

Talsperre mit Wasserkraftnutzung: Hybride Modellierung der Dhrontalsperre

Jürgen Stamm, Ulf Helbig, Tobias Gierra, Christoph Klüber

Die RWE Power AG betreibt für die RWE Innogy das Dhronkraftwerk an der Mosel. Die Kraftanlage verfügt über eine installierte Leistung von ca. 8 MW, eine Fallhöhe von etwa 100 m sowie einen Ausbaudurchfluss von rund 11 m³/s und liegt ca. 20 km östlich der Stadt Trier. Der Bauzustand der Hochwasserentlastungsanlage (v. a. Kaskaden, Tosbeckenanlage) zeigt sich derzeit so, dass vom Betreiber mittelfristig eine Sanierung vorgenommen werden muss. Zur Ermittlung der auftretenden hydrodynamischen Kräfte an der Hochwasserentlastungsanlage (HWE) des Sperrbauwerks infolge des ausgeprägten turbulenten dreidimensionalen Fließzustandes wird am Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik (IWD) eine Hybridmodellierung im Sinne einer dualen Modellierung vorgenommen.

By order of the RWE Innogy the RWE Power AG operates the dam „Dhrontalsperre“ near by the Mosel River, approx. 20 km to the east of Trier. The plant possesses an engine power of 8 MW by using a penstock of 100 m and a design flow of 11 m³/s. Due to the necessary concrete's reconstruction the operator has to rehabilitate the complete spillway (cascades, stilling basin) of the dam soon. For a subsequent design the Institute of Hydraulic Engineering and Technical Hydromechanics (IWD) shall determine the hydrodynamic loads on the dam's spillway by using a scale model and a 3d-hydrnumerical model (dual modelling).

1 Einleitung

Die RWE Power AG betreibt für die RWE Innogy das Dhronkraftwerk an der Mosel, das in den Jahren 1911 bis 1913 von der Stadt Trier zur Erzeugung elektrischen Stroms errichtet wurde. Die Kraftanlage mit einer installierten Leistung von ca. 8 MW bei einer Fallhöhe von etwa 100 m und einem Ausbaudurchfluss von rund 11 m³/s liegt circa 20 km östlich der Stadt Trier, in der Nähe des Ortes Trittenheim (Moseltal) (vgl. Abbildung 1).

Das als gekrümmte Gewichtsstaumauer realisierte Bauwerk liegt in der Nähe der Ortschaften Heidenburg und Neumagen. Das Absperrbauwerk aus Bruchsteinmauerwerk weist eine Höhe von ca. 24 m über Gründungssohle bzw. ca. 17 m über Talsohle auf und besitzt eine mittlere Kronenlänge von etwa 95 m. Die Überfallkrone ist in 10 Überfallfelder unterteilt. Das Überfallprofil ist breitkronig ausgeführt. Die Hochwasserentlastung erfolgt durch Überströmen der Mauerkrone, wobei aufgrund unterschiedlicher Höhenlagen der Überfallkronen die Mauerfelder nacheinander anspringen. Auf der Luftseite der Staumauer sind zwei Kaskadentreppen angeordnet, wobei auf der westlichen Seite 7 Stufen und auf der

östlichen Seite 6 Stufen errichtet wurden. Der Höhenunterschied zwischen den einzelnen Kaskadenebenen beträgt auf der östlichen Treppe 2,05 m bis 2,15 m und auf der westlichen Treppe 1,84 m bis 1,88 m. Die Absturzhöhe zum Tosbecken beträgt ca. 3,0 m (vgl. Abbildung 1).



Abbildung 1: links oben: Geographische Einordnung der Anlage, rechts und unten: Ansicht Bauwerk mit Kaskadentreppen, Tosbecken und Überfallprofil

Im Rahmen der Vorbereitung der mittelfristigen Sanierung der Dhrontalsperre sollen die dynamischen Strömungskräfte auf die Kaskadentreppen und im Tosbecken als Eingangswerte der Standsicherheitsberechnungen sowie die generelle Leistungsfähigkeit der Hochwasserentlastungsanlage modelltechnisch ermittelt bzw. nachgewiesen werden. Zu deren Bestimmung wird derzeit am IWD ein physikalischer Modellversuch durchgeführt, der aufgrund größtenteils fehlender Naturdaten um 3D-hydro-numerische Simulationsrechnungen im Sinne einer dualen Modellierung ergänzt ist.

2 Physikalischer Modellversuch

Zur Gewährleistung einer hinreichend genauen Näherung der hydraulischen Modellversuche an die realistischen Strömungsverhältnisse müssen die Beziehungen zwischen den die Strömung beeinflussenden Kräften gleich den Verhältnissen in der Natur sein. Dies wird in der Regel durch Einhaltung der geometrischen, kinematischen und auch dynamischen Ähnlichkeit gewährleistet.

Bei offenen Gerinnen überwiegen die Trägheits- und Schwerkkräfte. Das Verhältnis zwischen diesen Kraftgrößen beschreibt am besten die FROUDE-Zahl (Fr). Für die nachfolgenden Untersuchungen wurde daher das FROUDE'sche Ähnlichkeitsgesetz angewendet. Die FROUDE-Zahlen müssen dabei im Modell genau so groß wie in der Natur sein ($Fr_N = Fr_M$). Reibungseinflüsse (Rauheiten) werden vernachlässigt.

Der Versuchsaufbau wurde im Hubert-Engels-Labor am IWD vorgenommen (vgl. Abbildung 2). Die Umsetzung erfolgte im Maßstab M 1 : 20 mit den in der Tabelle 1 angegebenen Modelldaten.

Tabelle 1: Natur und Modelldaten gemäß der Anwendung des FROUDE'schen Modellgesetzes

Größe	Einheit	Naturkennwerte	Maßstabsfaktoren (FROUDE) $1 : n_x$	Modellkennwerte $1 : 20$
Länge	[m]	ca. 96,00	$n_L = 20$	ca. 4,80
Breite	[m]	ca. 70,00		ca. 3,50
Höhendifferenz	[m]	ca. 16,50		ca. 0,82
mittlere Überfallbreite der 10 Felder	[m]	ca. 7,27		ca. 0,36
maximale Überfallhöhe	[m]	ca. 1,00		ca. 0,05
Durchfluss BHQ 1	[m ³ /s]	61,72	$n_Q = (n_L)^{2,5} = 1.789$	0,034 (34,5 l/s)
Durchfluss BHQ 2	[m ³ /s]	72,31		0,040 (40,4 l/s)
„Mannlast“ nach DIN EN 1991-1-1 [9] ($Q_{M,k}$)	[N]	1000 (1,00 KN)	$n_F = (n_L)^3 = 8.000$	0,125

Der notwendige Wasserkreislauf wird durch eine frequenzgesteuerte Tauchpumpe im Rücklaufkanal des Labors realisiert. In der Steigleitung zwischen Pumpe und Modellleitung befindet sich ein magnetisch-induktiver Durchflussmesser (MID) zur Durchflussmessung. Die Erfassung der Wasserstände erfolgt mittels Ultraschallsensoren.

Im Modell ist eine steuerbare Zwangsbelüftung (Druckluftsystem, $p_{\max} = 1,0 \text{ N/mm}^2$, $Q_{L,\max} = 7,5 \text{ l/s}$) eingebaut, um eine variable Belüftungsrate im Bereich der Schusrinne unterhalb der Überfallfelder zu erzeugen. Hierzu sind auf der Schusrinne Belüftungsleisten ca. 13 cm unterhalb der Überfallkronen eingebaut worden (Abbildung 3). Die Erfassung des Luftdurchsatzes (Q_L) erfolgt mit Hilfe eines magnetisch-induktiven Luftmassenmessers.

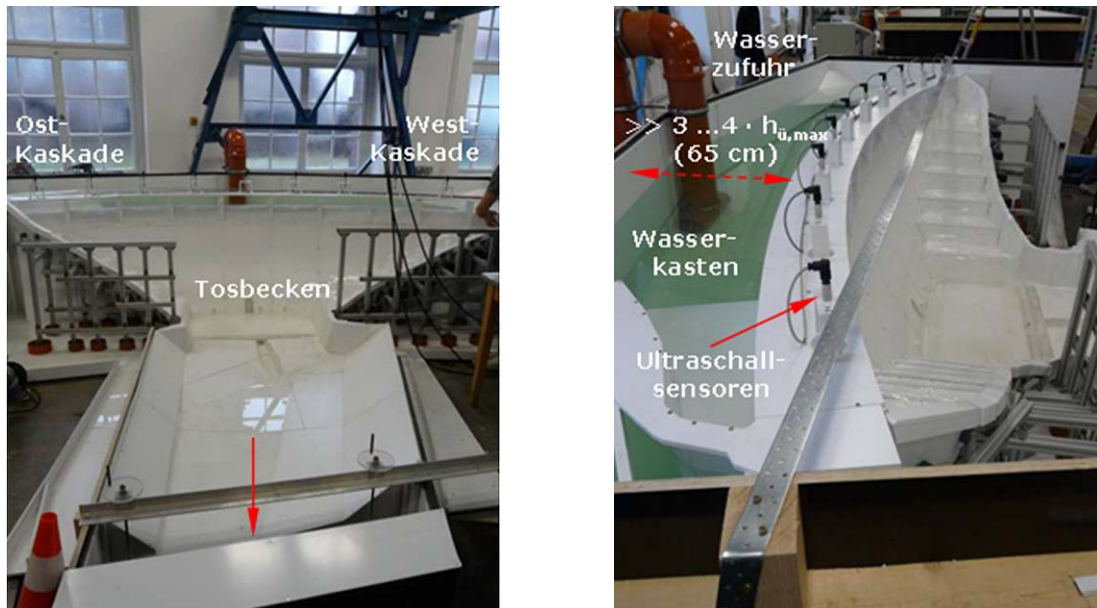


Abbildung 2: Aufbau physikalisches Modell M 1 : 20, links: Frontalansicht auf Tosbecken und Kaskadenstufen (von unterstrom), rechts: Blick von Ost über Stauermauer, Kaskadenstufen und Wasserkasten

Einen wesentlichen Bestandteil des Messprogramms stellt die Erfassung der abflussabhängigen, dynamischen charakteristischen Kraftgrößen dar, die auf die Sohlen und die Wangenmauern der westlichen bzw. östlichen Kaskadentreppen sowie auf die Sohle des Tosbeckens einwirken. Die Kraftaufnahme im Bereich der Kaskadentreppen wird mit Plattform-Wägezellen durchgeführt (vgl. Abbildung 4). Jede Teilfläche ruht auf jeweils einem Kraftaufnehmer, die Flächenränder sind frei schwingend gelagert und mit einer dünnen Folie abgedichtet.

Pro Partialfläche kann exakt eine resultierende Kraftgröße $F_{\text{res},i}$ [KN] bestimmt werden, die durch entsprechende Umrechnung mit Hilfe des Flächeninhaltes A_i [m^2] in eine gleichmäßig verteilte Flächenlast p_i [KN/m^2] transformiert wird.

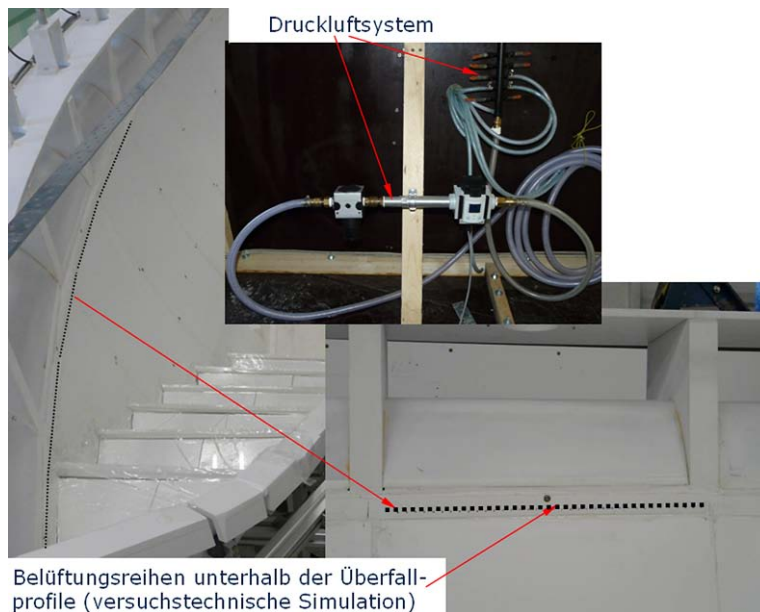


Abbildung 3: Druckluftverteilungssystem mit Anordnung der Belüftungsreihen im Bereich der Schusrinne



Abbildung 4: links: Aufteilung Sohle und Wange in Partialflächen, rechts: Anordnung auf westlicher Kaskadentreppe für die Aufnahme der Sohlplattenelemente

3 3D-hydrnumerische Modellierung

Für die dreidimensionale hydrodynamisch-numerische Simulation der Dhrontalsperre wird das CFD-Programmsystem FLOW-3D[®] in der Version 9.4.2 verwendet. Die Simulationsrechnungen werden im vorliegenden Fall im Maßstab M 1 : 1 durchgeführt.

Mit Hilfe des CAD-Programms AutoCAD2011 erfolgte im Vorfeld die Erstellung der 3D-Volumenkörper, die über das Austauschformat Stereolithographie (STL) in das Programmsystem FLOW-3D[®] übertragen worden waren. Das umgebende Gelände, insbesondere das des Staubeckens im direkten Zulaufbereich der Hochwasserentlastungsanlage, wurde aufgrund der zu erwartenden Beeinflussung der Abflussverteilung der einzelnen Überfallfelder mit berücksichtigt. (vgl. Abbildung 5).

Als zentrales Element des Bauwerks stand die gekrümmte Staumauer inklusive der Überfallprofile im Fokus der Geometrieerstellung. In den vorliegenden Unterlagen wurde das Bauwerk mit einem Radius von $R \approx 92,50$ m angegeben. Im Laufe der Bearbeitung wurde jedoch festgestellt, dass die Krümmung der Mauer mit Verweis auf die zur Verfügung gestellten Vermessungsdaten keinem konstanten Radius folgt. Dies machte es erforderlich, die Staumauer über einen Korbbogen in vier Radien aufzuteilen (vgl. Abbildung 6). Einbauten wie der Eingang zum Stollen sowie die Abdeckungen der Messtechnik wurden ebenfalls berücksichtigt (vgl. Abbildung 6).

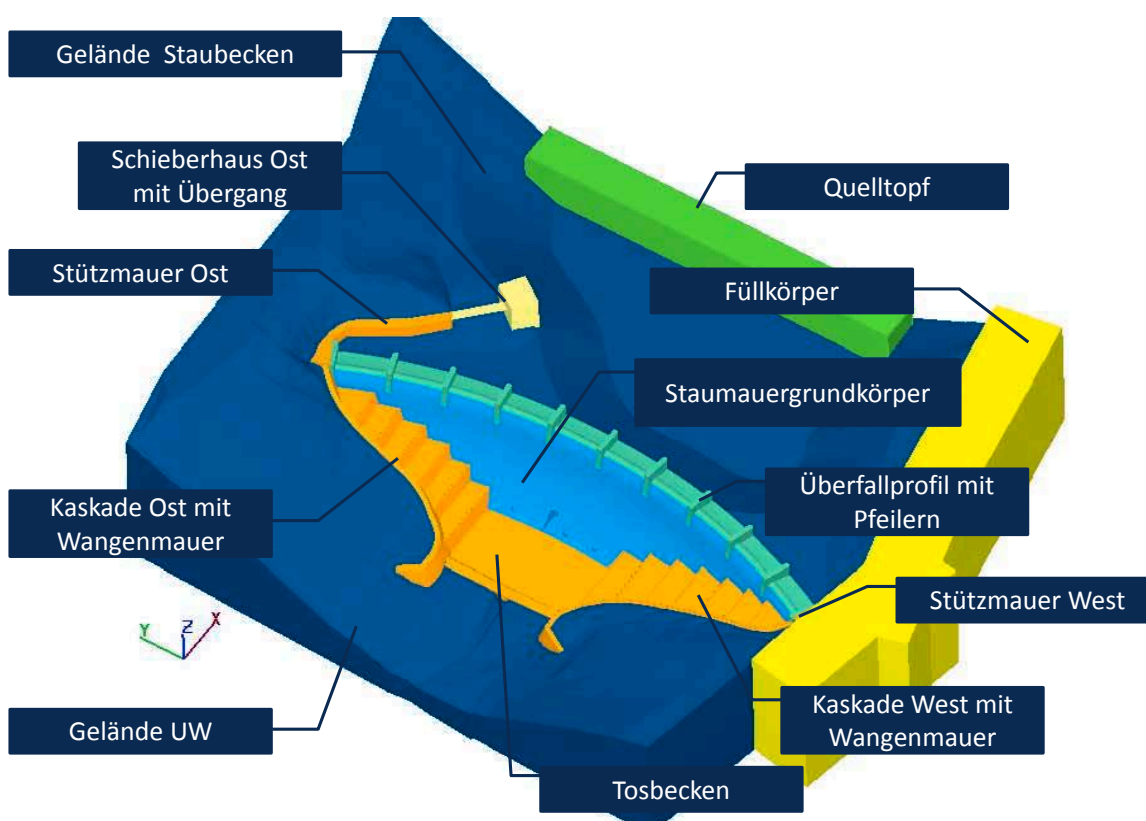


Abbildung 5: Geometrie und Bezeichnung des numerischen Gesamtmodells

Aufgrund der sehr unregelmäßigen Struktur der aus Bruchstein bestehenden Staumauer wurde eine absolute hydraulische Rauheit von $k = 100$ mm für rauhen Naturstein gewählt. Dem Überfallprofil ist eine absolute hydraulische Rauheit

von $k = 2 \text{ mm}$ für glatten Beton zugewiesen worden. Die Kaskadensohlen und -wangen sowie das Tosbecken erhielten aufgrund der bereits deutlich zu erkennenden Verwitterungen eine absolute hydraulische Rauheit von $k = 6 \text{ mm}$.

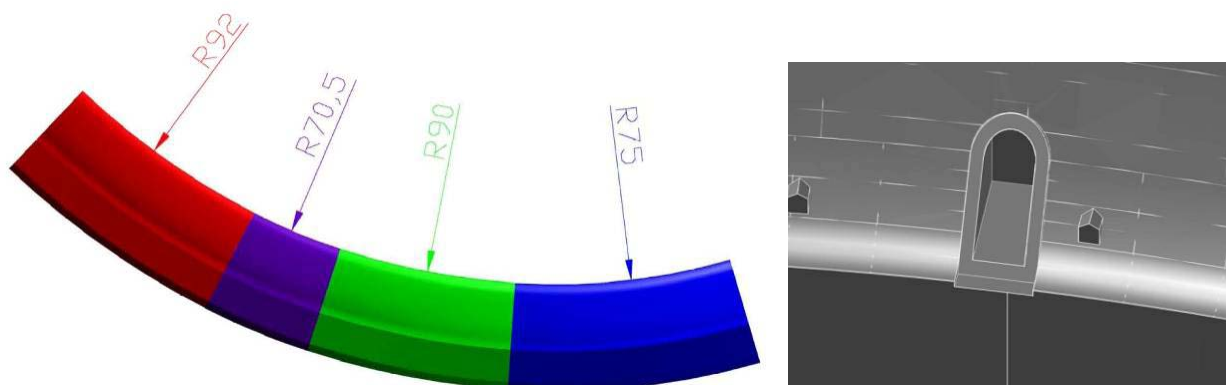


Abbildung 6: links: Konstruktion des Staumauergrundkörpers in AutoCAD®, rechts: Detailgetreue Modellierung der Einbauten im Staumauerkörper

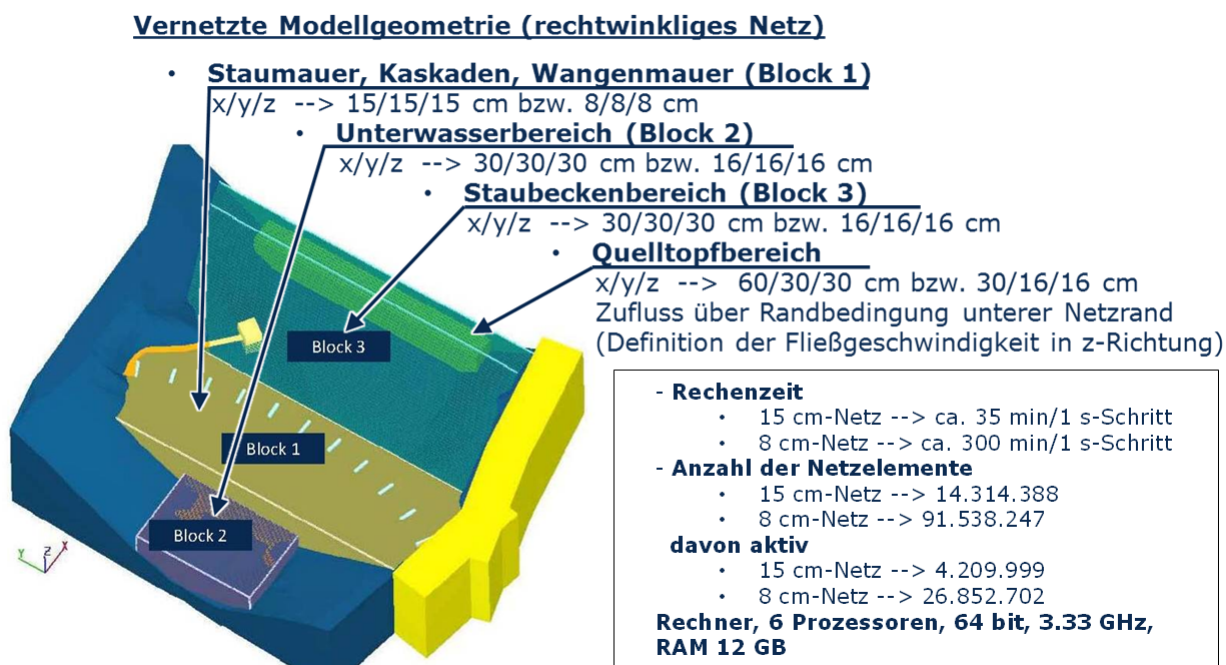


Abbildung 7: Vernetzung und rechnerische Leistungskomponenten des 3D-hydrnumerischen Modells

Die Erstellung des Geländes erfolgte mit Unterstützung durch das Programmsystem SMS®. Durch die Möglichkeit der drei- und viereckigen Vernetzung auf Grundlage von geographischen Punktdaten konnte die Topographie des Untersu-

chungsgebietes modelliert werden. Die Datengrundlage bildeten die zur Verfügung gestellten CAD-Daten mit Höhenlinien sowie die vorhandenen Profile im Unterwasserbereich der Talsperre. Die Stützpunkte der als Polylinien vorliegenden Daten konnten in SMS[®] in Streupunkte, sogenannte Scatterpoints, konvertiert werden. Mit Hilfe dieser Punkte ist das Gelände entsprechend vernetzt bzw. trianguliert worden. Die Umsetzung des Berechnungsnetzes erfolgte über drei Netzblöcke als sogenanntes Multi-Block-Netz. Dadurch konnten verschiedene Regionen der Geometrie mit unterschiedlicher Zellgröße aufgelöst werden (vgl. Abbildung 7).

Im Modell wird rechnerisch keine mechanische Interaktion zwischen den Massivbauwerken (Staumauer, Kaskaden, Topographie, ...) und dem Fluid vorgenommen, sie gelten bei den fluiddynamischen Betrachtungen als unendlich steif (vgl. Abbildung 8).

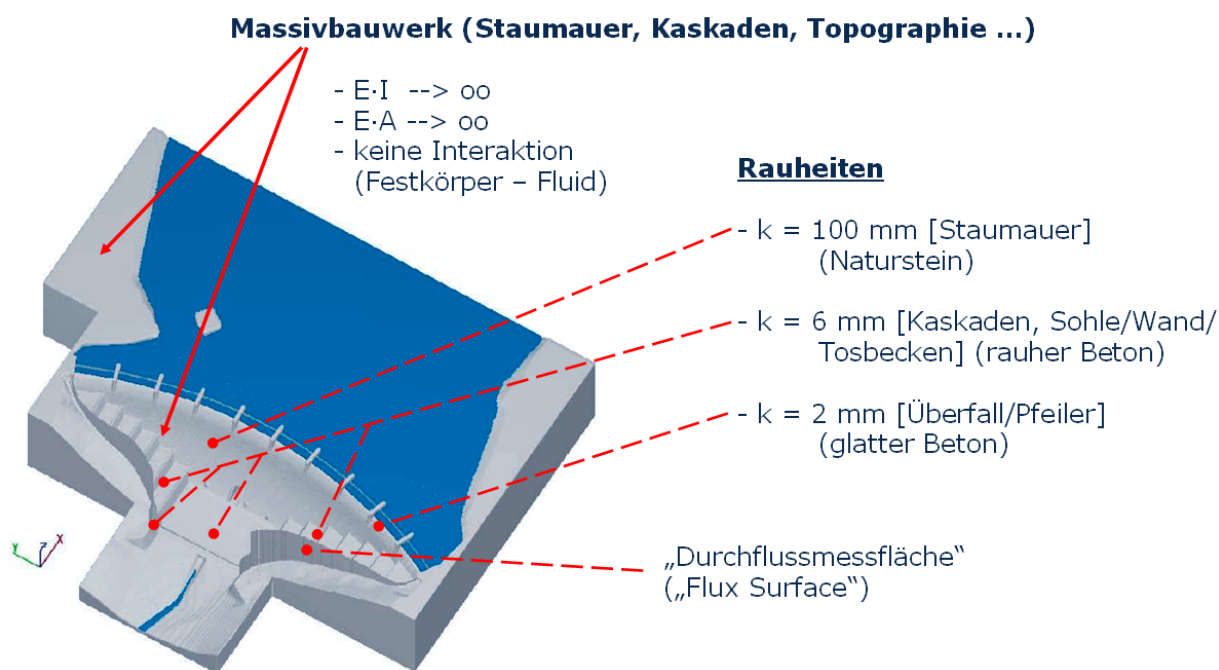


Abbildung 8: Zuordnung Massivbauwerke, Definition von Rauheiten

Die Durchflussmessung erfolgt in FLOW-3D[®] standardmäßig über die Netzränder bzw. kann über diese durch den Nutzer erfolgen. Des Weiteren ist es möglich, Durchflussmessquerschnitte in das Modell zu integrieren. Hier ist es im vorliegenden Fall von primärem Interesse, welcher Abfluss in den einzelnen Überfallfeldern (F 1 – F 10) vorherrscht bzw. welcher Durchfluss bei einem Übertritt über die seitlichen Kaskadenwangen zu erwarten ist (vgl. Abbildung 8).

Die numerische Bestimmung von Kräften bzw. Flächenlasten erfolgt in der Auswertung durch die Aufsummierung der berechneten Drücke an den Netzelementen innerhalb einer betrachteten Partialfläche A_i .

4 Aktueller Ergebnisstand

Die Untersuchungen zur Dhrontalsperre sind gegenwärtig noch nicht abgeschlossen und befinden sich in der weiteren Bearbeitung. Es kann jedoch bereits jetzt festgestellt werden, dass sehr gute Übereinstimmungen bei der Ermittlung der hydrodynamischen Kraftgrößen zwischen beiden Modellen vorliegen (vgl. Abbildung 9).

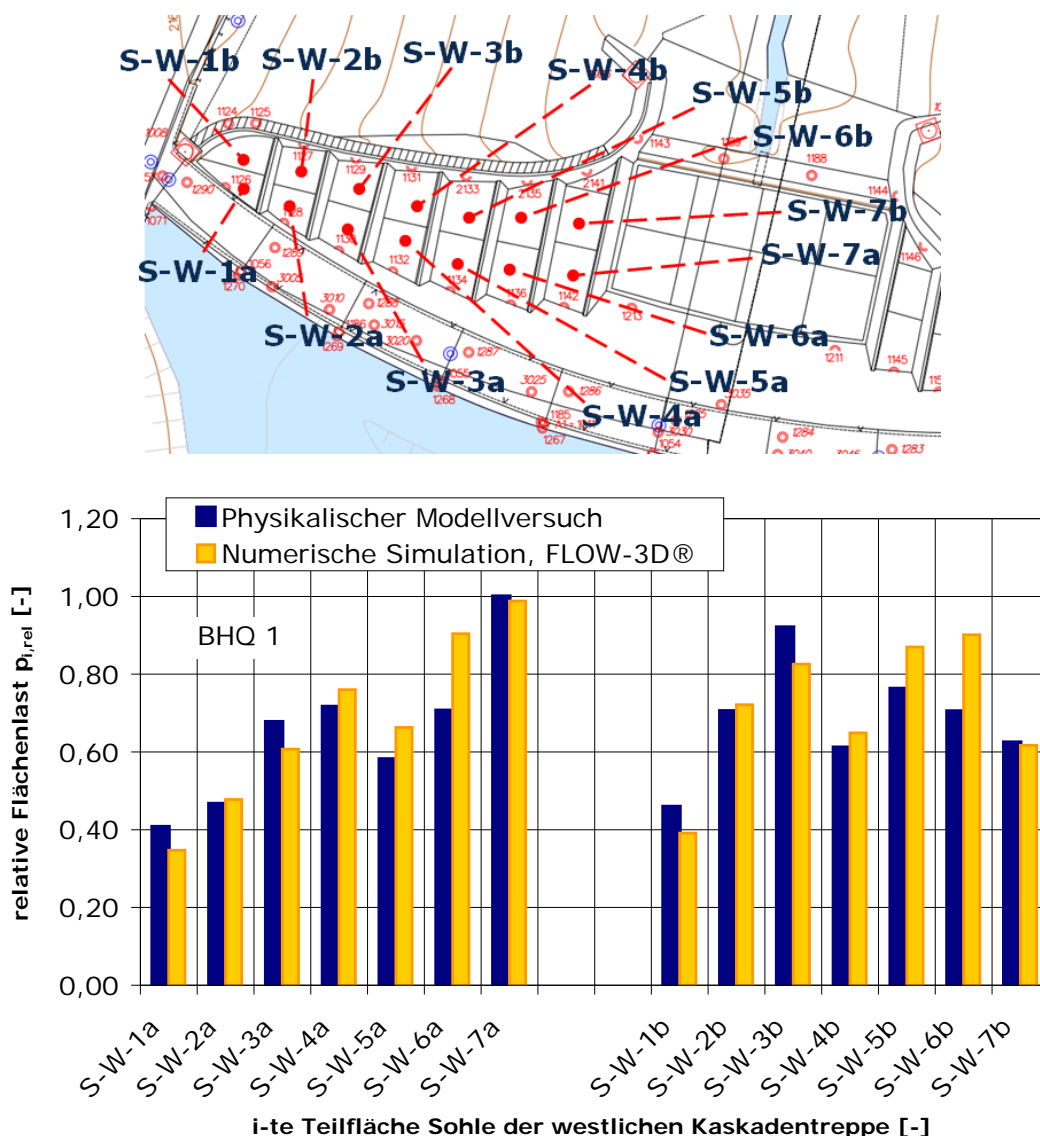


Abbildung 9: oben: Bezeichnung der Sohlflächen an der westlichen Kaskadentreppe, unten: Exemplarischer Vergleich der relativen Flächenlasten physikalisches/numerisches Modell, $Q = BHQ 1 = 61,72 \text{ m}^3/\text{s}$

Auch wird deutlich, dass aufgrund der vorhandenen Makroturbulenzeffekte die größten Sohlflächenlasten nicht zwangsweise mit der größten Fallhöhe korrelieren müssen. Weiterhin zeigt sich, dass die abflussabhängige maximale

Flächenbelastung für eine i -te Partialfläche A_i nicht bei einem definierten Maximalabfluss auftreten muss, sondern bereits bei kleineren Abflüssen auftreten kann. Daher ist hier eine dezidierte Untersuchung innerhalb erwarteter Abflussverhältnisse zwingend notwendig, da für eine Bemessung der massiven Betonbauteile die Angabe der maximalen charakteristischen Kraft- bzw. Flächenlastgrößen von maßgeblicher Bedeutung sind.

Des Weiteren wird derzeit noch geklärt, welchen Einfluss der Lufteintrag (Belüftung) vor allem auf die Ausbildung der dynamischen Kraftverhältnisse sowie auf die abfließenden Wasservolumina im Bereich der Kaskaden ausübt.

5 Danksagung

Der hier aufgeführte Fachbeitrag ist in Zusammenarbeit mit der RWE Power AG, Huysenallee 2, 45128 Essen (Ansprechpartner: Herr J. Schlüter) entstanden.

Autoren:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm (Juergen.Stamm@tu-dresden.de)
Dr.-Ing. Ulf Helbig (Ulf.Helbig@tu-dresden.de)
Dipl.-Ing. Tobias Gierra (Tobias.Gierra@tu-dresden.de)
Christoph Klüber, B. Eng. (Christoph.Klueber@googlemail.com)
Technische Universität Dresden
Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik
D-01062 Dresden
Tel.: +49 – 351 – 463 34397
Fax.: +49 – 351 – 463 37120