspeicher tritt nur eine Spitze bei den Maxima auf und beim Monatsspeicher sind teilweise mehrere Spitzen zu erkennen. Ein Vergleich der Extremwerte in der Tabelle 6.2 zeigt, dass sich diese im Vergleich zum Wochenspeicher nur im geringen Maße unterscheiden. Das gleiche gilt für den Wert von  $\Delta U_m$ , der in diesem Fall 6,42 mm beträgt.

**Schwimmlot:** Im Verformungsverlauf des Schwimmlotes sind ebenfalls bei leerem Speicher die Einflüsse zufolge der Temperatur erkennbar.  $\Delta U_m$  nimmt den selben Wert wie bei der Variante des Wochenspeichers an. Die Extrema sind ebenfalls in der Tabelle 6.2 angeführt.

## Bauwerksüberwachung - Grenzwerte

Im Hinblick auf die *Alarmgrenzen* der Lotanlagen konnte die Erkenntnis gewonnen werden, dass sich die prognostizierten Werte des *Hängelotes* noch innerhalb der Alarmgrenzen von 0,00 mm (Luftseite) und 12,00 mm (Wasserseite) befinden (siehe Abb. 6.4). Da die Prognosewerte gewissen Unschärfen unterliegen, müssen auch die Grenzwerte der Prognoseintervalle berücksichtigt werden. Die in der Zusammenfassung der Prognose aufgelisteten Werte der Intervalle (siehe Tab. 6.2) weisen darauf hin, dass eine Anpassung der derzeit gültigen Alarmgrenzen für das Hängelot notwendig wäre.

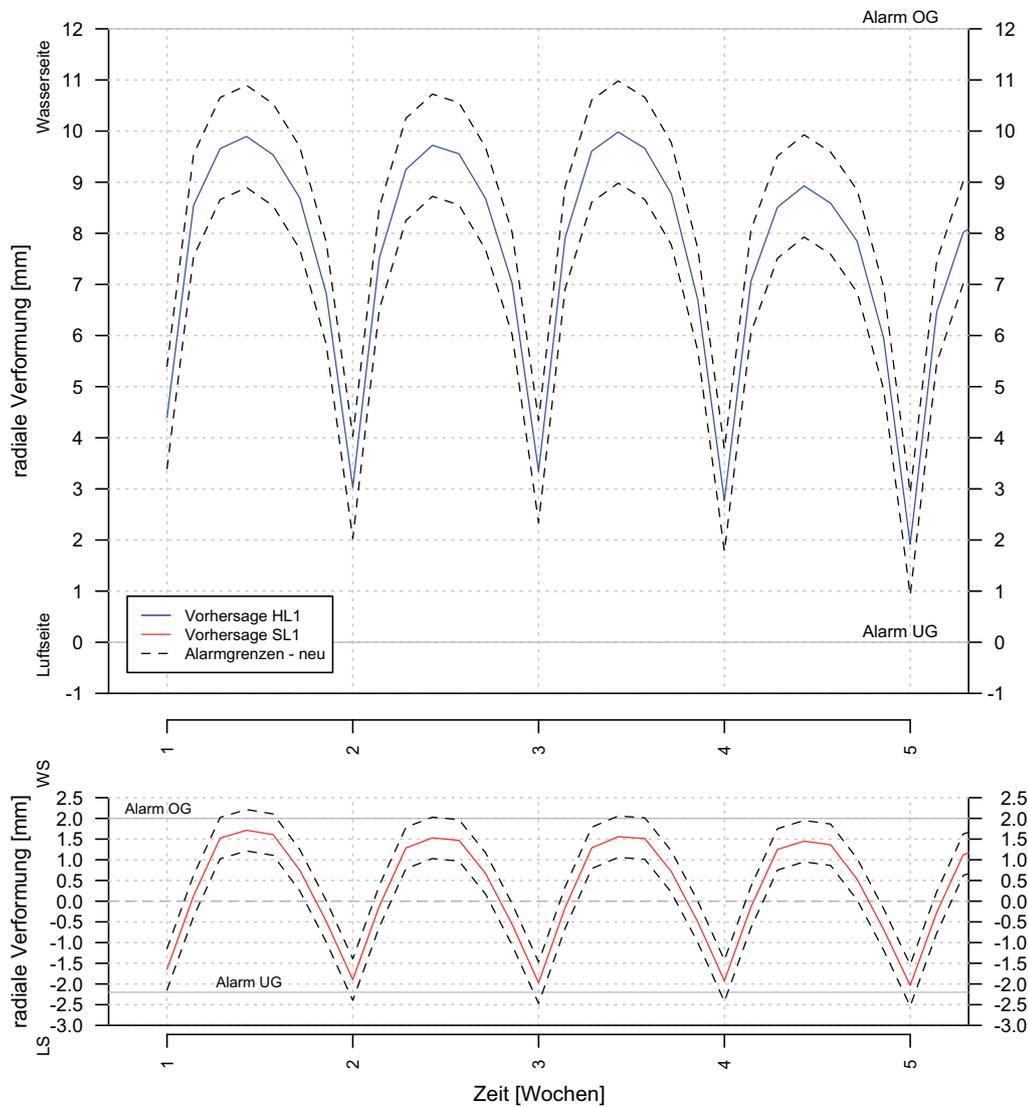
Beim *Schwimmlot* ist die Situation ähnlich. Die derzeitigen Grenzen von -2,20 mm (Luftseite) und 2,00 mm (Wasserseite) werden zumindest bei Vollstau schon von den prognostizierten Werten überschritten (siehe Abb. 6.5). Ist der Speicher entleert wird die Obergrenze für den Alarm von den Maximalwerten der beiden Prognoseintervalle, wenn auch nur geringfügig, überschritten. Eine Änderung der vorhandenen Alarmwerte wäre bei dieser Lotanlage ebenfalls notwendig.

Mit den erstellten Funktionen ist es in Zukunft möglich, die Grenzwerte auf der Basis des Vorhersagewertes zu definieren. In der Abbildung 6.3 sind die Vorhersagewerte der beiden Lotanlagen mit den dynamischen Alarmgrenzen dargestellt. Die Grenzen des Hängelotes sind die Vorhersagewerte  $\pm 1,0$  mm und beim Schwimmlot die Vorhersagewerte  $\pm 0,5$  mm. Des Weiteren erkennt man in dieser Abbildung, dass

	Hängelot				Schwimmlot			
	Woche		Monat		Woche		Monat	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Prognosewerte	0,04	11,51	0,04	11,72	-2,48	1,89	-2,54	1,90
95% - Intervall	-0,51	12,05	-0,50	12,26	-2,66	2,06	-2,72	2,07
99% - Intervall	<b>-0,68</b>	12,22	-0,67	<b>12,44</b>	-2,72	2,11	<b>-2,77</b>	<b>2,13</b>

**Tabelle 6.2:** Prognose – Zusammenfassung der Verformungen (Extremwerte)

ein unerwartetes Verhalten der Sperre früher erkannt wird, als bei den derzeitigen, fixen Grenzwerten (Alarm OG und UG in der Abbildung).



**Abbildung 6.3:** Wochenspeicher mit dynamischen Alarmgrenzen

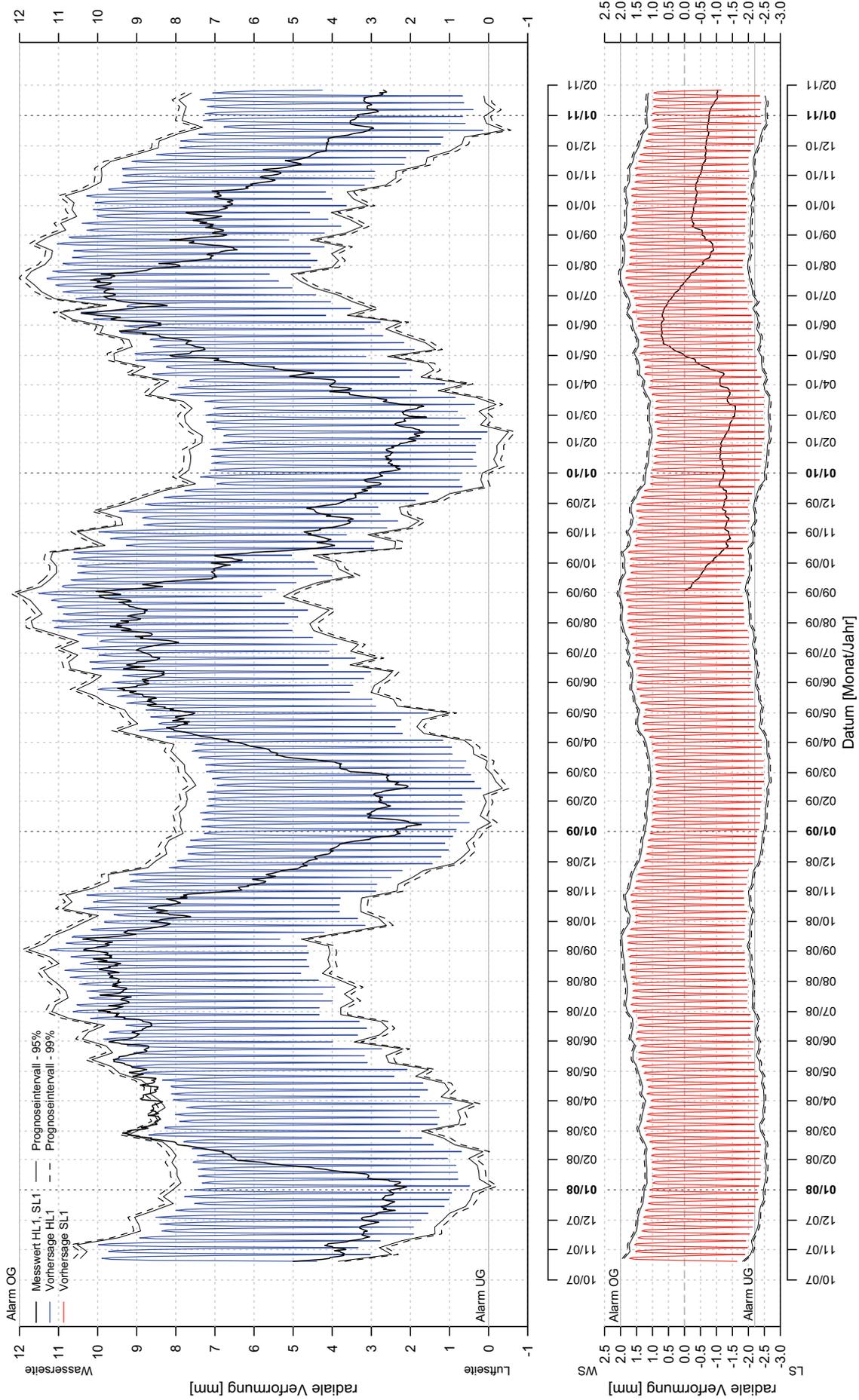


Abbildung 6.4: Vorhersage der Verformungen mit R – Wochenspeicher

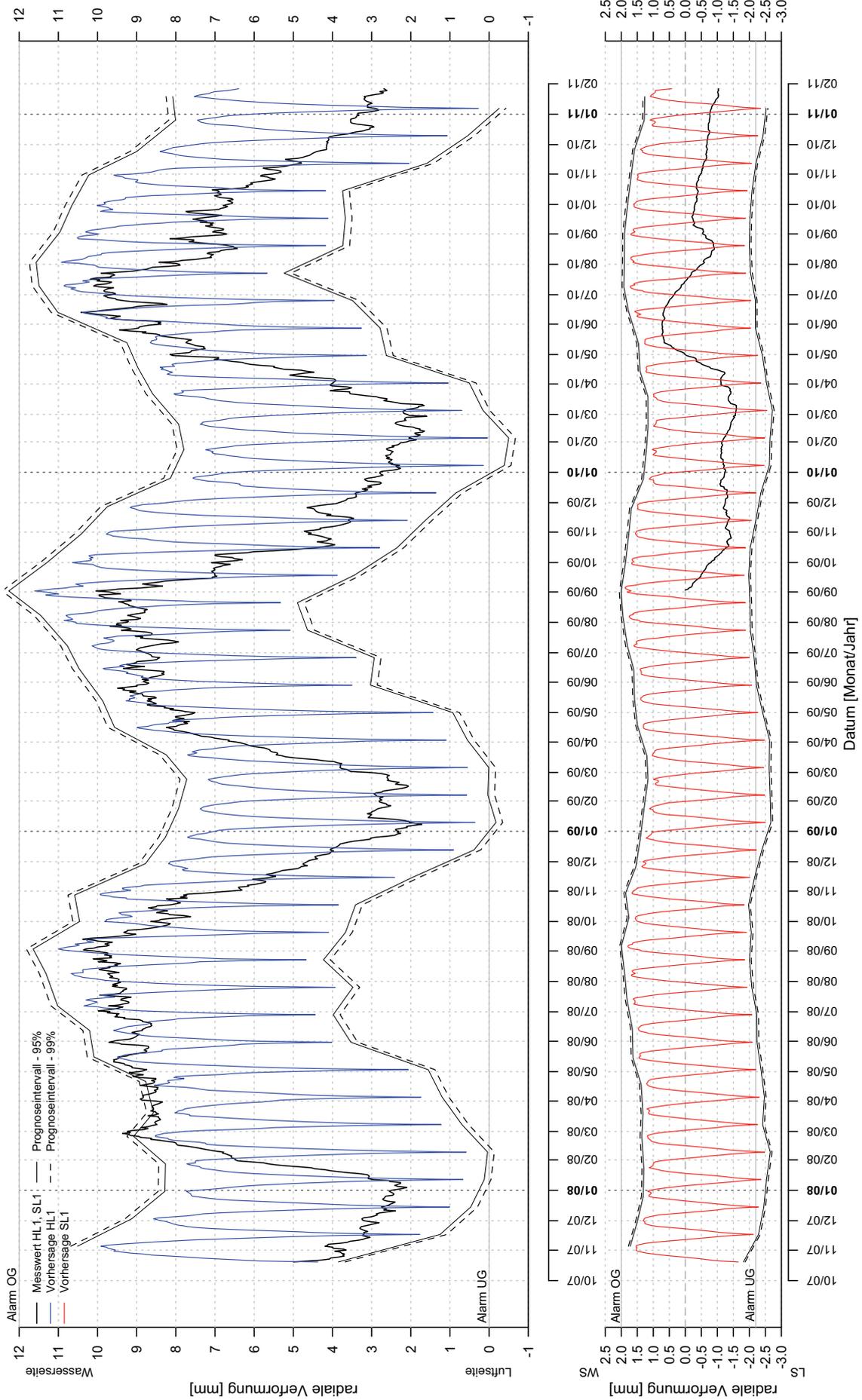
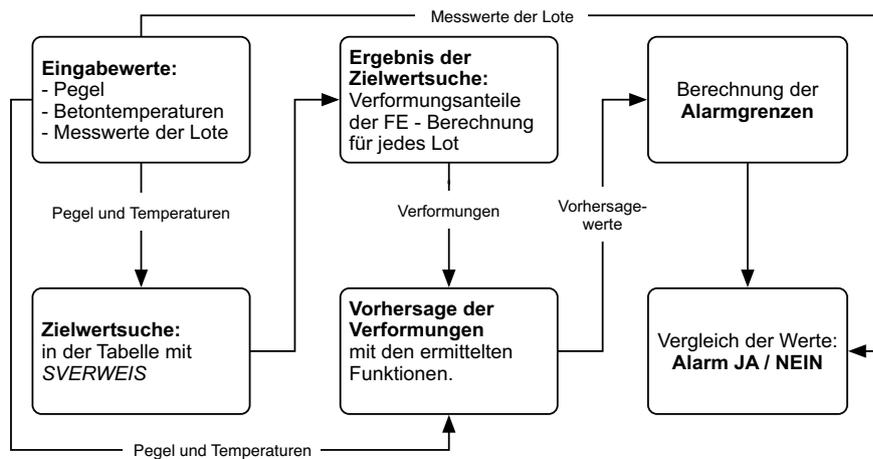


Abbildung 6.5: Vorhersage der Verformungen mit R – Monatspeicher

## 6.5 Vorhersage mit EXCEL

Um die Prognose der Verformungen ohne der erneuten Berechnung der Verformungen mit *ABAQUS* durchführen zu können, wurde zusätzlich eine *EXCEL*-Tabelle erstellt (vgl. Ablaufdiagramm in der Abb. 6.6). In dieser Tabelle werden die beiden Betontemperaturen, die Lufttemperatur und der Pegel als Eingabewerte benötigt. Da in den Regressionsmodellen neben den bereits genannten Parametern auch die Verformungen aus der FE-Berechnung (Modell *V485*) einfließen, wurden die Werte für  $U_{R,W}$  und  $U_{R,T}$  tabelliert.



**Abbildung 6.6:** Vorhersage der Verformungen mit *EXCEL* – Ablauf

Hierfür wurde  $U_{R,W}$  erneut berechnet und zwar wurde der Pegel, vom Stauziel beginnend, in 5 cm Schritten verringert. Wenn in der Eingabetabelle ein Wert für den Pegel eingegeben wird, sucht der Befehl *SVERWEIS* jene Verformung  $U_{R,W}$  aus der Tabelle, deren Pegel kleiner, gleich dem Eingabewert ist. Die Verformungen zufolge Temperatur wurden aus der FE-Berechnung aus den Zeitraum 3 extrahiert und ebenfalls in die Tabelle eingefügt. Jedem Wert von  $U_{R,T}$  wurden die zugehörigen Werte der drei Temperaturen zugeordnet. Für jede Zeile der Tabelle wird anhand der folgenden Formel die Summe der Absolutwerte der Differenzen von den gemessenen Werten (z.B.:  $MT1_b$ ) und den Werten in der Tabelle (z.B.:  $MT1_{tab}$ ) berechnet.

$$\Delta_{Temp} = G_1 \cdot |MT1_b - MT1_{tab}| + G_2 \cdot |T01_b - T01_{tab}| + G_3 \cdot |T02_b - T02_{tab}| \quad (6.3)$$

Die Faktoren  $G_{1..3}$  stellen die Gewichte dar, mit denen die einzelnen Abweichungen multipliziert werden. Die Abweichungen der Betontemperaturen werden stärker gewichtet als die Lufttemperatur, denn sie sind auf Grund des Einflusses über die thermischen Randbedingungen im FE-Modell direkt für die Verformung  $U_{R,T}$  verantwortlich. In jener Zeile der Tabelle, in der das Kriterium  $\Delta_{Temp} \rightarrow \min$  zutrifft

wird mittels *SVERWEIS* die zugehörige Verformung  $U_{R,T}$  ausgewählt. Wenn die zu den Eingabewerten passenden Verformungen gefunden sind, wird mit der Gleichung 5.9 die Prognose der Verformung in radialer Richtung für das Hängelot errechnet. Anhand der Prognosewerte werden im Anschluss die Grenzwerte berechnet.

Die Vorhersage für das Schwimmot erfolgt analog mit dem Unterschied, dass die Gleichung 5.10 und die dem Schwimmot zugehörigen Verformungen aus der FE-Berechnung verwendet werden.

Werden in die Eingabetabelle zusätzlich die gemessenen Werte der Lote eingetragen kann überprüft werden, ob die erfassten Messwerte der Lote innerhalb der Grenzen liegen. In der Abbildung 6.7 ist der Aufbau der Tabelle ersichtlich.

zNr.	Eingabe							Prognose		Grenzen HL ( $\pm 1,0\text{mm}$ )		Grenzen SL ( $\pm 0,5\text{mm}$ )	
	Datum	PG1	MT1	T01	T02	HL1	SL1	HL1 <sub>progn.</sub>	SL1 <sub>progn.</sub>	OG	UG	OG	UG
	[m ü. A.]	[°C]	[°C]	[°C]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
z1	03.09.09	2309,85	9,00	14,80	15,80	9,66	0,00	9,64	0,01	10,64	8,64	0,51	-0,49
z2	04.09.09	2309,85	8,60	14,70	14,80	9,45	-0,09	9,43	0,02	10,43	8,43	0,52	-0,48
z3	05.09.09	2310,25	0,20	14,50	13,00	8,91	-0,11	8,90	-0,01	9,90	7,90	0,49	-0,51
z4	06.09.09	2310,85	0,70	14,20	12,40	8,62	-0,19	8,57	-0,11	9,57	7,57	0,39	-0,61
z5	07.09.09	2311,10	5,20	14,10	11,50	8,34	-0,21	8,25	-0,13	9,25	7,25	0,37	-0,63
z6	08.09.09	2311,10	8,70	13,90	13,00	8,62	-0,22	8,55	-0,18	9,55	7,55	0,32	-0,68
z7	09.09.09	2311,20	3,60	13,80	14,10	8,85	-0,23	8,77	-0,22	9,77	7,77	0,28	-0,72
z8	10.09.09	2311,35	6,70	13,70	13,40	8,66	-0,24	8,60	-0,24	9,60	7,60	0,26	-0,74
z9	11.09.09	2311,35	6,40	13,60	12,60	8,44	-0,28	8,42	-0,23	9,42	7,42	0,27	-0,73

**Abbildung 6.7:** Vorhersage der Verformungen mit *EXCEL* – Layout der Tabelle

## 7 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Masterarbeit ist die Ermittlung von *Funktionen* welche zur Beschreibung der beobachteten Mauerverformungen dienen. Durch die Anwendung der *hybriden, multiplen Regressionsanalyse* wird die Zieldefinition umgesetzt. Die errechneten Funktionen werden zur Vorhersage der Verformungen verwendet, wodurch die Grenzwerte der zulässigen Verformungen für die jeweils aktuellen Bedingungen berechnet werden können. Diese Funktionen werden auch zur Ermittlung der Auswirkungen auf die Verformungen zufolge geänderter Bewirtschaftungskonzepte eingesetzt.

Um definierten Ziele zu erreichen, werden im ersten Schritt die *strukturmechanischen Berechnungen* mit Hilfe der FE-Methode durchgeführt. Nach der Netzgenerierung, auf Basis des Querschnittes durch den Block 14 und des Untergrundes in der näheren Umgebung der Sperre, werden die Modelle der beiden Lastfälle und deren Randbedingungen festgelegt.

Nach der Berechnung des *Initialtemperaturfeldes* der Mauer, werden die Randbedingungen für das *thermische Modell* festgelegt. Dieses Modell dient der Berechnung des Temperaturfeldes welches wiederum zur Ermittlung der Temperaturverformungen im mechanischen Modell verwendet wird.

Im mechanischen Modell werden in zwei getrennten Berechnungsschritten, die Verformungen auf Grund der Wasserlast ( $U_{R,W}$ ) und die Gesamtverformungen der gemeinsam wirkenden Belastungen ( $U_{R,Ges}$ ) berechnet. Da sich die Verformungsanalyse im linear, elastischen Bereich befindet, kann die Verformung aus der Temperatureinwirkung ( $U_{R,T}$ ) durch Subtraktion der ersten beiden Verformungen berechnet werden.

Die beiden Verformungsanteile werden zusammen mit den Messwerten der Temperatursensoren und des Pegels als unabhängige Variablen in der *hybriden Regressionsanalyse* verwendet. Als erstes wird die Regression für das *Hängelot* durchgeführt. Der anfängliche Ansatz des zweiteiligen Regressionsmodells trägt, trotz der unterschiedlichen Varianten des FE-Modells, nicht entscheidend zur Reduzierung der Residuen

im Zeitraum 1 bei. Der Umstieg auf die Statistiksoftware *R* erlaubt die zeitsparende Berechnung von *multiplen, linearen Regressionsmodellen*. Mit diesen Modellen können die Abweichungen zu den gemessenen Werten des Hängelotes entscheidend reduziert werden.

Ein Vergleich der einzelnen Regressionsergebnisse zeigt, dass die Verformungen des FE-Modells *V485* (siehe Abschnitt 5.1.2) am besten zur Minimierung der Residuen geeignet sind. Das Problem der *Multikollinearität* wird nach dem Entfernen der untereinander linear abhängigen Variablen beseitigt. Dadurch kann die Regressionsfunktion für das Hängelot auf fünf Regressoren verkleinert werden (siehe Abschnitt 5.3). Trotz dieser Reduktion zeigt das gewählte Modell eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten des Hängelotes.

Im Laufe der Regressionsuntersuchungen konnte auch gezeigt werden, dass der *Pegel*, wenn er sich unterhalb des wasserseitigen Fußpunktes befindet, einen nachteiligen Einfluss auf die Güte der Regressionsfunktion ausübt. Die Regressionsparameter werden u. a. durch den Verlauf des Pegels angepasst, auch wenn sich dieser unterhalb der Fundierung der Mauer befindet und somit keinen Einfluss auf die gemessenen Verformungen ausübt. Folglich werden in den weiteren Regressionsanalysen ausschließlich die modifizierten Werte des Pegels eingesetzt. Dies bedeutet, dass der Pegel niemals unter der Höhe der Aufstandsfläche zu liegen kommt.

Bei der Ermittlung der Regressionsfunktion des *Schwimmlotes* wird ein alternativer Zugang zur Optimierung des Regressionsmodells angewendet. Der Regressionsfunktion werden die einzelnen Regressoren schrittweise hinzugefügt und im Anschluss wird die *Multikollinearitätsanalyse* durchgeführt. Jene Regressoren deren *Variance Inflation Factor (VIF)* den zulässigen Grenzwert überschreitet, werden im nächsten Schritt ausgeschlossen. Die gewählte Funktion für das Schwimmlot (siehe Abschnitt 5.3) beinhaltet vier unabhängige Variablen. Mit der Aufnahme der gemessenen Betontemperaturen (T01 und T02) in dieses Regressionsmodell werden die Residuen im Durchschnitt verkleinert. Der Nachteil dieser Vorgehensweise ist, dass die prognostizierten Werte stellenweise nachteilig von den Betontemperaturen beeinflusst werden.

Mit der *Variantenstudie* werden die Auswirkungen auf die Verformungen durch die Änderung der Speicherbewirtschaftung gezeigt. Im Vergleich zur momentanen Betriebsart sind die Extremwerte der Verformungen größer, wodurch die Anpassung der derzeitigen Alarmgrenzen notwendig wäre. Zum Abschluss wird anhand einer *EXCEL*-Tabelle die praktische Anwendung der Verformungsprognose mit den gewählten Regressionsmodellen vorgeführt.

## Fazit

Die Ergebnisse der *hybriden Regressionsanalyse* sind zwei kompakte Funktionen zur Modellierung der Sperrenverformungen. Die physikalischen Zusammenhänge werden mit den Verformungen zufolge der Wasserlast  $U_{R,W}$  und zufolge der Temperatureinwirkung  $U_{R,T}$  erklärt. Durch Hinzufügen der Messwerte der Betontemperaturen und des Wasserspiegels werden die Residuen zusätzlich verringert.

Die *Qualität* des Regressionsmodells des Hängelotes lässt sich mit *sehr gut* beurteilen. Dies kann mit dem Ergebnis der Regressionsanalyse und der graphischen Darstellung der Schätzwerte des Modells sowie den Residuen bekräftigt werden.

Aufgrund der relativ kurzen Betriebszeit des Schwimmlotes und den geringen Schwankungen des Pegels, konnten die Regressoren der Funktion mit *guter Qualität* geschätzt werden. Der Einsatz der beiden Betontemperaturen als Regressoren, äußert sich allgemein in der Verkleinerung der Residuen. Ein einigen Bereichen entstehen dadurch aber größere Abweichungen zu den Messwerten.

Nach der Inbetriebnahme des zukünftigen Pumpspeicherkraftwerk Reißbeck II ist eine geänderte Speicherbewirtschaftung zu erwarten. Die Untersuchung der Verformungen durch diese Änderung hat gezeigt, dass die derzeitigen Grenzwerte des Alarms angepasst werden müssten. Mit den in dieser Arbeit erstellten Funktionen, können die Grenzwerte der Lotanlagen für die jeweilige Situation im Speicher berechnet werden. Dadurch ist ein unerwartetes Verhalten der Sperre früher erkennbar.

Die Prognose der Verformungen kann mit der Kenntnis des Pegels, den Betontemperaturen und der Lufttemperatur durchgeführt werden. Die zu den Eingabewerten passenden Verformungen werden mit einer Zielwertsuche (z.B.: in *EXCEL*) aus einer Tabelle ausgewählt und in die Funktion eingesetzt. Der Vorteil dieser Methode ist, dass die bereits berechneten Verformungsanteile aus der FE-Berechnung verwendet werden können.

**Anmerkung:** Die Regressionsfunktionen dienen ausschließlich zur Prognose der Verformungen für die Sperre *Großer Mühlendorfer See*, weil die Funktionen über die Schätzung der Regressionskoeffizienten an die örtlichen Gegebenheiten (z.B.: Geometrie, Temperaturfeld des Querschnitts und hydrostatische Wasserlast) angepasst wurden.

# Literaturverzeichnis

- [ATCOLD 1991] ATCOLD ; HUBER, F. (Hrsg.) ; HUBER, E. (Hrsg.) ; MEISINGER, R. (Hrsg.) ; M.HANZL (Hrsg.): *Dams In Austria*. ATCOLD - Austrian National Committee on Large Dams, 1991
- [Backhaus u. a. 2011] BACKHAUS, K. ; ERICHSON, B. ; PLINKE, W. ; WEIBER, R.: *Multivariate Analysemethoden*. Springer, 2011
- [Bartsch 2001] BARTSCH, H.-J.: *Taschenbuch Mathematischer Formeln*. 19. Auflage. Fachbuchverlag Leipzig, 2001
- [Czerny und Zenz 2010] CZERNY, H. ; ZENZ, G.: Regulations and Engineering Judgement have to Complement Each Other. In: *8th ICOLD European Club Symposium in Innsbruck* (2010)
- [Freitag u. a. 2011] FREITAG, M. ; LARCHER, M. ; BLAUHUT, A.: Das Pumpspeicherkraftwerk (PSKW) Reisseck II. In: *Geomechanics and Tunnelling* 4 (2011), Nr. 2, S. 119 – 128
- [Groß 2010] GROSS, Jürgen: *Grundlegende Statistik mit R*. Springer, 2010
- [Horninger 1960] HORNINGER, G.: Baugeologisches aus der Kraftwerksgruppe Reisseck-Kreuzeck. In: *ÖZE - Österreichische Zeitschrift für Energiewirtschaft* Jahrgang 13 (1960), Nr. 6
- [Partl 1977] PARTL, R.: *Large Dams In Austria*. Austrian National Committee on Large Dams, 1977 (Die Talsperren Österreichs Heft 24)
- [Steinböck u. a. 1960] STEINBÖCK, W. ; FINGER, W. ; HESCHL, W.: Staumauern und Staudammanlagen der Speicherstufe. In: *ÖZE - Österreichische Zeitschrift für Energiewirtschaft* Jahrgang 13 (1960), Nr. 6
- [STK 2010] STK: *Analysemethoden für die Vorhersage und Kontrolle des Verhaltens von Talsperren*. STK - Schweizerisches Talsperrenkomitee. 2010
- [Verbund 2005] VERBUND: *Die Speicherkraftwerke der AHP in Kärnten*. Verbund - Austrian Hydro Power AG (Verleger). 2005

- [Weber 2001] WEBER, B.: Linear Regression Models For Dam Monitoring Based on Statistical Analysis. In: *Sixth ICOLD Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams* (2001)
- [Widmann 1999] WIDMANN, R.: *Gewölbemauern (Erfahrungen - Probleme - Entwicklungen)*. Österreichisches Nationalkomitee für Talsperren, 1999 (Die Talsperren Österreichs Heft 33)
- [Wollschläger 2010] WOLLSCHLÄGER, D. ; DETTE, H. (Hrsg.) ; HÄRDLE, W. (Hrsg.): *Grundlagen der Datenanalyse mit R*. Springer, 2010 (Statistik und ihre Anwendungen)
- [WRG 1959] WRG: *WRG 1959 idF BGBl. I Nr. 123/2006*. BM für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. 1959

# A Anhang

## A.1 Varianten des FE - Modells

### Details zum FE - Modell V1

Kennwert	Einheit	Sperrenbeton	Fels (Granitgneis)
E-Modul	[MPa]	15000	20000
Wärmeausdehnungskoeff. ( $\alpha$ )	[1/K]	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$

**RB<sub>Fels</sub>** Wasser- und Luftseite konst. 4 °C

**RB<sub>KG</sub>** nicht verwendet

### Details zum FE - Modell V2

Kennwert	Einheit	Sperrenbeton	Fels (Granitgneis)
E-Modul	[MPa]	15000	20000
Wärmeausdehnungskoeff. ( $\alpha$ )	[1/K]	$0,8 \cdot 10^{-5}$	$0,8 \cdot 10^{-5}$

**RB<sub>Fels</sub>** Wasser- und Luftseite konst. 4 °C

**RB<sub>KG</sub>** nicht verwendet

### Details zum FE - Modell V3

Kennwert	Einheit	Sperrenbeton	Fels (Granitgneis)
E-Modul	[MPa]	15000	20000
Wärmeausdehnungskoeff. ( $\alpha$ )	[1/K]	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$

**RB<sub>Fels</sub>** Wasser- und Luftseite konst. 4 °C

**RB<sub>KG</sub>** nicht verwendet

**Details zum FE - Modell V4**

Kennwert	Einheit	Sperrenbeton	Fels (Granitgneis)
E-Modul	[MPa]	20000	20000
Wärmeausdehnungskoeff. ( $\alpha$ )	[1/K]	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$

**RB<sub>Fels</sub>** Wasser- und Luftseite konst. 4°C

**RB<sub>KG</sub>** nicht verwendet

**Details zum FE - Modell V5**

Kennwert	Einheit	Sperrenbeton	Fels (Granitgneis)
E-Modul	[MPa]	20000	20000
Wärmeausdehnungskoeff. ( $\alpha$ )	[1/K]	$1,25 \cdot 10^{-5}$	$1,25 \cdot 10^{-5}$

**RB<sub>Fels</sub>** Wasser- und Luftseite konst. 4°C

**RB<sub>KG</sub>** nicht verwendet

## A.2 Varianten der Regressionsanalyse

### A.2.1 Hängelot

```

1 Call:
2 lm(formula = (HL1 ~ V485URT + I(V485URT^2) + MT1 + T01 + T02 +
3   V485URW + PG1_o), data = Inp_1, na.action = na.exclude)
4
5 Residuals:
6     Min       1Q   Median       3Q      Max
7 -0.84377 -0.16466  0.05924  0.20726  0.62045
8
9 Coefficients:
10              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)      VIF
11 (Intercept)  52.6406773   1.6450273   32.000 < 2e-16 *** ---
12 V485URT      0.4431233   0.0095037   46.627 < 2e-16 *** 5.230e+00
13 I(V485URT^2) 0.0401398   0.0025753   15.587 < 2e-16 *** 1.560e+00
14 MT1          0.0086101   0.0024075    3.576 0.000364 *** 4.336e+00
15 T01         -0.0568671   0.0047027  -12.093 < 2e-16 *** 4.929e+00
16 T02          0.1657173   0.0054016   30.680 < 2e-16 *** 1.433e+01
17 V485URW     1.7571281   0.0199226   88.198 < 2e-16 *** 4.039e+00
18 PG1_o       -0.0197663   0.0007222  -27.371 < 2e-16 *** 2.723e+00
19 ---
20 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
21
22 Residual standard error: 0.2661 on 1074 degrees of freedom
23   (18 observations deleted due to missingness)
24 Multiple R-squared:  0.9904, Adjusted R-squared:  0.9903
25 F-statistic: 1.579e+04 on 7 and 1074 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

**Abbildung A.1:** Regressionsanalyse mit *R*: Ergebnis - Modell *V485\_2\_1*

```

1 Call:
2 lm(formula = (HL1 ~ V485URT + I(V485URT^2) + MT1 + T01 +
3   V485URW + PG1_o), data = Inp_1, na.action = na.exclude)
4
5 Residuals:
6     Min       1Q   Median       3Q      Max
7 -1.17360 -0.20986  0.01635  0.24996  1.08022
8
9 Coefficients:
10              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)      VIF
11 (Intercept)  48.6564980  2.2452984  21.670  <2e-16 *** ---
12 V485URT      0.6491858  0.0092057  70.520  <2e-16 *** 2.617e+00
13 I(V485URT^2) 0.0458912  0.0035167  13.050  <2e-16 *** 1.552e+00
14 MT1          0.0459722  0.0028435  16.168  <2e-16 *** 3.226e+00
15 T01          0.0091844  0.0057244   1.604   0.109    3.896e+00
16 V485URW     2.0886935  0.0229152  91.149  <2e-16 *** 2.850e+00
17 PG1_o       -0.0177416  0.0009846 -18.019  <2e-16 *** 2.701e+00
18 ---
19 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
20
21 Residual standard error: 0.3644 on 1075 degrees of freedom
22   (18 observations deleted due to missingness)
23 Multiple R-squared:  0.9819, Adjusted R-squared:  0.9818
24 F-statistic:  9745 on 6 and 1075 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

Abbildung A.2: Regressionsanalyse mit R: Ergebnis - Modell V485\_3\_1

```

1 Call:
2 lm(formula = (HL1 ~ V485URT + I(V485URT^2) + T01 + T02 +
3   V485URW + PG1_o), data = Inp_1, na.action = na.exclude)
4
5 Residuals:
6     Min       1Q   Median       3Q      Max
7 -0.87496 -0.17776  0.06125  0.20143  0.57974
8
9 Coefficients:
10              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)      VIF
11 (Intercept)  53.5455151  1.6343439  32.76  <2e-16 *** ---
12 V485URT      0.4340737  0.0092107  47.13  <2e-16 *** 4.859e+00
13 I(V485URT^2) 0.0403143  0.0025889  15.57  <2e-16 *** 1.560e+00
14 T01          -0.0538108  0.0046497 -11.57  <2e-16 *** 4.766e+00
15 T02          0.1754890  0.0046850  37.46  <2e-16 *** 1.067e+01
16 V485URW     1.7571757  0.0200316  87.72  <2e-16 *** 4.039e+00
17 PG1_o       -0.0201881  0.0007164 -28.18  <2e-16 *** 2.651e+00
18 ---
19 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
20
21 Residual standard error: 0.2676 on 1075 degrees of freedom
22   (18 observations deleted due to missingness)
23 Multiple R-squared:  0.9903, Adjusted R-squared:  0.9902
24 F-statistic: 1.822e+04 on 6 and 1075 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

Abbildung A.3: Regressionsanalyse mit R: Ergebnis - Modell V485\_4\_1

## A.2.2 Schwimmlot

```

1 Call:
2 lm(formula = (V485URW ~ PG1_1),
3     data = Inp_3, na.action = na.exclude)
4
5 Residuals:
6      Min       1Q   Median       3Q      Max
7 -0.044751 -0.010640  0.002815  0.012644  0.029676
8
9 Coefficients:
10              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
11 (Intercept) 88.0884985  0.3385556   260.2  <2e-16 ***
12 PG1_1       -0.0384427  0.0001465  -262.4  <2e-16 ***
13 ---
14 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
15
16 Residual standard error: 0.01708 on 510 degrees of freedom
17 (2 observations deleted due to missingness)
18 Multiple R-squared:  0.9926, Adjusted R-squared:  0.9926
19 F-statistic: 6.887e+04 on 1 and 510 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

**Abbildung A.4:** Regressionsanalyse mit *R*: Multikollinearitätsanalyse der Variablen  $U_{R,W}$  und  $PG1_1$

```

1 Call:
2 lm(formula = (SL1 ~ V485URT + V485URW),
3     data = Inp_3, na.action = na.exclude)
4
5 Residuals:
6      Min       1Q   Median       3Q      Max
7 -0.37318 -0.08957  0.00934  0.13887  0.27196
8
9 Coefficients:
10              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)      VIF
11 (Intercept)  1.66150     0.02878   57.73  <2e-16 ***  ---
12 V485URT      3.34106     0.14139   23.63  <2e-16 ***  1.045e+00
13 V485URW      3.08495     0.03683   83.75  <2e-16 ***  1.045e+00
14 ---
15 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
16
17 Residual standard error: 0.162 on 509 degrees of freedom
18 (2 observations deleted due to missingness)
19 Multiple R-squared:  0.9327, Adjusted R-squared:  0.9324
20 F-statistic: 3527 on 2 and 509 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

**Abbildung A.5:** Regressionsanalyse mit *R*: Ergebnis - Modell  $SLV_{485\_1\_3}$

```

1 Call:
2 lm(formula = (SL1 ~ V485URT + T01 + T02 + PG1_1), data = Inp_3,
3     na.action = na.exclude)
4
5 Residuals:
6     Min       1Q   Median       3Q      Max
7 -0.18289 -0.07074 -0.02252  0.07344  0.23847
8
9 Coefficients:
10             Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)      VIF
11 (Intercept) 276.576404   2.518384  109.823 < 2e-16 *** ---
12 V485URT      0.814430    0.115000   7.082 4.77e-12 *** 1.941e+00
13 T01          0.100419    0.003295  30.480 < 2e-16 *** 5.572e+00
14 T02         -0.024026    0.001684 -14.269 < 2e-16 *** 5.451e+00
15 PG1_1       -0.120248    0.001092 -110.167 < 2e-16 *** 1.731e+00
16 ---
17 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
18
19 Residual standard error: 0.09672 on 507 degrees of freedom
20   (2 observations deleted due to missingness)
21 Multiple R-squared:  0.9761, Adjusted R-squared:  0.9759
22 F-statistic:  5180 on 4 and 507 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

**Abbildung A.6:** Regressionsanalyse mit *R*: Ergebnis - Modell *V485\_4L3*

```

1 Call:
2 lm(formula = (SL1 ~ V485URT + I(V485URT^2) + T01 + T02 +
3     V485URW + I(V485URW^2)), data = Inp_3, na.action = na.exclude)
4
5 Residuals:
6     Min       1Q   Median       3Q      Max
7 -0.206960 -0.071139 -0.000454  0.071286  0.217168
8
9 Coefficients:
10             Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)      VIF
11 (Intercept)  1.129335   0.035936  31.427 < 2e-16 *** ---
12 V485URT      0.918941   0.107183   8.574 < 2e-16 *** 2.182e+00
13 I(V485URT^2) -6.201067   2.084697  -2.975 0.00307 **  1.771e+00
14 T01          0.089535   0.003052  29.334 < 2e-16 *** 6.190e+00
15 T02         -0.021159   0.001522 -13.905 < 2e-16 *** 5.762e+00
16 V485URW      3.243786   0.118762  27.313 < 2e-16 *** 3.948e+01
17 I(V485URW^2)  0.134937   0.091816   1.470 0.14228  3.902e+01
18 ---
19 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
20
21 Residual standard error: 0.08502 on 505 degrees of freedom
22   (2 observations deleted due to missingness)
23 Multiple R-squared:  0.9816, Adjusted R-squared:  0.9814
24 F-statistic:  4495 on 6 and 505 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

**Abbildung A.7:** Regressionsanalyse mit *R*: Ergebnis - Modell *V485\_5\_3*

```

1 Call:
2 lm(formula = (SL1 ~ V485URT + I(V485URT^2) + MT1 +
3     T01 + T02 + V485URW), data = Inp_3, na.action = na.exclude)
4
5 Residuals:
6     Min       1Q   Median       3Q      Max
7 -0.208067 -0.071139  0.001678  0.070955  0.218306
8
9 Coefficients:
10             Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)    VIF
11 (Intercept)  1.0995142  0.0236729  46.446 < 2e-16 *** ---
12 V485URT      0.9685852  0.1057593   9.158 < 2e-16 *** 2.131
13 I(V485URT^2) -5.3254555  2.0332074  -2.619 0.00908 **  1.690
14 MT1         0.0018594  0.0009896   1.879 0.06082 .   3.751
15 T01         0.0884977  0.0029499  30.001 < 2e-16 *** 5.797
16 T02        -0.0228182  0.0018562 -12.293 < 2e-16 *** 8.597
17 V485URW     3.0755484  0.0291582 105.478 < 2e-16 *** 2.386
18 ---
19 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
20
21 Residual standard error: 0.0849 on 505 degrees of freedom
22 (2 observations deleted due to missingness)
23 Multiple R-squared:  0.9817, Adjusted R-squared:  0.9815
24 F-statistic: 4507 on 6 and 505 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

**Abbildung A.8:** Regressionsanalyse mit *R*: Ergebnis - Modell *V485\_6\_3*

## A.3 R - Skript

Im folgenden Skript soll beispielhaft die Anwendung der Regressionsanalyse mit der Statistiksoftware *R* gezeigt werden. Das Skript lässt sich in vier Teilbereiche unterteilen:

1. Einlesen der Daten aus der Textdatei
2. Definition der Regressionsmodelle
3. Erstellen der Diagramme
4. Ausgabe der Ergebnisse

```

1 #####
2 ##### Import #####
3
4 # Einlesen der Messwerte vom HL1 aus einer Textdatei und data.frame Objekt erzeugen
5 Inp_1 <- read.table(file = "HL1_Messwerte_Varianten_1_pegel.txt", sep = "\t" , header =
6   TRUE)
7 Inp_3 <- read.table(file = "HL1_Messwerte_Varianten_3_pegel.txt", sep = "\t" , header =
8   TRUE)
9
10 library(car) # Paket fuer VIF-Test
11 library(plotrix) # Paket fuer ablineclip
12
13 #####
14 ##### Regression #####
15
16 # Unterschiedliche Modelle der Variante 485 fuer den Zeitraum "1" erstellen
17
18 V485_1_1 <- lm((HL1 ~ V485URT + I(V485URT^2) + I(V485URT^3) + MT1 + T01 + T02 +
19   V485URW + I(V485URW^2) + PG1_o + I(PG1_o^3)), Inp_1, na.action=na.exclude)
20
21 V485_2_1 <- lm((HL1 ~ V485URT + I(V485URT^2) + MT1 + T01 + T02 +
22   V485URW + PG1_o), Inp_1, na.action=na.exclude)
23
24 V485_3_1 <- lm((HL1 ~ V485URT + I(V485URT^2) + MT1 + T01 +
25   V485URW + PG1_o), Inp_1, na.action=na.exclude)
26
27 V485_4_1 <- lm((HL1 ~ V485URT + I(V485URT^2) + T01 + T02 +
28   V485URW + PG1_o), Inp_1, na.action=na.exclude)
29
30 V485_41_1 <- lm((HL1 ~ V485URT + I(V485URT^2) + T01 + T02 +
31   V485URW + PG1_l), Inp_1, na.action=na.exclude) #<- gewaehlt
32
33 #####
34 # Unterschiedliche Modelle der Variante 485 fuer den Zeitraum "3" erstellen
35
36 V485_1_3 <- lm((HL1 ~ V485URT + I(V485URT^2) + I(V485URT^3) + MT1 + T01 + T02 +

```

```

38   V485URW + I(V485URW^2) + PG1_o + I(PG1_o^3)), Inp_3, na.action=na.exclude)
39
40 V485_4_3 <- lm((HL1 ~ V485URT + I(V485URT^2) + T01 + T02 +
41   V485URW + PG1_o), Inp_3, na.action=na.exclude) # mit original Pegel
42
43 V485_4l_3 <- lm((HL1 ~ V485URT + I(V485URT^2) + T01 + T02 +
44   V485URW + PG1_l), Inp_3, na.action=na.exclude) # gewaehlt!!
45
46 #####
47 ##### Diagramme #####
48
49 # op <- par(mfrow = c(2,1), mar = c(2,4,1,2)+0.1, oma = c(4,0,0,2.5)+0.1 )
50 op <- par(mar = c(2,4,1,2)+0.1, oma = c(3,1,0,2.5)+0.1)
51 # Teilt das Grafik Device in 2 Zeilen / 1 Spalten, setzt den Typ der
52 # fuer die folgenden Grafiken und speichert die alten Einstellungen in op
53 layout( matrix(c(1, 2, 1, 2), 2, 2), heights=c(3,1)) # 2 Zeilen, erste Zeile hoeher
54
55 preV485_4l_3 <- predict(V485_4l_3, Inp_3, interval = "prediction", level = 0.95)
56
57 df.preV485_4l_3 <- data.frame(preV485_4l_3)
58
59 preV485_4l_1 <- predict(V485_4l_1, Inp_3, interval = "prediction", level = 0.95)
60
61 df.preV485_4l_1 <- data.frame(preV485_4l_1)
62
63 plot(Inp_3$HL1, type = "l", col = "black", lwd = 1.5, xlim = c(0,1215), ylim = c(0,11),
64 axes = FALSE, ylab = "radiale Verformung [mm]")
65 lines(fitted(V485_4l_3), col = "red", lty = "solid")
66 lines(fitted(V485_4l_1), col = "blue", lty = "dashed", lwd = 1.0)
67
68 #lines(df.preV485_4l_3$fit, col = "red", lty = "solid", lwd = 1.0)
69 #lines(df.preV485_4l_1$fit, col = "blue", lty = "dashed", lwd = 1.0)
70
71 # Beschriftung x-Achse
72 xLabels <- c("10/07", "11/07", "12/07", "01/08", "02/08", "03/08", "04/08",
73 "05/08", "06/08", "07/08", "08/08", "09/08", "10/08", "11/08", "12/08", "01/09",
74 "02/09", "03/09", "04/09", "05/09", "06/09", "07/09", "08/09", "09/09", "10/09",
75 "11/09", "12/09", "01/10", "02/10", "03/10", "04/10", "05/10", "06/10", "07/10",
76 "08/10", "09/10", "10/10", "11/10", "12/10", "01/11", "02/11")
77
78 # Markierungen x-Achse
79 xLabelsStep <- c(0, 31, 61, 92, 123, 152, 183, 213, 244, 274, 305, 336,
80 366, 397, 427, 458, 489, 518, 549, 579, 610, 640, 671, 702, 732, 763,
81 793, 824, 855, 883, 914, 944, 975, 1005, 1036, 1067, 1097, 1128,
82 1158, 1189, 1220)
83
84 startstep <- 18 # erst am 19.10.2007 und nicht am 01.10.2007, Startpunkt fuer Plot
85
86 axis(side = 1, at = xLabelsStep, lab = xLabels, las = 2)
87 axis(side = 2, at = c(0:11), las = 1)
88 #axis(side = 3)
89 axis(side = 4, at = c(0:11), las = 1, labels = TRUE, tick = TRUE)
90 box(which = "outer")
91 ablineclip(v = xLabelsStep, y1 = 0, y2 = 11.0, col = "lightgray",
92 lty = "dotted") # Hilflinie - vertikal
93 abline(h = (seq(0,11,1)), col = "lightgray", lty = "dotted") # Hilflinie - horizontal

```

```

94 abline(h = c(0,length(Inp_3)), lty = "solid", col = "black") # 0 - Linie
95
96 legend(-5,11, legend = c("Messwert HL1", "V485_4l_3", "V485_4l_1"),
97 col = c("black", "red", "blue"), lty = c("solid","solid", "dashed"),
98 lwd = c(1.5,1,1), bty = "n", cex = 0.75)
99
100 # Graph Pegel
101 plot(Inp_3$PG1_1, type = "l", col = "blue", lwd = 2, ylim = c(2275,2320), axes = FALSE,
102 xlab = "Zeit [m]", ylab = "Pegel [m ue. A.]")
103 axis(side = 1, at = xLabelsStep, lab = xLabels, las = 2)
104 axis(side = 2, at = c(seq(2275, 2320, by = 5)), las = 1, cex.axis = 0.90)
105 #axis(side = 3)
106 axis(side = 4, at = c(seq(2275, 2320, by = 5)), las = 1, cex.axis = 0.90)
107 #box(which = "outer")
108 ablineclip(v = xLabelsStep, y1 = 2275, y2 = 2320, col = "lightgray",
109 lty = "dotted") # Hilflinie - vertikal
110 abline(h = (seq(2275,2320,5)), col = "lightgray", lty = "dotted") # Hilflinie -
    horizontal
111 abline(h = c(2275,1227), lty = "solid", col = "black") # 2275er - Linie
112
113 #dev.off() # Die pdf-Datei wird geschlossen.
114
115 #par(op) # Zuruecksetzen auf die alten Grafikeinstellungen.
116
117 layout(matrix(c(1, 2, 1, 2), 2, 2), heights=c(1,1)) # 2 Zeilen, Hoehe beider Zeilen
    gleich
118
119 # Graph der Residuen
120 plot(residuals(V485_4l_3), type = "l", col = "red", lty = "solid",
121 xlab = "Zeit [m]", ylim = c(-0.80, 0.80), axes = FALSE, ylab = "Residuen [mm]")
122 #lines((Inp_3$HL1 - df.preV485_4l_1$fit), col = "blue", lty = "dashed")
123 lines(residuals(V485_4l_1), col = "blue", lty = "dashed")
124 axis(side = 1, at = xLabelsStep, lab = xLabels, las = 2)
125 axis(side = 2, at = c(seq(-0.80, 0.80, by = 0.2)), las = 1, cex.axis = 0.9)
126 #axis(side = 3)
127 axis(side = 4, at = c(seq(-0.80, 0.80, by = 0.2)), las = 1, cex.axis = 0.9)
128 #box()
129 ablineclip(v = xLabelsStep, y1 = -0.80, y2 = 0.80, col = "lightgray",
130 lty = "dotted") # Hilflinie - vertikal
131 abline(h = (seq(-0.80, 0.80, 0.2)), col = "lightgray", lty = "dotted") # Hilflinie -
    horizontal
132 #legend(0,0.75, legend = "Residuen", col = "red", lty = "solid", lwd = 1, bty = "n")
133 abline(h = c(0,length(Inp_3)), lty = "solid", col = "black") # 0 - Linie
134 abline(h = c(-0.80,length(Inp_3)), lty = "solid", col = "black") # -0.75er - Linie
135 legend(-5,0.8, legend = c("V485_4l_3", "V485_4l_1"),
136 col = c("red", "blue"), lty = c("solid","dashed"), lwd = c(1,1),
137 bty = "n", cex = 0.75)
138
139 # Fehlerplot
140 plot( ((Inp_3$HL1 - fitted(V485_4l_3)) / mean(Inp_3$HL1, na.rm = TRUE)) * 100, type =
    "l",
141 col = "red", lty = "solid", ylim = c(-15,15), axes = FALSE, ylab = "Abweichung [%]")
142 lines( (((Inp_1$HL1 - fitted(V485_4l_1)) / mean(Inp_1$HL1, na.rm = TRUE)) * 100),
143 col = "blue", lty = "dashed" )
144 axis(side = 1, at = xLabelsStep, lab = xLabels, las = 2)
145 axis(side = 2, at = c(seq(-15, 15, by = 2.5)), las = 1, cex.axis = 0.9)

```

```
146 #axis(side = 3)
147 axis(side = 4, at = c(seq(-15, 15, by = 2.5)), las = 1, cex.axis = 0.9)
148 ablineclip(v = xLabelsStep, yl = -15, y2 = 15, col = "lightgray",
149   lty = "dotted") # Hilflinie - vertikal
150 abline(h = (seq(-15,15,2.5)), col = "lightgray", lty = "dotted") # Hilflinie -
   horizontal
151 abline(h = c(0,1227), lty = "solid", col = "black") # 0 - Linie
152 abline(h = c(-15,1227), lty = "solid", col = "black") # -15er - Linie
153
154 #####
155 ##### Ergebnisse #####
156
157 print('*****Modelle der Variante 4, Zeitraum 1*****')
158 print(summary(V485_41_1))
159 print('*****Modelle der Variante 4, Zeitraum 3*****')
160 print(summary(V485_41_3))
161 print(summary(V585_41_3))
162 print('*****VIF Periode 1*****')
163 print(vif(V485_41_1))
164 print('*****VIF Periode 3*****')
165 print(vif(V485_41_3))
```