

DIPLOMARBEIT

Master Thesis

Hydraulischer Modellversuch zur Optimierung einer festen Wehranlage

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Reinhard PRENNER

am

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie

E222

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Martin Hasenhündl

0929360

Laimgrubengasse 25/14,
1060 Wien

Wien, im April 2016

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen Personen bedanken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ich bedanke mich bei Herrn Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Reinhard Prenner für die Möglichkeit, diese Diplomarbeit durchführen zu dürfen sowie für Betreuung und Unterstützung während der Arbeiten.

Ein Dank gebührt allen Mitarbeitern des Institutes für Wasserbau und Ingenieurhydrologie/Forschungsbereich Wasserbau, unter der Leitung von Univ.Prof. Dipl.Ing. Dr. Peter Tschernutter, die mich stets hilfreich unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt den Labormitarbeitern für ihren Einsatz bei der Modellerrichtung und während der Durchführung der Versuche.

Außerdem möchte ich meiner Familie danken, meinen Eltern, die mir das Studium ermöglichten und mir immer zur Seite standen sowie meiner Schwester, die mich immer unterstützte und mit Ratschlägen zur Stelle war.

Zuletzt danke ich meinen Freunden und Kollegen, die mir durchgehend eine wunderbare Studienzeit bescherten. Besonders möchte ich meine langjährige Studienkollegin und gute Freundin Hanna Herbstrith hervorheben. Die gute Zusammenarbeit hat uns vieles meistern lassen und immer Spaß bereitet.

Diese Diplomarbeit ist meinem im Jahr 2015 geborenen Neffen

Jonas Hasenhündl

gewidmet.

Kurzfassung

Durch die zunehmende Förderung von nachhaltiger und umweltfreundlicher Energiegewinnung wird vermehrt Augenmerk auf die aus Wasserkraft gelegt. Die sorgfältigste Planung solcher Anlagen kann oft einen Modellversuch zur Überprüfung der Berechnungen nicht ersetzen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die feste Wehranlage des Kraftwerks Rosenberg einer hydraulischen Optimierung unterzogen. Bei dieser Niederdruckanlage ist eine Sanierung geplant und im Zuge dieser soll eine Stauzielerhöhung durch ein höheres Wehrbauwerk erreicht werden. In dieser Diplomarbeit werden die Versuchsergebnisse von verschiedenen Wehr- und Tosbeckenvarianten miteinander verglichen, wobei das Hauptaugenmerk auf der Energieumwandlung im Hochwasserfall liegt.

Am Beginn werden die hydraulischen Grundlagen, wie Abflussformeln, Wehrgeometrien, Energiedissipation im Tosbecken und Kolkeigenschaften beleuchtet. Da das Thema Kolke ein sehr komplexes ist und bei den durchgeführten Untersuchungen nur als indirekte Bewertungsmöglichkeit zur Anwendung kommt, wird in dieser Arbeit nur kurz darauf eingegangen. Anschließend werden insgesamt elf unterschiedliche Varianten durch Kombination von verschiedenen Wehrformen und Tosbecken entworfen und mit gängigen Bemessungsformeln überprüft.

Diese Varianten wurden in der Zeit von November 2015 bis Jänner 2016 im Labor des Institutes für Wasserbau und Ingenieurhydrologie der TU Wien in einem hydraulischen Modellversuch untersucht. Als Wehrformen kommen Sturzwehre, Schusswehre und Stufenwehre in Frage, die mit Betontos Becken, Muldentosbecken aus Wasserbausteinen und Störkörpertosbecken zu den elf Varianten kombiniert werden. Dafür wird das Wehr des Kraftwerks Rosenberg in einem 1:25 Schnittmodell nachgebildet. Das Untersuchungsprogramm umfasst bei jeder Variante vier verschiedene Abflüsse, vom HQ_{10} bis zum HQ_{300} . Bei jedem Versuch wird die Kolkentwicklung beobachtet und quantifiziert, um auf die Effektivität der Energiedissipation schließen zu können. Nach einer Beschreibung der einzelnen Versuchsabläufe im Schnittmodell werden die Ergebnisse aller getesteten Varianten evaluiert. In einem weiteren Schritt kommt es zu einer Gegenüberstellung der Ergebnisse der untersuchten Varianten, wobei keine Wiedergabe von naturnahen Kolkentwicklungen das Ziel ist, sondern eine qualitative Vergleichsmöglichkeit. Daraus lässt sich ein optimiertes Wehrbauwerk für die gegebene Situation entwickeln.

Abstract

In recent years hydropower production has been increasingly focused on the promotion of sustainable and environmentally aware energy. In order to achieve this, in addition to precise calculations and forward planning, full model tests are required to ensure the accurate calibration of hydropower plants.

This thesis will investigate the hydraulic optimization of an ungated weir at the Rosenberg hydropower station. Fixed weirs are common in most low head power plants. This project proposes to reconstruct the Rosenberg hydropower station and to increase the design water level through the use of a higher weir structure. In this thesis the results of a number of experiments undertaken using different design variants will be compared, focusing particularly on the energy dissipation during flood events.

The first section of this paper highlights the fundamental basics of hydraulic theory, outlining discharge characteristics, crest geometry, energy dissipation in stilling basins and scour characteristics. The topic of scour characteristics is very complex and the effect on the scour as a result of the experiments can only serve as an indirect evaluation method. For that reason, scour is not explored in depth in this thesis. The paper is concluded using eleven different design variants, checked using formulas from wider research on this topic, that is accompanied by various crest geometries and stilling basins.

The design variants discussed were investigated in a hydraulic model during the period from November 2015 to January 2016 in the laboratory of the Institute for Hydraulic and Water Resources Engineering of the Technical University of Vienna. To conduct these experiments a cross section model of the Rosenberg weir structure is built at a scale of 1:25. The research program contains four different discharges for each design variant, from HQ_{10} to HQ_{300} . During each experiment the scour is monitored and quantified to infer the effectivity of energy dissipation. After a description of the test procedure for every design variant, the results are evaluated. The results of the investigated variants will be compared as controlled experiments that tests each variant. It is important to note that the results will differ to the scour found in natural environments. The outcome of this study results in an optimized weir for the Rosenberg hydropower station.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Hydraulische Grundlagen	3
2.1	Arten des Überfalls und Wehrformen	3
2.1.1	Arten des Überfalls	5
2.1.2	Wehrformen	7
2.1.2.1	Rundkroniges Wehr - WES Profil	8
2.1.2.2	Sturzwehre	8
2.1.2.3	Stufenwehre - Kaskadenwehr	10
2.2	Energieumwandlung im Tosbecken	12
2.2.1	Wechselsprung	13
2.2.2	Einfaches Tosbecken - Längenbemessung	16
2.2.3	Tosbecken mit Einbauten	17
2.3	Kolkentstehung und damit verbundener Kolkschutz	19
2.3.1	Kolkformen	19
2.3.2	Kolkprozess	21
2.3.3	Kolk flussabwärts einer Stauanlage	22
2.3.4	Berechnung von Kolkentwicklungen	22
2.3.5	Kolkschutz	22
3	Grundlagen und Beschreibung der Varianten	24
3.1	Ziel der Untersuchung	24
3.2	Allgemeine Projektbeschreibung, Wehranlage Kraftwerk Rosenberg	24
3.3	Hydrologische Grundlagen	25
3.4	Variante 01A Sturzwehr mit Betontos Becken (17,10m; 1,00m Gegenschwelle)	27
3.5	Variante 01B Sturzwehr mit kurzem Betontos Becken (10,25m; 0,50m Gegenschwelle)	30
3.6	Variante 01C Sturzwehr mit kurzem Betontos Becken (10,25m; 0,50m Gegenschwelle) und Mulde auf HQ ₁₀₀ ausgelegt	30
3.7	Variante 01D Sturzwehr mit kurzem Betontos Becken (10,25m; 0,50m Gegenschwelle) und Mulde auf HQ ₃₀ ausgelegt	31
3.8	Variante 02A Schusswehr mit Betontos Becken (16,50m; 1,00m Eintiefung / Gegenschwelle)	31
3.9	Variante 02B Schusswehr mit kurzem Betontos Becken (12,50m; 1,00m Eintiefung / Gegenschwelle)	34

3.10	Variante 02C Schusswehr mit Betonauslauf (2,50m, 1,00m Eintiefung) und Mulde auf HQ ₃₀ ausgelegt	34
3.11	Variante 03A Stufenwehr mit 1,00m Stufen und tiefem Tosbecken (10,25m Gesamtlänge Tosbecken, 2,05m Eintiefung/Gegenschwelle)	35
3.12	Variante 03B Stufenwehr mit 2,00m Stufen und tiefem Tosbecken (10,25m Gesamtlänge Tosbecken, 2,05m Eintiefung/Gegenschwelle)	37
3.13	Variante 03C Stufenwehr mit 2,00m Stufen und „Herstellungsmulde“ aus Wasserbausteinen (25° geneigt, ungefähr Baugrube ausgelegt)	37
3.14	Variante 04A Schusswehr mit Störkörperptosbecken (7,50m Gesamtlänge Tosbecken, Strahlaufreißer 0,50m hoch, Störkörper 1,00m hoch)	38
4	Modellversuche	41
4.1	Modellaufbau	41
4.2	Modellgesetz	43
4.3	Versuchsdurchführung	45
5	Versuchsergebnisse (Varianten)	46
5.0.1	Variante 01A Sturzwehr mit Betontosbecken	46
5.0.2	Variante 01B Sturzwehr mit kurzem Betontosbecken	50
5.0.3	Variante 01C Sturzwehr mit kurzem Betontosbecken und HQ ₁₀₀ -Mulde	54
5.0.4	Variante 01D Sturzwehr mit kurzem Betontosbecken und HQ ₃₀ -Mulde	58
5.0.5	Variante 02A Schusswehr mit Betontosbecken	62
5.0.6	Variante 02B Schusswehr mit kurzem Betontosbecken	66
5.0.7	Variante 02C Schusswehr mit Betonauslauf HQ ₃₀ -Mulde	70
5.0.8	Variante 03A Stufenwehr mit 1,00m Stufen und tiefem Tosbecken .	74
5.0.9	Variante 03B Stufenwehr mit 2,00m Stufen und tiefem Tosbecken .	78
5.0.10	Variante 03C Stufenwehr mit 2,00m Stufen und „Herstellungsmulde“ aus Wasserbausteinen	82
5.0.11	Variante 04A Schusswehr mit Störkörperptosbecken	86
6	Vergleich der Ergebnisse	90
6.1	Varianten 01 - Sturzwehr	90
6.2	Varianten 02 - Schusswehr	91
6.3	Varianten 03 - Stufenwehr	91
6.4	Variante 04 - Störkörper	92
6.5	Vergleich aller Varianten	92
7	Zusammenfassende Schlussfolgerungen	100
8	Literaturverzeichnis	104

A Anhang	105
A.1 Entwurfsplan Wehrformen [15]	105
A.2 Pläne aller untersuchten Varianten	106
A.3 Modellaufbau	115

Abbildungsverzeichnis

2.1	Regel-Längsschnitt durch ein festes Wehr [11]	3
2.2	Kronenformen von Wehren [9]	4
2.3	Beeinflussung der Überfallströmung. a) vollkommener Überfall, b) kritische Tiefe an der Überfallkrone, c) unvollkommener Überfall [9]	5
2.4	Überfallsbeiwerte für verschiedene Wehrformen [12]	6
2.5	Abminderungsfaktor c , abhängig von Wehrhöhe (w) und Verhältnis Unterwasser (h_u) - Oberwasser (h) [9]	7
2.6	Einpassen eines <i>WES-Profiles</i> in das Grunddreieck [1]	8
2.7	Skizze eines Sturzwehres [4]	10
2.8	Fließzustände bei einem Stufenwehr [10]	11
2.9	Bezeichnungen für Wechselsprung im Tosbecken [8]	13
2.10	Ermittlung des für Tosbeckendimensionierung maßgebenden Abflusses [1] .	14
2.11	Formen des Wechselsprunges[10]	15
2.12	Ausbildung eines Wechselsprunges nach einem Sturzwehr [10]	16
2.13	USBR Tosbecken-Typen mit Einbauten[4]	18
2.14	Kolkformen, schematische Übersicht [13]	20
2.15	Kennzeichnende Phasen der Kolkentwicklung [13]	21
3.1	Wehrbauwerk Kraftwerk Rosenberg, aktueller Bestand [15]	25
3.2	Abmessungen Variante 01A Sturzwehr mit Betontos Becken (17,10m; 1,00m Gegenschwelle)	29
3.3	Abmessungen Variante 01B Sturzwehr mit Betontos Becken (10,25m; 0,50m Gegenschwelle)	30
3.4	Abmessungen Variante 02A Schusswehr mit Betontos Becken (16,50m; 1,00m Eintiefung/Gegenschwelle)	34
3.5	Abmessungen Variante 02B Schusswehr mit kurzem Betontos Becken (12,50m; 1,00m Eintiefung/Gegenschwelle)	35
3.6	Abmessungen Variante 02C Schusswehr mit Betonauslauf (2,50m, 1,00m Eintiefung) und Mulde auf HQ ₃₀ ausgelegt	35
3.7	Abmessungen Variante 03A Stufenwehr mit 1,00m Stufen und tiefem Tosbecken (10,25m Gesamtlänge Tosbecken, 2,05m Eintiefung/Gegenschwelle)	36
3.8	Abmessungen Variante 03C Stufenwehr mit 2,00m Stufen und „Herstellungsmulde“ aus Wasserbausteinen (25° geneigt, ungefähr Baugrube ausgelegt)	38
3.9	Bemessungsdiagramme für ein Tosbecken Typ 3 [3]	39
3.10	Abmessungen Variante 04A Schusswehr mit Störkörper Tosbecken (7,50m Gesamtlänge Tosbecken, Strahlaufreißer 0,50m hoch, Störkörper 1,00m hoch)	40
4.1	Skizze Modellaufbau	42

4.2	Sieblinien des verwendeten Donausandes	43
5.1	Unvollkommener Überfall über Gegenschwelle bei HQ ₁₀₀ nach 120 Minuten bei der Variante 01A	47
5.2	Maximale Kolkiefen und Kolkflächen bzw. Massen der Variante 01A . . .	47
5.3	Fotografische Endkolkprofile der Variante 01A	48
5.4	Endkolkprofile der Variante 01A	49
5.5	Sprung über Gegenschwelle und nachfolgende Walze bei HQ ₃₀₀ nach 45 Minuten bei der Variante 01B	51
5.6	Maximale Kolkiefen und Kolkflächen bzw. Massen der Variante 01B . . .	51
5.7	Fotografische Endkolkprofile der Variante 01B	52
5.8	Endkolkprofile der Variante 01B	53
5.9	Walze in der Mulde aus Wasserbausteinen bei HQ ₃₀₀ nach 90 Minuten bei der Variante 01C	55
5.10	Maximale Kolkiefen und Kolkflächen bzw. Massen der Variante 01C . . .	55
5.11	Fotografische Endkolkprofile der Variante 01C	56
5.12	Endkolkprofile der Variante 01C	57
5.13	Mulde aus Wasserbausteinen bei einem HQ ₃₀₀ nach 120 Minuten Versuchs- dauer der Variante 01D	59
5.14	Maximale Kolkiefen und Kolkflächen bzw. Massen der Variante 01D . . .	59
5.15	Fotografische Endkolkprofile der Variante 01D	60
5.16	Endkolkprofile der Variante 01D	61
5.17	Deckwalze im Tosbecken bei HQ ₃₀ nach 15 Minuten bei der Variante 02A .	63
5.18	Maximale Kolkiefen und Kolkflächen bzw. Massen der Variante 02A . . .	63
5.19	Fotografische Endkolkprofile der Variante 02A	64
5.20	Endkolkprofile der Variante 02A	65
5.21	Deckwalze im Tosbecken bei HQ ₃₀ nach 60 Minuten bei der Variante 02B .	67
5.22	Maximale Kolkiefen und Kolkflächen bzw. Massen der Variante 02B . . .	67
5.23	Fotografische Endkolkprofile der Variante 02B	68
5.24	Endkolkprofile der Variante 02B	69
5.25	Umlagerung der Wasserbausteine bei HQ ₁₀₀ nach 90 Minuten bei der Vari- ante 02C	71
5.26	Maximale Kolkiefen und Kolkflächen bzw. Massen der Variante 02C . . .	71
5.27	Fotografische Endkolkprofile der Variante 02C	72
5.28	Endkolkprofile der Variante 02C	73
5.29	Ablösung des Überfallstrahls bei HQ ₃₀ nach 30 Minuten bei der Variante 03A	75
5.30	Maximale Kolkiefen und Kolkflächen bzw. Massen der Variante 03A . . .	75
5.31	Fotografische Endkolkprofile der Variante 03A	76
5.32	Endkolkprofile der Variante 03A	77

5.33	Ablösung des Überfallstrahls bei HQ ₁₀ nach 15 Minuten bei der Variante 03B	79
5.34	Maximale Kolkiefen und Kolkflächen bzw. Massen der Variante 03B . . .	79
5.35	Fotografische Endkolkprofile der Variante 03B	80
5.36	Endkolkprofile der Variante 03B	81
5.37	Umlagerung der Mulde bei HQ ₃₀₀ nach 75 Minuten bei der Variante 03C .	83
5.38	Maximale Kolkiefen und Kolkflächen bzw. Massen der Variante 03C . . .	83
5.39	Fotografische Endkolkprofile der Variante 03C	84
5.40	Endkolkprofile der Variante 03C	85
5.41	Modell des Störkörpertosbeckens der Variante 04A	87
5.42	Maximale Kolkiefen und Kolkflächen bzw. Massen der Variante 04A . . .	87
5.43	Fotografische Endkolkprofile der Variante 04A	88
5.44	Endkolkprofile der Variante 04A	89
6.1	Endkolkprofile aller Varianten bei HQ ₁₀	94
6.2	Endkolkprofile aller Varianten bei HQ ₃₀	95
6.3	Endkolkprofile aller Varianten bei HQ ₁₀₀	96
6.4	Endkolkprofile aller Varianten bei HQ ₃₀₀	97
6.5	Maximale Endkolkiefen aller Varianten	98
6.6	Endkolkflächen und -massen aller Varianten	99

Tabellenverzeichnis

1	Abflusswerte Zeitreihe 1971 – 2010 (Pegel Rosenberg) [15]	25
2	Normalabflusstiefen im Unterwasser	26
3	Überfallhöhen nach Poleni für ein Sturzwehr	27
4	Wurfweiten des Überfallstrahls	28
5	Berechnete Froudzahlen und Wasserstände für das Sturzwehr	28
6	Berechnete Tosbeckenlänge für das Sturzwehr	29
7	Überfallhöhen nach Poleni für ein rundkroniges Schusswehr	32
8	Berechnete Froudzahlen und Wassertiefen für das Schusswehr	33
9	Berechnete Tosbeckenlänge für das Schusswehr	33
10	Froud'sche Modellgesetz, Umrechnungsfaktoren	43
11	Übertragungsverhältnisse	44
12	Modelldurchflüsse und Wassertiefen	44

1 Einleitung

Die langsame Abwendung von fossilen Energieträgern für die Stromerzeugung rückt nachhaltige und umweltfreundliche Energiegewinnung immer mehr in den Mittelpunkt der Politik, Wirtschaft und Öffentlichkeit. Wasserkraft aus Flusskraftwerken kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, weil diese in gewissen Bereichen regelbar ist und damit dem Strombedarf leicht angepasst werden kann. Energie aus Wasserkraft stellt eine wichtige Ergänzung für andere nicht grundlastfähige erneuerbare Energien wie Windkraft- und Photovoltaikanlagen dar.

Im Jahr 2014 erreichten die anrechenbaren erneuerbaren Energieträger mit 377 PJ in Österreich 33,0% des Bruttoendenergieverbrauchs. Der Anteil des erneuerbaren Stroms lag sogar bei 69,2%. Der Großteil der Stromerzeugung erfolgte 2014 in Österreich aus Wasserkraft (66,6%).[14]

Aus den Prozentsätzen lässt sich schließen, dass es in Österreich viele verwirklichte Wasserkraftanlagen gibt, welche laufend Sanierungs- oder Ausbauarbeiten notwendig haben. In dieser Arbeit wird die Optimierung einer Wehranlage mit theoretischen Hintergründen und praktischen Versuchsergebnissen behandelt. Dabei geht es aber nicht in erster Linie um die Steigerung der Stromproduktion, sondern um die feste Wehranlage und deren Ausformung verbunden mit unterschiedlichen Tosbeckenvarianten.

Ziel dieser Arbeit ist aus Wehrform und Tosbeckengestaltung eine optimierte Wehranlage für eine Niederdruckanlage zu finden, welche die effizienteste Energieumwandlung im Hochwasserfall aufweist.

Bei einem Hochwasserereignis müssen große Wassermengen schadlos abgeführt werden. Bei einer Niederdruckanlage mit festem Wehr geschieht dies im Regelfall über die Wehrkrone mit einem nachfolgenden Tosbecken. Diese Kombination soll eine bestmögliche Energieumwandlung gewährleisten, um die Kolkentwicklung flussabwärts minimal zu halten und die Standsicherheit der Anlage nicht zu gefährden. Die Kolkbildung diente bei den Modellversuchen als Indikator für Effizienz der untersuchten Varianten.

Aus aktuellem Anlass wurden Dimensionen und Randbedingungen für die Versuchsreihe mit den Ausbauplänen des Kraftwerks Rosenberg am Kamp verknüpft. Insgesamt elf verschiedene Varianten der Anlagenausbildung wurden mit Hilfe der gängigen Literatur entwickelt. Als Wehrformen kamen Sturzwehre, Schusswehre und Stufenwehre in Frage, die mit Betontos Becken, Muldentosbecken aus Wasserbausteinen und Störkörper Tosbecken zu

den elf Varianten kombiniert wurden. In einem 1:25 Schnittmodell fanden die hydraulischen Untersuchungen mit Abflussmengen vom HQ_{10} bis zum HQ_{300} statt. Bei den Versuchen wurde die Kolkbildung beobachtet und quantifiziert, um eine Aussage über die Effektivität der Energieumwandlung treffen zu können.

Die Ergebnisse der jeweiligen Varianten werden einzeln beurteilt und zum Schluss dieser Arbeit miteinander verglichen. Daraus können bevorzugte Kombination abgeleitet und Empfehlungen für Wehranlagen in dieser Größenordnung gegeben werden. Ein optimiertes System für die gegebene Wehranlage in Rosenberg kann ebenfalls entwickelt werden.

2 Hydraulische Grundlagen

Als Niederdruckanlagen bezeichnet man Laufkraftwerke mit einer Fallhöhe bis zu 30m. Der Fluss wird dabei durch ein Absperrbauwerk aufgestaut, um den Höhenunterschied bei der Energiegewinnung zu nützen. Die Absperrung kann durch eine Wehranlage, einen Damm oder Mauer, ein Krafthaus oder eventuell einer Schleuse realisiert werden. Nachfolgend werden nur die Wehranlagen behandelt. Es wird dabei zwischen beweglichen und festen Wehren unterschieden. In beiden Fällen bestehen sie aus einer Schwelle mit Überfallkrone und Überfallrücken, einem Tosbecken sowie anschließenden Kolkenschutzmaßnahmen. Der Unterschied besteht darin, dass bei beweglichen Wehren der Wasserspiegel im Oberwasser durch bewegliche Verschlüsse reguliert werden kann.[16]

In dieser Arbeit wird ein festes Wehr untersucht, welches schematisch in Abbildung 2.1 zu sehen ist. Die hydraulischen Grundlagen eines festen Wehres beziehen sich auf drei wesentlichen Bestandteile:

- Arten des Überfalls und Wehrformen
- Energieumwandlung im Tosbecken
- Kolkentstehung und damit verbundener Kolkenschutz

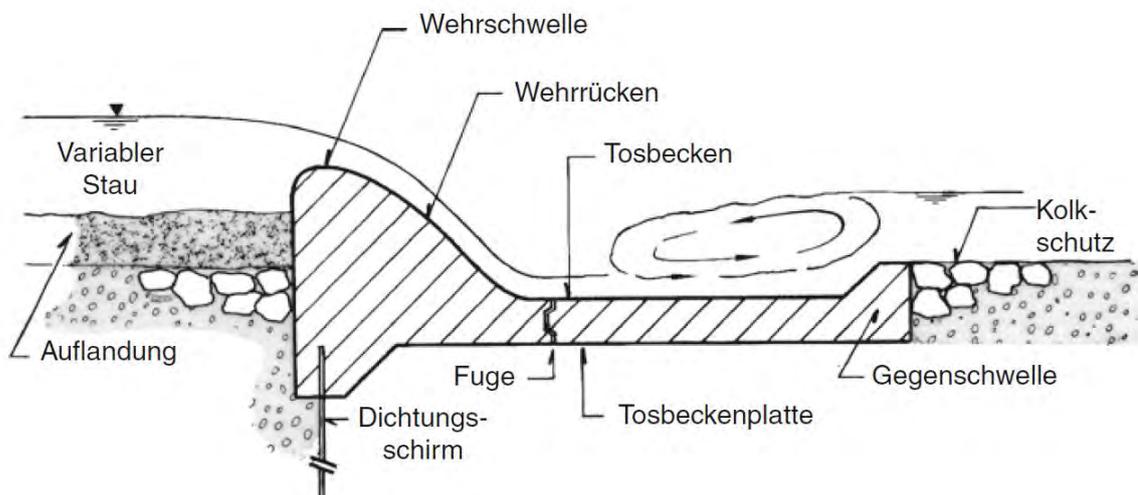


Abbildung 2.1: Regel-Längsschnitt durch ein festes Wehr [11]

2.1 Arten des Überfalls und Wehrformen

Das kennzeichnende Merkmal für die unterschiedlichen Arten von Wehren ist die Lage der Überfallkante. Man unterscheidet zwischen scharfkantigen, rundkronigen und breiten

Wehren, wie in Abbildung 2.2 zu sehen ist. Als Wehrkrone wird der höchste Punkt des Wehres bezeichnet. Die hydraulische Leistungsfähigkeit der einzelnen Formen ergibt sich aus den jeweils erreichten Abflüssen, ausgedrückt durch den sogenannten Überfallsbeiwert sowie der äußeren Form der Überströmung. Die Überfallsbeiwerte für verschiedene Wehrformen sind bereits vielfach empirisch ermittelt worden (siehe Abbildung 2.4) und dienen der Bemessung von Überfallbauwerken.

Der dimensionslose Überfallsbeiwert dient dazu, die in der Berechnung des Abflusses über ein Wehr von vornherein unbekanntes Größen der Wassertiefe über der Wehrkrone sowie der Druckverteilung in diesem Querschnitt aufgrund der gekrümmten Strömungslinien zusammenzufassen. Die gebräuchlichste Abflussformel von *Poleni* (Formel 1) stellt daher den Abfluss in Bezug zu den bekannten Größen Oberwassertiefe bzw. Oberwasserenergiehöhe.[5][9]



Abbildung 2.2: Kronenformen von Wehren [9]

Besondere Bedeutung kommt den Druckverhältnissen an der Unterseite des Abflussstrahles zu. Während beim scharfkantigen Überfall (bei ausreichender Belüftung) atmosphärischer Druck herrscht, sind die Druckverhältnisse am rundkronigen Wehr von dessen Formgebung abhängig. Grundsätzlich gilt, dass eine Ausformung des rundkronigen Wehres, gemäß der Kontur der Unterseite des Abflussstrahles (der etwa der Wurfparabel entspricht) für einen bestimmten Abfluss bei einem scharfkantigen Wehr, keine Unter- bzw. Überdrücke erzeugt.

Liegt die Kontur des Überfallbauwerkes im Falle eines scharfkantigen Wehres für einen bestimmten Abfluss unterhalb der Unterkante des Abflussstrahles, entsteht in solchen Bereichen, wenn keine Belüftung vorgesehen ist, Unterdruck. Im umgekehrten Falle ergibt sich ein Überdruck. Die beschriebenen Phänomene beeinflussen damit die Größe des Überfallsbeiwertes. In der Praxis werden geringe Unterdrücke im Wehrscheitelbereich zur Erhöhung der Überfalleistung bei größeren Abflüssen sogar gewünscht.[5]

2.1.1 Arten des Überfalls

Je nach Lage des Unterwasserspiegels wird der Überfall beeinflusst. Ist der Unterwasserstand so niedrig, dass der Wasserstand vor dem Wehr davon unbeeinflusst bleibt, so spricht man von einem *vollkommenen Überfall*. Bei Bauwerken mit tiefliegender Krone kann das Unterwasser den Wasserstand oberstrom des Bauwerkes beeinflussen. Man spricht von einem *unvollkommenen Überfall*, siehe Abbildung 2.3.[9]

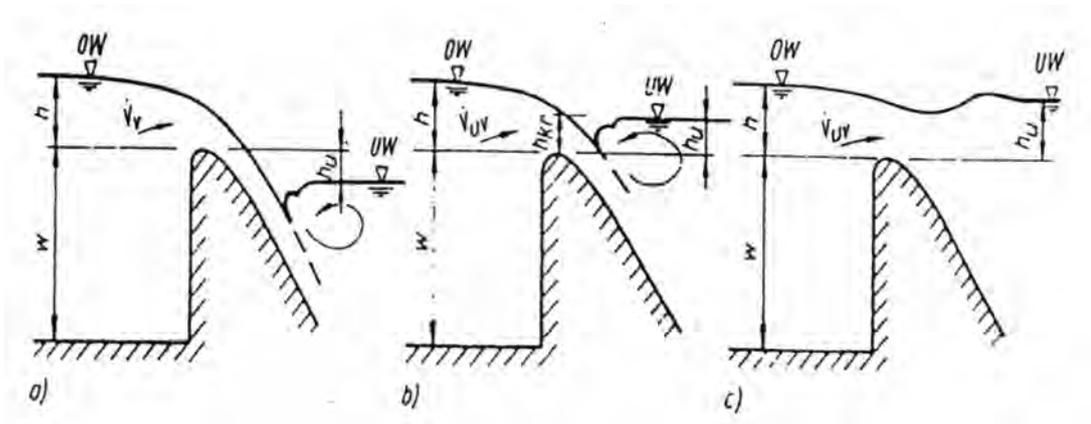


Abbildung 2.3: Beeinflussung der Überfallströmung. a) vollkommener Überfall, b) kritische Tiefe an der Überfallkrone, c) unvollkommener Überfall [9]

Vollkommene Überfälle Hierfür existieren mehrere Berechnungsformeln. Eine der gängigsten ist die Formel nach *Poleni*:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot h_{\ddot{u}}^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

- Q ... Durchfluss [m³/s]
- μ ... Überfallbeiwert (dimensionslos) aus Abbildung 2.4
- b ... wirksame Kronenbreite [m]
- g ... Erdbeschleunigung = 9,81 [m/s²]
- $h_{\ddot{u}}$... Wassertiefe über der Wehrkante [m]

Diese Formel basiert auf der Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung über der Wehrkrone und damit einer gleichmäßigen Geschwindigkeitsverteilung. Dies ist in der Realität nicht der Fall, da die Stromfäden hier nicht parallel sind und sich damit auch eine über die Höhe veränderliche Geschwindigkeit einstellt. Im Fall eines vollkommenen Überfalles stellt sich beim rundkronigen Wehr über der Wehrkrone die Grenztiefe ein. Es erfolgt somit ein Übergang vom strömenden zum schießenden Abfluss. Da bei jeder Wehrform die Druckverteilung über der Wehrkrone unterschiedlich ist, soll der Überfallbeiwert μ die fehlende Information der Geschwindigkeitsverteilung ausgleichen.[5][9]

Tafel 6 Überfallbeiwerte μ

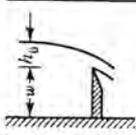
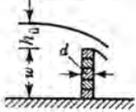
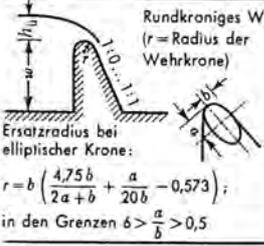
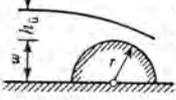
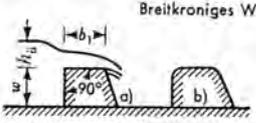
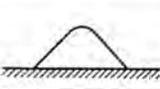
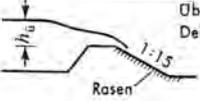
Wehrkronenform	Überfallbeiwert μ														
	überschlägig in Gl. 97 (niedriges Wehr) in Gl. 98 (hohes Wehr)	genau in Gl. 98 (bei Anwendung für niedrige Wehre)													
 <p>Scharfkantiges Wehr mit belüftetem Strahl</p>	$\mu = 0,64$	$\mu = 0,605 + \frac{1}{1000} \frac{h_u}{h_u} + 0,08 \frac{h_u}{w}$ <p>(h_u, w in m) (gilt für $w > 0,06$ m, $h_u > 0,01$ m, $h_u < 0,8 w$)</p>													
 <p>Dambalkenwehr</p>	<p>Der für das scharfkantige Wehr gültige μ-Wert ist mit ϵ zu multiplizieren</p> <table border="1"> <tr> <td>$d/h_u \leq 2/3$</td> <td>1,0</td> <td>1,5</td> <td>2,0</td> <td>2,5</td> <td>3,0</td> </tr> <tr> <td>ϵ</td> <td>1,0</td> <td>0,88</td> <td>0,82</td> <td>0,79</td> <td>0,77</td> <td>0,76</td> </tr> </table>	$d/h_u \leq 2/3$	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	ϵ	1,0	0,88	0,82	0,79	0,77	0,76	
$d/h_u \leq 2/3$	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0										
ϵ	1,0	0,88	0,82	0,79	0,77	0,76									
 <p>Rundkroniges Wehr (r = Radius der Wehrkrone)</p> <p>Ersatzradius bei elliptischer Krone: $r = b \left(\frac{4,75 b}{2a + b} + \frac{a}{20b} - 0,573 \right)$ in den Grenzen $\delta > \frac{a}{b} > 0,5$</p>	$\mu = 0,75$	$\mu = 0,312 + \sqrt{0,3 - 0,01 \left(5 - \frac{h_u}{r} \right)^2} + 0,09 \frac{h_u}{w}$ <p>(gültig für $w > r > 0,02$ m, $h_u < r \left[6 - \frac{20r}{w + 3r} \right]$)</p>													
 <p>Kreiszyndrisches Wehr</p>		$\mu = 0,55 + 0,22 \frac{h_u}{w}$ <p>(gültig für $0,1 < \frac{h_u}{w} < 0,8$)</p>													
 <p>Breitkroniges Wehr</p>	a) $\mu = 0,49$ b) $\mu = 0,52$	a) $\mu = 0,49$ (für $\frac{b_1}{h_u} > 3$) b) $\mu = 0,50$ (für $\frac{h_u}{w} = 0,10$) b) $\mu = 0,55$ (für $\frac{h_u}{w} = 0,55$)													
 <p>Vollständig abgerundeter, breiter Überfall</p> <p>(z. B. ganz umgelegte Fischbauchklappe)</p>	$\mu = 0,65 \dots 0,73$														
 <p>Dachform, abgerundete Krone</p>	$\mu = 0,79$														
 <p>Überströmter Deich Rasen</p>		$\mu = 0,40$ (für $h_u = 0,06$ m) $\mu = 0,55$ (für $h_u = 0,45$ m)													

Abbildung 2.4: Überfallsbeiwerte für verschiedene Wehrformen [12]

Unvollkommene Überfälle Im Gegensatz zum vollkommenen Überfall wird hierbei der Abfluss über das Wehrbauwerk vom Unterwasser beeinflusst. Die Grenztiefe wird an der Wehrkrone nicht mehr erreicht und der gesamte Abfluss erfolgt strömend. Die Energiehöhenunterschiede zwischen Ober- und Unterwasser sind entsprechend geringer als bei einem vollkommenen Überfall. Der unvollkommene Überfall stellt einen Übergang zwischen dem beschriebenen vollkommenen Überfall und dem Überströmen dar.[5] Der Abfluss im Falle eines unvollkommenen Überfalls ergibt sich durch [9]:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot c \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot h_{\ddot{u}}^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

- Q ... Durchfluss [m³/s]
- μ ... Überfallbeiwert (dimensionslos) aus Abbildung 2.4
- c ... Abminderungsfaktor aus Abbildung 2.5
- b ... wirksame Kronenbreite [m]
- g ... Erdbeschleunigung = 9,81 [m/s²]
- $h_{\ddot{u}}$... Wassertiefe über der Wehrkante [m]

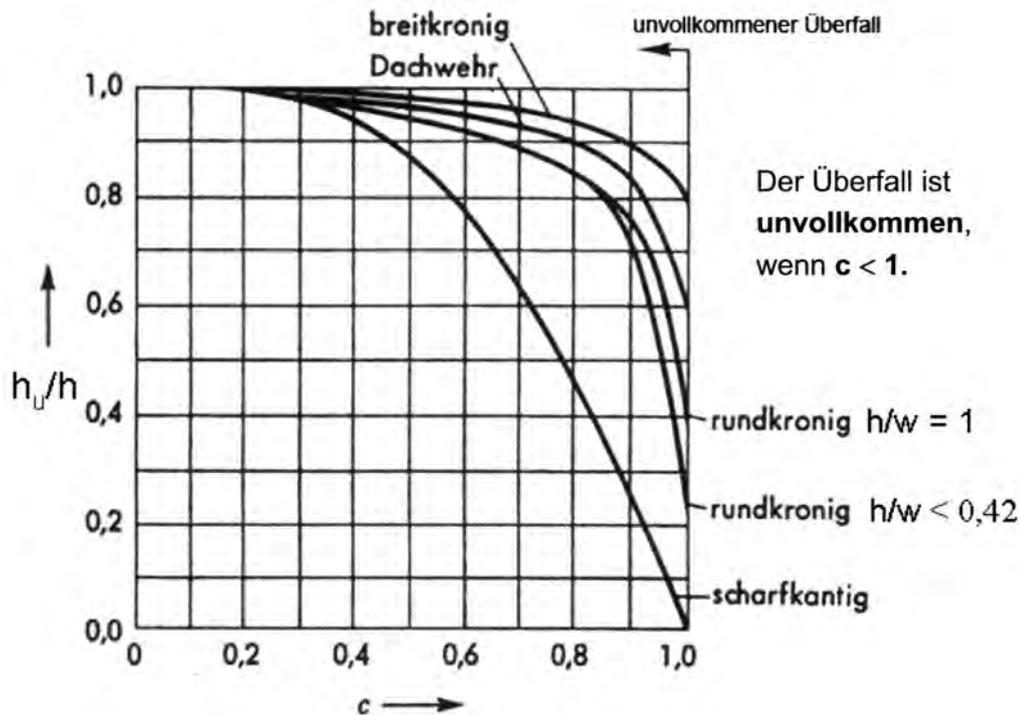


Abbildung 2.5: Abminderungsfaktor c , abhängig von Wehrhöhe (w) und Verhältnis Unterwasser (h_u) - Oberwasser (h) [9]

2.1.2 Wehrformen

Die Wehrform soll so gestaltet sein, dass bei einer bestimmten Abflussleistung keine Ablösungen oder größere Unterdrücke infolge der gekrümmten Strombahnen am Überlauf rücken entstehen. Dies wird am ehesten gewährleistet, wenn man das Überlaufprofil an den Verlauf eines freien Wurfstrahls anpasst. Dabei versteht es sich von selbst, dass eine feste Wehrkrone nur nach einer einzigen Überströmungshöhe ideal geformt werden kann. Es ist unwirtschaftlich, das Wehrprofil an den größten Bemessungsabfluss anzupassen, der nur äußerst selten und kurzfristig auftritt. Man wählt deswegen eine wirtschaftliche Form für einen zeitlich länger währenden, geringen Abfluss und lässt bei seltenen Höchstabflüssen bewusst Unterdrücke zu.

2.1.2.1 Rundkroniges Wehr - WES Profil

In diesem Zusammenhang wurde das *WES-Profil* vom CORPS OF ENGINEERS [3] entwickelt und empfohlen. Dieses Wehrprofil wird in ein Grunddreieck eingepasst, dessen festzulegende Neigung aus statischer Überlegung kommt, wie in Abbildung 2.6 zu sehen ist.[1]

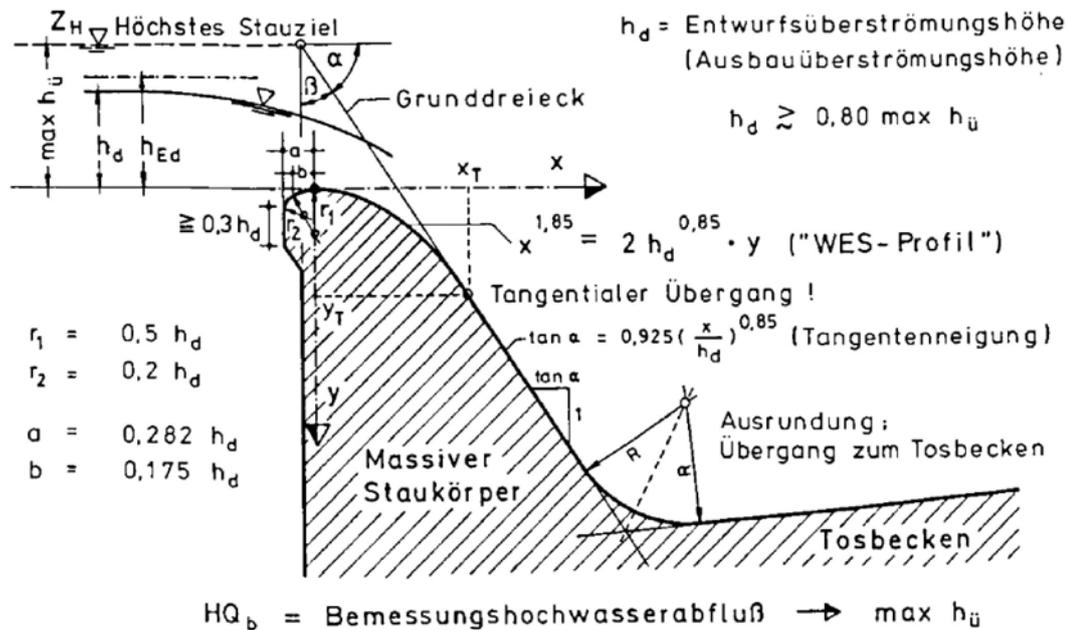


Abbildung 2.6: Einpassen eines WES-Profiles in das Grunddreieck [1]

Im Hinblick auf eine einfachere bauliche Umsetzung bei kleineren Anlagen kann es auch ausreichend sein, lediglich kreisförmige oder elliptische Kronenausrundungen vorzunehmen. Der mit einer horizontalen Tangente beginnende Kreisbogen-Übergang bzw. die elliptische Formgebung sind vorzuziehen, da bei der rein kreisförmigen Ausrundung der geometrische vorgegebene Radius oft nicht ausreicht, um merkliche Unterdrücke zu vermeiden.[1]

2.1.2.2 Sturzwehre

Für Wehrschwelle mit geringer Höhe kann die aufwendige Ausformung eines rundkronigen Wehres unwirtschaftlich sein. Wenn dies der Fall ist, werden Sturzwehre bevorzugt. Diese sind durch einen freien Überfall gekennzeichnet, der auf einer Aufprallzone in einen hydraulischen Wechselsprung übergeht, wie in Abbildung 2.7 zu sehen. Ein Vorteil ist, dass schon beim Aufprall und beim gefolgt Wechselsprung eine Energieumwandlung erreicht wird.[4]

Die einfachste Form des Sturzwehres ist eine horizontale Wehrkrone mit Absturz. Dabei wird der Abfluss über die horizontale Platte bis zum Ablösepunkt beschleunigt. Am

Ablösepunkt kann die Überfallhöhe laut Abbildung 2.7 wie folgt abgeschätzt werden [4]:

$$d_b \approx 0,7 \cdot d_c \quad (3)$$

Bezeichnungen gemäß Abbildung 2.7

Beim Aufprall des Wurfstrahls entsteht bei ausreichender Belüftung eine Rückwalze. Diese Rückwalze ist wichtig, damit der Wurfstrahl seine Richtung horizontal zum Boden ändern und nach dem Aufprall einen hydraulischen Wechselsprung ausbilden kann. Die Länge des Wurfstrahls kann mit einer Wurfparabel nach Formel 4 [8] berechnet werden:

$$x = \frac{v^2}{2g} \cdot \sin(2\alpha) + 2 \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \cos(\alpha) \cdot \sqrt{\sin(\alpha)^2 + \frac{2g}{v^2} \cdot y} \quad (4)$$

- α ... Winkel des Wurfstrahls beim Ablösen
- g ... Erdbeschleunigung
- v ... Geschwindigkeit des Wurfstrahls beim Ablösen
- y ... Höhendifferenz zwischen Ablösepunkt und Aufprallniveau
- x ... Wurfdistanz

Alternativ dazu kann der Wurfstrahl auch mit folgenden empirischen Formeln abgeschätzt werden, die die Zusammenhänge zwischen allen Größen aus Abbildung 2.7 geben [4]:

$$\frac{L_d}{\Delta z} = 4,30 \cdot \left(\frac{d_c}{\Delta z} \right)^{0,81} \quad (5)$$

$$\frac{d_p}{\Delta z} = \left(\frac{d_c}{\Delta z} \right)^{0,66} \quad (6)$$

$$\frac{d_1}{\Delta z} = 0,54 \cdot \left(\frac{d_c}{\Delta z} \right)^{1,275} \quad (7)$$

$$\frac{d_2}{\Delta z} = 1,66 \cdot \left(\frac{d_c}{\Delta z} \right)^{0,81} \quad (8)$$

Bezeichnungen gemäß Abbildung 2.7

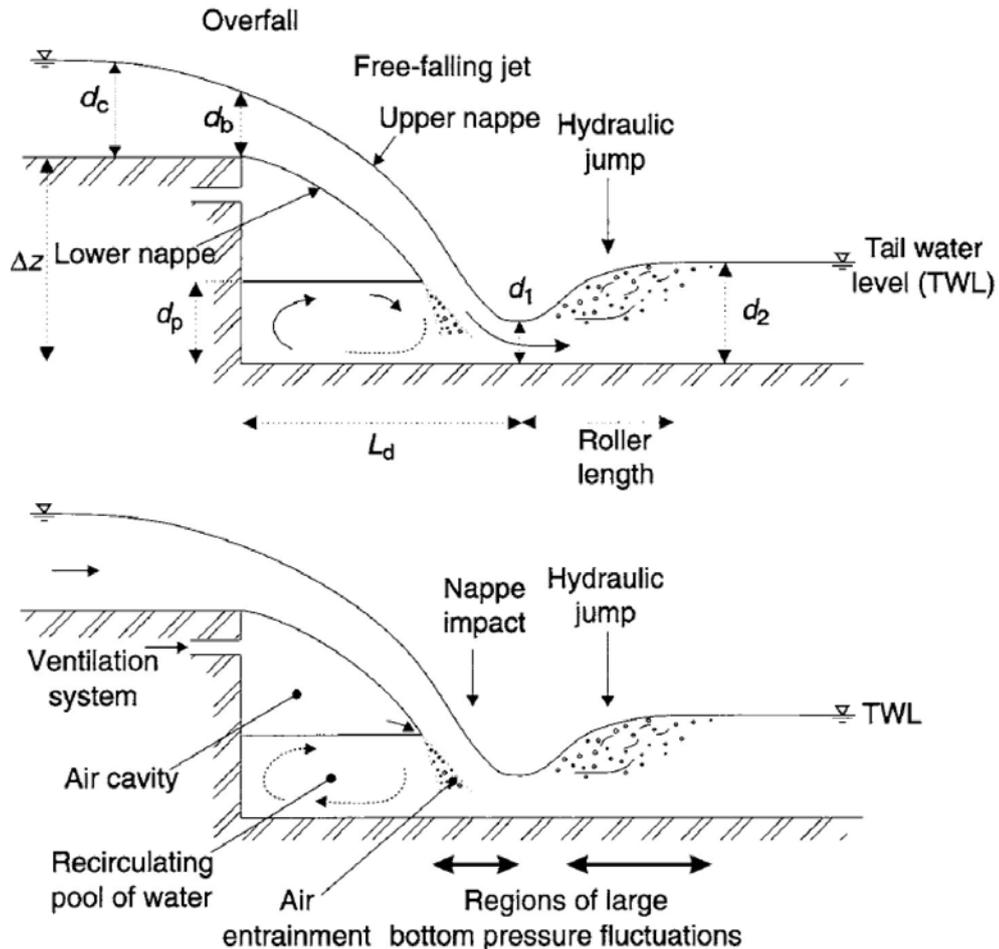
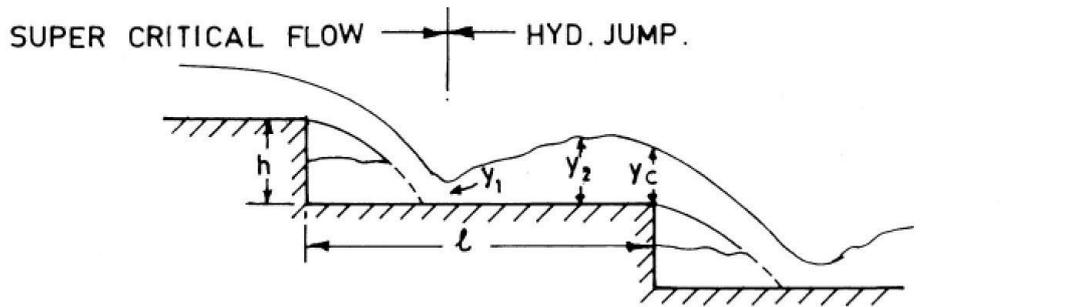


Abbildung 2.7: Skizze eines Sturzwehres [4]

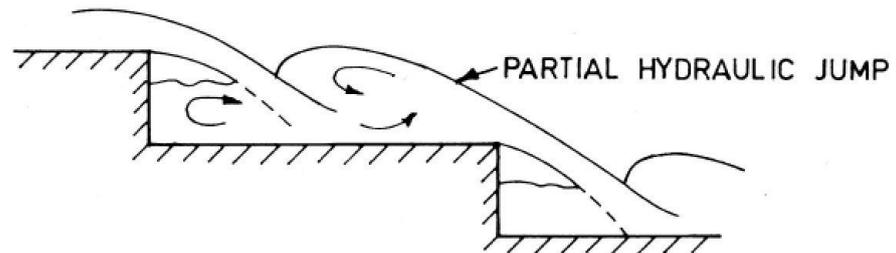
2.1.2.3 Stufenwehre - Kaskadenwehr

Eine verwandte Form des Sturzwehres ist das Stufenwehr (*stepped weir* oder *stepped spillway*) oder auch Kaskadenwehr. In den letzten Jahrzehnten wurden aus den folgenden zwei Gründen immer mehr Versuche mit dieser Art der Wehrgestaltung gemacht. Einerseits wurde die Herstellungsmethode von *Roller Compacted Concrete*, bei der sich ein stufenweiser Aufbau anbietet, immer beliebter. Andererseits kann ein Teil der Energieumwandlung schon auf dem Wehrrücken vollzogen werden, um mit einem kürzeren Tosbecken am Fuß des Wehrs auszukommen. Aktuell werden Stufenwehre nur bis $30\text{m}^3/\text{s}$ pro Meter Wehrkrone eingesetzt, da durch die vielen Stufen keine ausreichende Belüftung wie beim Sturzwehr gegeben ist und damit Kavitation eine große Rolle spielt.

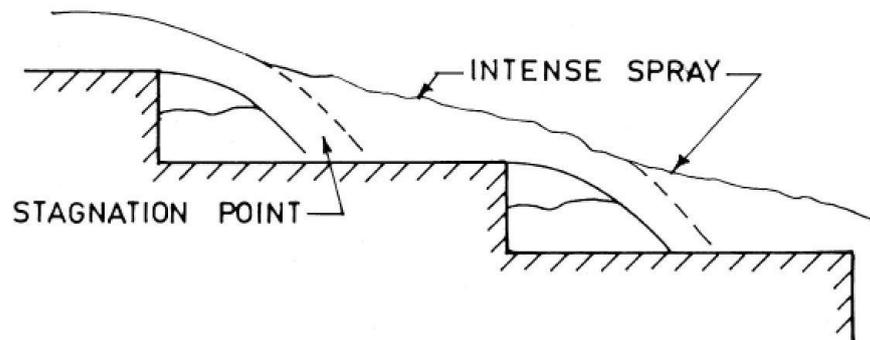
Der Abfluss über ein Stufenwehr kann in die folgenden drei Fließzustände eingeteilt werden, die auch in Abbildung 2.8 zu sehen sind.[10]



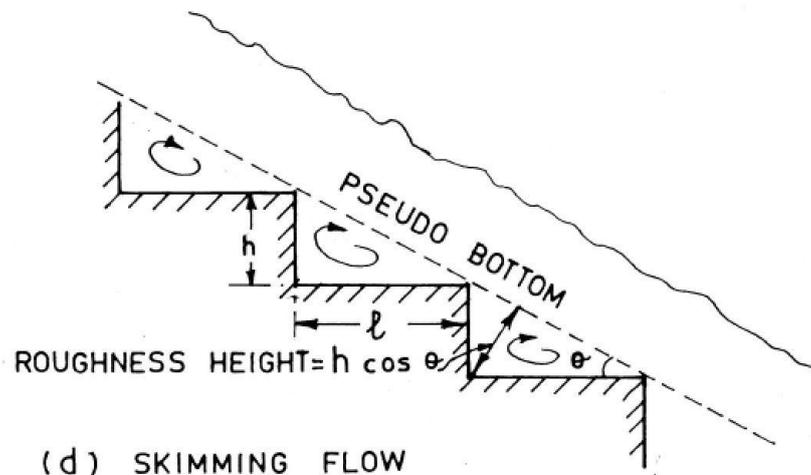
(a) NAPPE FLOW WITH FULLY DEVELOPED HYDRAULIC JUMP



(b) NAPPE FLOW WITH PARTIAL HYDRAULIC JUMP.



(c) TRANSITION FLOW



(d) SKIMMING FLOW

Abbildung 2.8: Fließzustände bei einem Stufenwehr [10]

Nappe Flow In diesem Zustand schlägt jeder freie Wurfstrahl auf der nächsten Stufe auf und bildet eine vollständigen oder teilweisen Wechselsprung. Diesen Abfluss kann bei sehr flachen Wehren und bei geringen Abflüssen beobachten werden. Die Energieumwandlung findet auf jeder Stufe statt.

Transition Flow Bei steigenden Abflussmengen verschwindet der Luftpolster unter dem Wurfstrahl durch fehlende Belüftung immer mehr und der Aufprallpunkt des Strahles wandert immer näher an die nächste Stufenkante. Dieses Fließverhalten ist geprägt durch viele Lufteinmischungen, starkes Spritzen und chaotisches Erscheinungsbild.

Skimming Flow Bei weiterem Anstieg der Abflussmengen verschwindet der Luftpolster unter dem Wurfstrahl völlig. Die kompletten Stufen sind dabei mit Wasser gefüllt und bilden kleine Rückwalzen, die maßgebend zur Energieumwandlung beitragen. Der Hauptstrom fließt annähernd glatt über die Stufen.

Bei Stufenwehren gibt es viele Ausführungsmöglichkeiten. Es wurden schon Varianten mit schiefen Stufen, beckenartigen Stufen und veränderlichen Stufengrößen untersucht. An dieser Stelle sei auf *R.M. Khatsuria* (2005) verwiesen, in dessen Buch [10] empirische Bemessungsformeln zu finden sind.

2.2 Energieumwandlung im Tosbecken

Die Dissipation der kinetischen Energie, die am Fuße einer Wehranlage durch den Überfall entlang des Wehrrückens aufgebaut wird, ist entscheidend für die Standsicherheit der Anlage und des umliegenden Geländes. Die dem auftretenden Schussstrahl zugehörige Energiemenge muss soweit vermindert werden, dass eine Schädigung der Sohle und des Ufers möglichst gering gehalten wird. Die Überschussenergie wird im Wesentlichen in Schall- und Wärmeenergie umgewandelt.

Je nach Art des Wehrbauwerks kommen unterschiedliche Energieumwandlungssysteme zum Einsatz, wie zum Beispiel Tosbecken, Sprungschanzen, Prallplatten oder Sturzbecken. Für Niederdruckanlagen mit entsprechend geringen Höhenunterschieden zwischen Ober- und Unterwassersohle werden hauptsächlich einfache Wechselsprung-Tosbecken verwendet, welche im weiteren Verlauf genauer betrachtet werden. Die Energieumwandlung bei Tosbecken geschieht durch großräumige Walzenbewegungen und intensive Vermischungs- und Verwirbelungsvorgänge. Durch diese Makroturbolenzen kann sich das Wasser in den Wehranlagen „austosen“, woher auch der Name kommt. Die hydraulischen und wirtschaftlichen Anforderungen bei der konstruktiven Gestaltung eines Tosbeckens sind, einen möglichst hohen Energieumsatz bei reduzierten Tosbeckenabmessungen zu erzielen.

2.2.1 Wechselsprung

Im Tosbecken findet die Energieumwandlung in Form des Wechselsprungs statt. Unter dem Wechselsprung versteht man den sprunghaften, verlustbehafteten Übergang eines schießenden zum strömenden Abflusszustand. Die Zuordnung eines Abflusses in die Formen *Strömen* und *Schießen* erfolgt über die *Froude'sche* Zahl, die das Verhältnis der mittleren Fließgeschwindigkeit zur Wellenausbreitungsgeschwindigkeit ausdrückt.[5] Bei $Fr < 1$ liegt strömender, bei $Fr > 1$ schießender Abfluss vor.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (9)$$

- g ... Erdbeschleunigung
 h ... Wassertiefe
 v ... zugehörige mittlere Geschwindigkeit

Die Wassertiefe h_1 vor dem Wechselsprung und jene Wassertiefe h_2 danach sind über den Impulssatz miteinander verknüpft. Man nennt sie konjugierte Wassertiefen. Diese stehen durch Formel 10 miteinander in Verbindung.[1]

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1 \right) \quad (10)$$

Bezeichnungen gemäß Abbildung 2.9

- Fr_1 ... *Froude'sche* Zahl des Eintritts-Schussstrahles
 h_1 ... Wassertiefe vor dem Wechselsprung
 h_2 ... Wassertiefe nach dem Wechselsprung

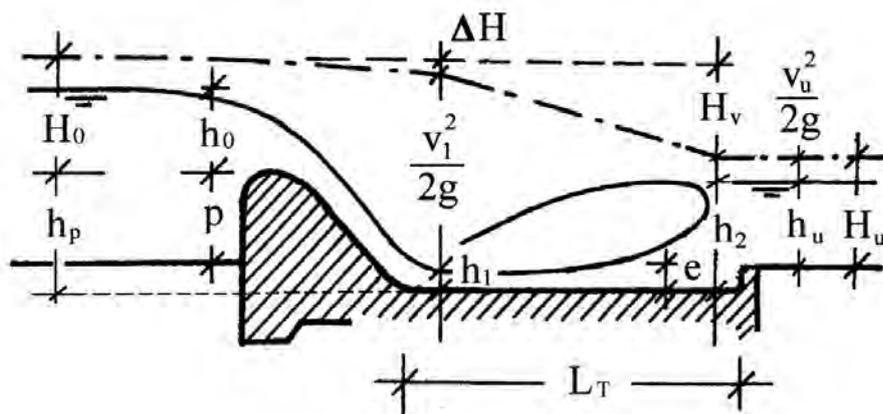


Abbildung 2.9: Bezeichnungen für Wechselsprung im Tosbecken [8]

Mit dem im strömenden Fließzustand vorgegebenen Unterwasser h_u und der Eintiefung des Tosbeckens e sind nun 3 Fälle möglich [1]:

$h_2 > h_u + e \dots$ Eintiefung reicht nicht aus!

Das vorhandene Unterwasser ist nicht tief genug, um zusammen mit der gewählten Eintiefung ein Abwandern der Deckwalze zu verhindern. Dieser Zustand muss auf alle Fälle verhindert werden, da die Energieumwandlung sonst nicht im Tosbecken stattfindet.

$h_2 = h_u + e \dots$ Eintiefung genau ausreichend!

Dies ist der rein theoretische Fall passend für einen einzigen Abfluss.

$h_2 < h_u + e \dots$ Eintiefung zu groß!

Es würde sich mit der gewählten Eintiefung ein rückgestauter Wechselsprung ausbilden, der bezüglich des Energieumsatzes schlechter als die freie Deckwalze ist.

Generell richtet man die Eintiefung so ein, dass immer eine gewisse Reserve gegen das Abwandern des Wechselsprunges aus dem Tosbecken vorhanden ist. Die Eintiefung sollte dabei folgender Bedingung für den Einstaugrad ε genügen [1]:

$$1,05 \leq \varepsilon = \frac{h_u + e}{h_2} \leq 1,25 \quad (11)$$

Bezeichnungen gemäß Abbildung 2.9

- $e \dots$ Eintiefung des Tosbeckens
- $h_u \dots$ Wassertiefe Unterwasser
- $h_2 \dots$ Wassertiefe nach dem Wechselsprung

Für die Tosbeckendimensionierung muss nicht der Maximalabfluss, also der Bemessungsabfluss, maßgebend sein. Man muss durch Untersuchungen mehrerer Abflüsse klären, welche Beaufschlagung die größte Eintiefung und die größte Tosbeckenlänge ergibt. Praktisch führt man solche Untersuchungen anhand von Abflusskurven durch, wie dies Abbildung 2.10 zeigt.[1]

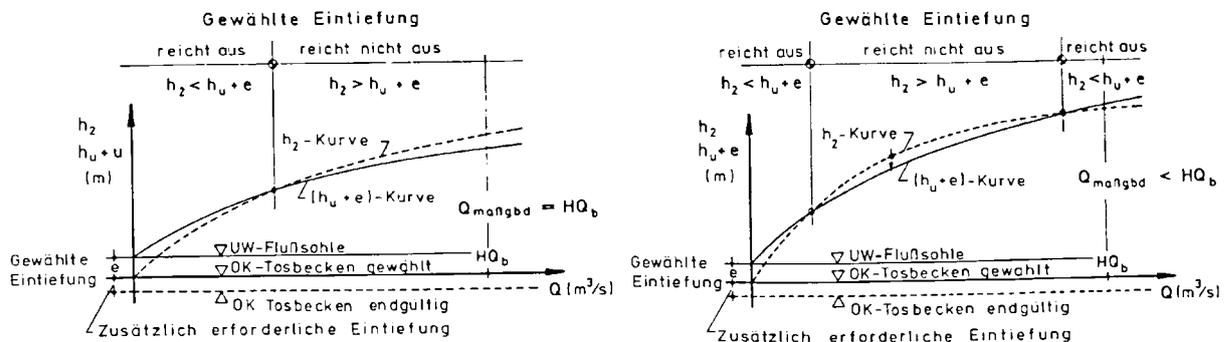


Abbildung 2.10: Ermittlung des für Tosbeckendimensionierung maßgebenden Abflusses [1]

Die Qualität des Wechselsprunges hängt vor allem von der Froude'schen Zahl des Eintritts-schussstrahles (Fr_1) ab. Je nach deren Größe treten folgende Arten auf, die auch in

Abbildung 2.11 gezeigt sind.[8][10]

- $Fr_1 < 1,7$ kein deutlicher Wechselsprung (Riffeln an der Wasseroberfläche)
- $1,7 < Fr_1 < 2,5$ keine Deckwalzenbildung (geringer Energieumsatz)
- $2,5 < Fr_1 < 4,5$ „oszillierender“ Wechselsprung (starke Wellenbildung im Unterwasser)
- $4,5 < Fr_1 < 9,0$ stabiler Bereich für Wechselsprung (effiziente Energieumwandlung)
- $Fr_1 > 9,0$ erhöhte Turbulenz (starke Wellenbildung im Unterwasser)

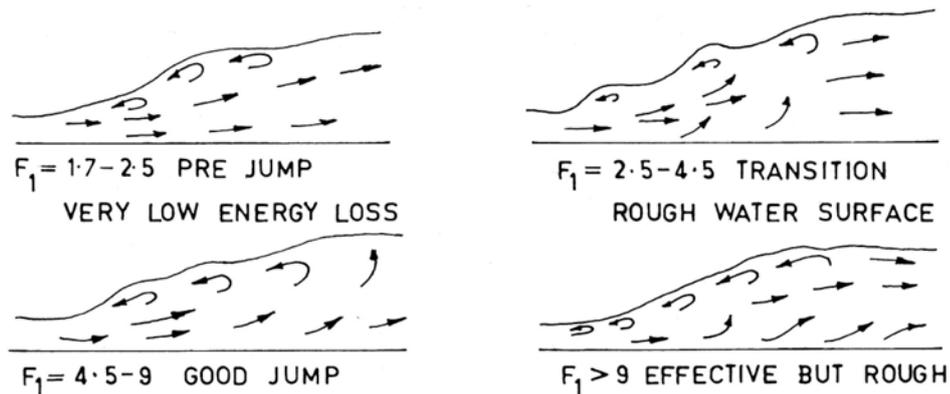


Abbildung 2.11: Formen des Wechselsprunges[10]

In der Praxis findet eine gute Energieumwandlung bei einer *Froude*'schen Zahl von 4 bis 9 statt. Diese Werte können jedoch bei Niederdruckanlagen trotz Anordnung einer Unterwassereintiefung nur sehr selten erreicht werden. Es ist in diesem Fall durch geeignete Maßnahmen (zum Beispiel Tosbeckeneinbauten) dafür zu sorgen, dass die hydraulischen Auswirkungen der verminderten Energieumwandlung möglichst gering gehalten werden.[5]

Für den Sonderfall eines Wechselsprunges nach einem Sturzwehr stellt *Khatsuria* (2005) [10] Bemessungsformeln bereit, die alle durch die Sturzzahl D aus Formel 12 gekennzeichnet sind.

$$D = \frac{q^2}{gh^3} \quad (12)$$

Bezeichnungen gemäß Abbildung 2.12

- g ... Erdbeschleunigung
- q ... Abfluss pro Wehrkronen-Einheit
- h ... Wehrhöhe

Die weiteren Beziehungen der Größen aus Abbildung 2.12 werden durch die nachfolgenden Formeln hergestellt.[10]

$$\frac{L_d}{h} = 4,30 \cdot D^{0,27} \quad (13)$$

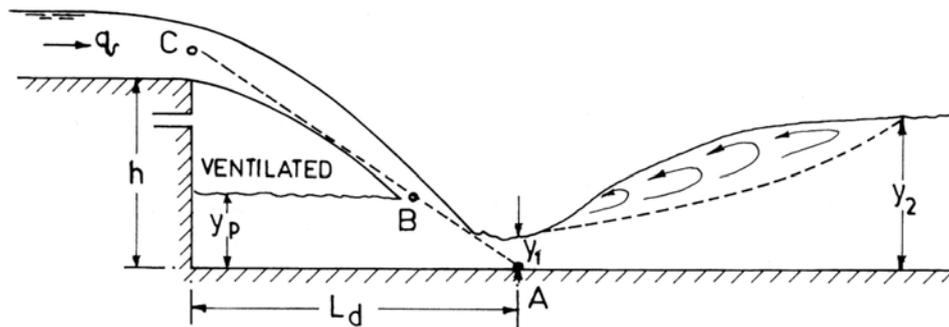


Abbildung 2.12: Ausbildung eines Wechselsprunges nach einem Sturzwehr [10]

$$\frac{y_p}{h} = 1,0 \cdot D^{0,22} \quad (14)$$

$$\frac{y_1}{h} = 0,54 \cdot D^{0,0,425} \quad (15)$$

$$\frac{y_2}{h} = 1,66 \cdot D^{0,27} \quad (16)$$

$$L_T = 6,9 \cdot (y_2 - y_1) \quad (17)$$

Bezeichnungen gemäß Abbildung 2.12

L_T ... Länge eines gewöhnlichen Tosbeckens gemäß Abbildung 2.9

2.2.2 Einfaches Tosbecken - Längenbemessung

Für die Abschätzung der Länge eines einfachen Tosbeckens existiert eine große Anzahl von Bemessungsansätzen [8]:

nach *Blind* [1] $L_T = 4,5 \cdot (h_2 - h_1)$

nach *Smetana* $L_T = h_1 \cdot 3 \cdot \left(\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 3 \right)$

nach *Woycicki* $L_T = h_1 \cdot 0,05 \cdot \left(81 \cdot \sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 2 - 2 \cdot Fr_1^2 - 241 \right)$

nach *Tschertousow* $L_T = h_1 \cdot 10,3 \cdot (Fr_1 - 1)^{0,81}$

nach *Rouse* $L_T = h_1 \cdot 2,5 \cdot \left(\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1 \right)$

nach *USBR* [3] $L_T = k \cdot h_2$, wo $k = f(Fr_1)$

Fr_1	2,4	4,0	5,0	6-11	14
k	4,8	5,8	6,0	6,13	6,0

Die Tosbeckenlänge sollte mindestens der Länge des Wechselsprunges entsprechen, daran orientieren sich auch die empirischen Berechnungsformeln. Es ergeben sich dadurch Unterschiede in den Ergebnissen der einzelnen Berechnungsformeln. Diese Streuung unterstreicht

die Bedeutung von Modellversuchen als begleitenden Teil der Planung, um die speziellen Situationen in jedem Projekt zu berücksichtigen.

2.2.3 Tosbecken mit Einbauten

Das einfache Tosbecken weist vor allem bei kleinen Eintritts-Froudezahlen oder asymmetrische Anströmung eine unzureichende Energieumwandlung auf. Zusätzlich sind Tosbecken mit ebenem Übergang von Tosbecken zu Flusssohle ohne Schwelle besonders anfällig für Kolkbildungen. Einbauten in Form von Stufen, Schwellen, Zähnen, Blöcken sowie Strahlaufreißern können den Wechselsprung stabilisieren, die Energieumwandlung verbessern, das Tosbecken verkürzen und auch die Wellenbildung und die Nachkolkentwicklung vermindern.[8]

Da es kein universell gültiges Prinzip für die Anordnung solcher Einbauten gibt, wurden von der *US Bureau of Reclamation* [3] umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurden drei gängige Typen entwickelt, die häufig zur Anwendung kommen und in Abbildung 2.13 skizziert sind. Die genauen Bemessungsformeln sind in *Design of Small Dams* [3] zu finden.

Um die Kolkbildung im Anschluss an das Tosbecken zu minimieren, wird bei Niederdruckanlagen häufig eine schräge Rampe im letzten Tosbeckendrittel oder im Nachbett angeordnet. Am Ende eines Tosbeckens ist eine Endschwelle empfehlenswert. Diese Endschwelle sowie eventuell darauf aufgesetzte Zahnschwellen verringern den Strömungsangriff auf die Flusssohle unmittelbar hinter dem Tosbecken. Störschwellen oder Störkörper können die Tosbeckenlänge bei optimaler Lage um bis zu 40% verringern. Neuere Entwicklungen sind Muldentosbecken, die ebenfalls eine kürzere Bauform erlauben, allerdings tiefer in den Untergrund reichen.

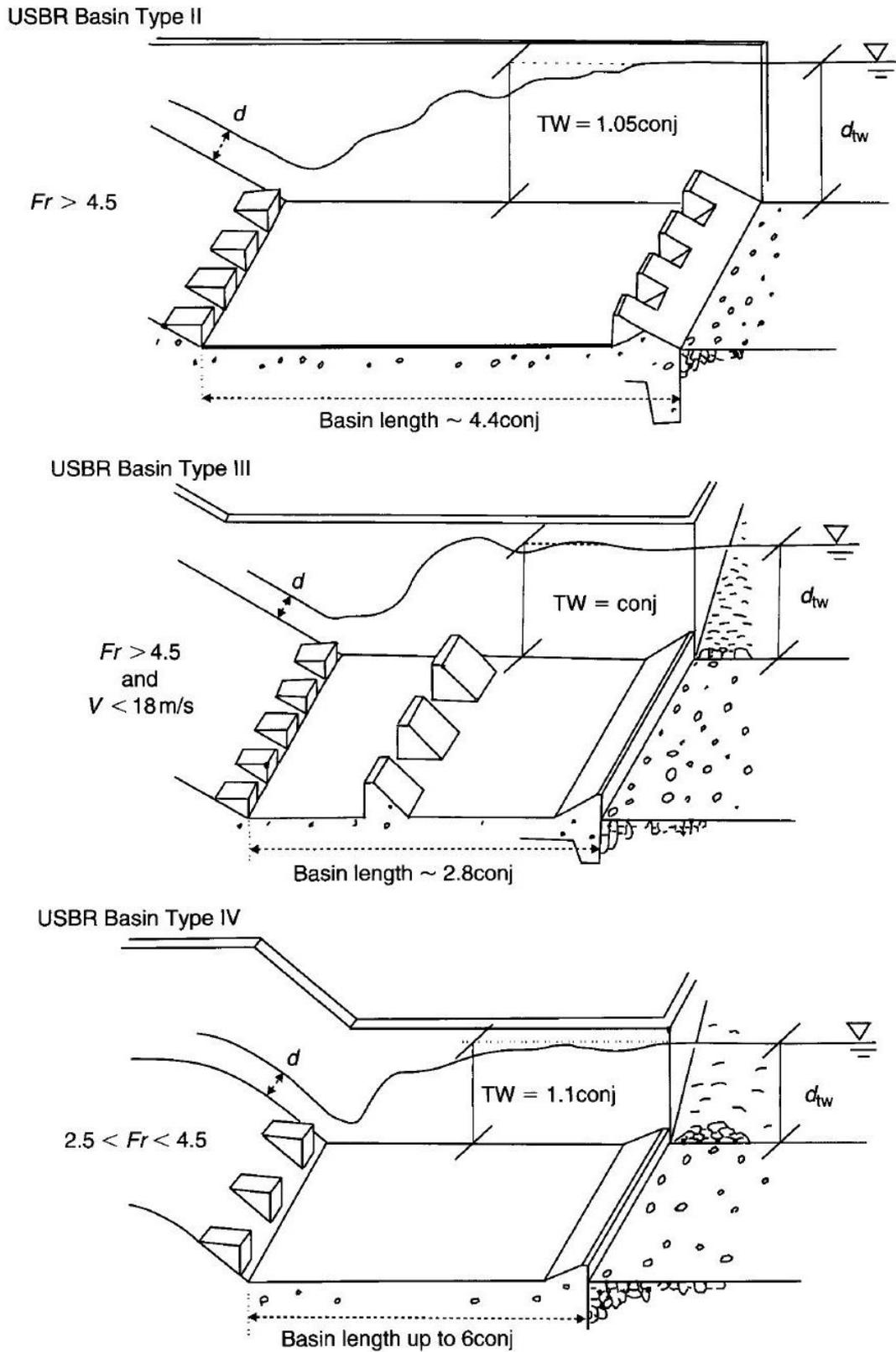


Abbildung 2.13: USBR Tosbecken-Typen mit Einbauten[4]

2.3 Kolkentstehung und damit verbundener Kolkschutz

Der im vorigen Kapitel erwähnte Kolk bezeichnet im Allgemeinen eine örtlich begrenzte Auswaschung der Sohle. Kolke entstehen überall dort, wo die Erosionswirkung und die Transportkapazität der Strömung örtlich erhöht sind. Dies geschieht durch erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten, Steigerung der Turbulenzen oder Wirbelbildungen. Diese Phänomene werden beim Überströmen einer Wehranlage gefördert und deswegen gilt es eine effektive Energieumwandlung in einem gesicherten Bereich vorzusehen, um die Sohleintiefung so gering als möglich zu halten. Somit ist die Kolkentwicklung nach einem Wehr mit der Effizienz der Energieumwandlung verknüpft. Dieser Zusammenhang wird bei der Auswertung der Versuchsergebnisse in dieser Arbeit genutzt, um die untersuchten Varianten in ihrer Wirkung zu bewerten. [16]

Die durch diese Strömungen entstehenden Sohleintiefungen können in unmittelbarer Nähe von Wasserbauten die Standsicherheit des Bauwerkes gefährden. Aus diesem Grund ist bei der Planung eines Wasserbauwerkes ein besonderes Augenmerk auf diese Erscheinungen zu legen, was die Durchführung von Modellversuchen nötig macht. Generell haben alle Störungen, besonders aber Bauwerke, eine Auswirkung auf die Gerinnesohle. „Das alluviale Sohlmaterial von Flüssen reagiert sehr empfindlich auf Ungleichförmigkeiten bzw. Inhomogenitäten in der Strömungsbelastung. Konzentrierte Strömungseinwirkungen sind dabei in der Lage, die Gerinnesohle lokal aufzureißen und begrenzte Erosionsbereiche entstehen zu lassen, welche Kolke genannt werden.“ [13]

Um die Kolkbildung zu reduzieren, bedarf es in erster Linie einer effektiven Tosbeckenform und erst im Weiteren direkten Kolkschutzmaßnahmen, wie zum Beispiel Steinsatz aus Wasserbausteinen oder Blockwurf.

2.3.1 Kolkformen

Die in dieser Arbeit untersuchten Kolkformen lassen sich den lokalen Kolken zuordnen. Sie entstehen durch Beschleunigungszonen um Einbauten oder durch das Auftreffen eines Wasserstrahls (unterhalb von Wehren, Schwellen) auf eine ungeschützte Sohle. „Im Gegensatz zu Erosionsprozessen, welche die gesamte Gerinnestrecke erfassen, sind Kolke ausschließlich lokale Erosionsformen, die als Reaktion auf Impulsunterschiede in der Strömungsrichtung entstehen“ [13] Sie sind somit auf die unmittelbare Umgebung der Störstelle beschränkt. Durch lokale Kolke kann die Standsicherheit von Bauwerken, Böschungen und Ufern beeinträchtigt werden. Deswegen ist die Beschreibung des Kolkes durch die maximale Kolktiefe und die Länge des Kolkes für die hochwassersichere Gründung eines Bauwerkes wesentlich.[2]

Auf Grund der Ausbildung von Kolken werden folgende zwei Typen unterschieden [16]:

- Lokaler Reinwasserkolk:
Dieser entsteht, wenn die Sohlschubspannung im Strom den kritischen Wert τ_0 nicht überschreitet, also kein Sedimenttransport entsteht. Der Kolk entwickelt sich langsam und erreicht einen Gleichgewichtszustand, wenn die Strömung nicht mehr in der Lage ist, Sedimente aus dem Kolk zu entfernen.
- Kolk mit beweglicher Sohle:
Während eines natürlich vorhandenen Sedimenttransportes bilden sich Kolke viel schneller aus als bei Reinwasserkolk. Der Gleichgewichtszustand wird dann erreicht, wenn die entfernte Menge gleich der, aufgrund des natürlichen Sedimenttransportes zugeführten Menge ist.

Aufgrund der unterschiedlichen Strömungsmechanismen lassen sich folgende Kategorien von Kolkformen unterscheiden, die in Abbildung 2.14 zu sehen sind [13]:

- Direkte Strahlumlenkung von schrägen bis vertikalen Fallstrahlen
- Energieabbau von Horizontalstrahlen
- Wirkung von Sekundärströmungen
 - Richtungsänderungen von Teilen des Strömungskörpers
 - Lokale Strömungsumlenkungen durch Strömungshindernisse

	Tauchstrahl		Horizontalstrahl		Richtungsänderungen		Einschnürungen	
	Rundstrahl	Bandstrahl	Einzelstrahl	Strahlvereinigung	Befestigtes Ufer	Erodierbares Ufer	Örtliche Hindernisse	Gerinneverengung
spezielle Einflußfaktoren	Zuströmung - Neigungswinkel des Strahls Abströmung - räumlich axial-symmetrisch - eben		Anströmung - Rundstrahl - Ebener Strahl - Strömungszustand (schließen - strömen)	- Winkel zwischen Gerinnesarmen - Durchflußverhältnis	- Radius - Bogenlänge - Art des Ufers	- Projektierte Anströmfläche - Form	- Einschnürungsverhältnis - Längenerstreckung	
max t_k/h Kleinwasser-Kolk-tiefen	$20 \frac{D}{h} < \text{rund}$ $40 \frac{D}{h} < \text{eben}$		$10 <$	$7 <$	$3 <$	$1.5 <$	Pfeiler $2.3 \frac{dp}{h} <$ Bühne $3.5 <$ $0.5 < E_p/B_0 < 1$	

Abbildung 2.14: Kolkformen, schematische Übersicht [13]

2.3.2 Kolkprozess

„Allgemein ist die Kolkbildung ein streng instationärer Prozess. Das bedeutet insbesondere, dass der Kolkprozess zeitlich gesehen mit unterschiedlicher Erosionsintensität in mehreren Entwicklungsstufen verläuft. Die Dauer dieser Entwicklungsstufen ist abhängig von den äußeren Randbedingungen des Strömungsfeldes.“ [2]

Es wird dabei von vier Phasen der Kolkentwicklung gesprochen, die in Abbildung 2.15 erkennbar sind [13]:

(I) *Anlaufphase*

Beginn der Eintiefung bei noch unveränderten Anströmverhältnissen.

(II) *Entwicklungsphase*

Die einsetzende Eintiefung wirkt bereits auf das Strömungsfeld zurück. Die Anpassung der Geschwindigkeitsgrößen führt zur Verstärkung der Kolkentwicklung.

(III) *Kolkermüdungs- bzw. Stabilisierungsphase*

Dieser Entwicklungsabschnitt ist in seiner zeitlichen Struktur durch einen asymptotischen, e-funktionellen Übergang bis zur stabilen Form des Klarwasserkolkes gekennzeichnet. Bei Schräg- und Vertikalstrahlen erfolgt die Ausräumung anfänglich so intensiv, dass die beiden ersten Phasenabschnitte vernachlässigbar kurz ausfallen und nur dieser dritte Teil für die Kolkentwicklung relevant wird.

(IV) *Abriebphase*

Allmählich wirksam werdende Vertiefung des Kolkes durch Kornabrieb und ein asymptotisches Wiederabklingen dieses Effektes.

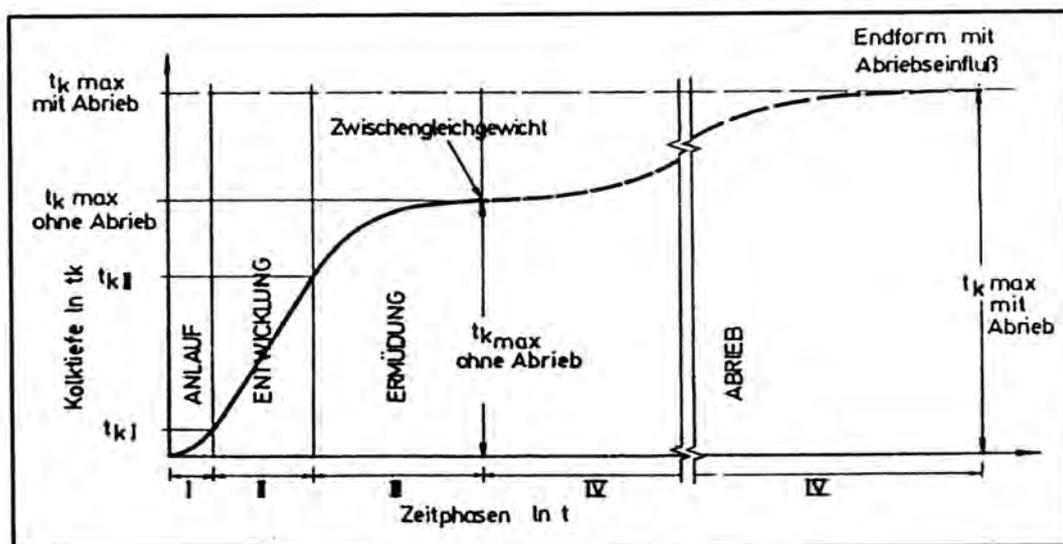


Abbildung 2.15: Kennzeichnende Phasen der Kolkentwicklung [13]

2.3.3 Kolk flussabwärts einer Stauanlage

Bei dem untersuchten festen Wehr in dieser Arbeiten spielen nur die zwei ersten in Abbildung 2.14 aufgelisteten Kolkformen eine Rolle, das heißt, die direkte Strahlumlenkung und der Energieabbau von Horizontalstrahlen. Deswegen wird die weitere Erläuterung der Kolkentwicklung auf diese Formen konzentriert. Die Abmessungen des Kolkes flussabwärts einer Stauanlage hängen von mehreren Faktoren ab. „Vor allem bestimmen der Durchfluss und seine Verteilung über das Wehr, die Fallhöhe des Wassers am Wehr, die Form des Wehrbodens und seine Höhenlage in Bezug auf die unterwasserseitige Flusssohle die Größe des Kolkes. Zusätzlich zeigt sich eine weitere Abhängigkeit von der Breite des Flussbettes im Vergleich zur Wehrbreite, vom Anschluss der Ufer an die Unterwasserseite des Wehres, von der Art der Ableitung des Wassers über das Wehr, von der Form der Pfeiler, von der Einwirkungsdauer des Durchflusses auf das Flussbett und schließlich davon, ob Geschiebe durch die Stauanlage gelangt oder nicht.“ [2]

Eine entsprechende Form des Tosbeckens und vor allem die Gestaltung am Ende des Tosbeckens können die Kolkerscheinungen reduzieren. Vermieden werden soll ein in Richtung Unterwasser abfallender Wehrboden, da dieser sehr tiefe Kolke hervorruft. Allgemein hängt die Länge eines Kolkes weitgehend von der Körnung des Geschiebes ab. Je feiner das Korn, desto größer die Kolkerscheinungen.[2]

2.3.4 Berechnung von Kolkentwicklungen

Für die Berechnung von Kolkstiefen nach einem Tosbecken kommen verschiedene Formeln zur Anwendung. Da die Kolkentstehung von zahlreichen Parametern abhängig ist, sind die Ergebnisse aus Bemessungsformeln nur als Näherung anzusehen. Im Einzelfall muss immer eine genaue Prüfung mittels Modellen durchgeführt werden. Gängige Formeln zur Abschätzung der Kolkstiefen nach einem Tosbecken wurden von *A. Schoklitsch* (1951), *O. Catakli*, *K. Özal*, *R. Tandogan* (1973) und *P. Novák* (1961) hergeleitet.[2] Da in dieser Arbeit die genaue Kolkuntersuchung nicht das Ziel ist und keine Kolkberechnung stattfindet, sei an dieser Stelle nur auf die Fachliteratur hingewiesen.[2]

2.3.5 Kolkschutz

Maßnahmen zur Kolkabwehr kommen vorwiegend bei Stauanlagen zur Anwendung. Um eine geringe Ausspülung der Flusssohle im Bereich der Anlage zu bewirken, wird dieses Verhalten der Energieumwandlung beim Entwurf berücksichtigt. Eine vollständige Verhinderung der Kolkbildung ist in der Praxis nicht möglich und auch nicht nötig.[2]

Kolkabwehr durch Schwellen Wie schon am Ende von Kapitel 2.2.3 erwähnt, erfolgt mit Hilfe von Vollschwellen oder Zahnschwellen am Ende des Wehrbodens oder des Tosbeckens eine Verminderung der Kolkentwicklung. Vollschwellen können die Form von Rechteck-, Trapez- und Keilschwellen haben. Vollschwellen lenken die Strömung am Ende des Tosbeckens etwas nach oben ab und erzielen damit ein beständigeres Strömungsbild.[2]

direkter Kolkenschutz Um die direkt vom Kolk betroffene Flusssohle zu schützen, können folgende Maßnahmen getroffen werden [16]:

- Steinschüttungen
- Kolkשמutzmatten
- Unterwasserbeton
- Nachkolkbecken mit Wasserbausteinen in Beton versetzt

3 Grundlagen und Beschreibung der Varianten

Im Folgenden werden die Überlegungen erläutert, die zur Entwicklung der im Modellversuch getesteten Varianten führten. Von der Zielsetzung über die Anlehnung an das Kraftwerk Rosenberg werden elf Variantensysteme genauer beschrieben.

3.1 Ziel der Untersuchung

Ziel dieser hydraulischen Variantenuntersuchung ist eine optimierte Form für eine feste Wehranlage zu finden, wie es bei Niederdruckanlagen üblich ist. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Energieumwandlung gelegt, um die effizienteste Kombination aus Wehrform und Tosbecken zu erhalten. Die Effizienz der Energieumwandlung wird dabei über die Kolkentwicklung und das Kolkvolumen beurteilt und von allen Varianten gegenübergestellt. Dabei werden bei jeder Variante mehrere Abflüsse untersucht, um das Verhalten unter verschiedenen Randbedingungen zu erkennen. Dies führt zu einer qualitativen Bewertung der untersuchten Varianten, ohne einen Bezug auf die tatsächlichen Naturkolke herzustellen.

Aus aktuellem Anlass (siehe Kapitel 3.2) wird das Wehr des Kraftwerks Rosenberg am Kamp für die Randbedingung des Modellversuches ausgewählt, welches ein typischer Vertreter für eine feste Wehranlage ist. Die Ergebnisse können aber auch genutzt werden, um ähnliche Wehre mit abweichenden Dimensionen zu optimieren. Die Wehranlage wird in einem 1:25 Schnittmodell abgebildet und die elf Ausführungsvarianten in diesem Maßstab hydraulisch untersucht. Die Staustufe Rosenberg wird im Folgenden kurz beschrieben.

3.2 Allgemeine Projektbeschreibung, Wehranlage Kraftwerk Rosenberg

Die Staustufe Rosenberg befindet sich am Kamp, im Waldviertel, dem nördlichen Niederösterreich. Es handelt sich dabei um ein Ausleitungskraftwerk der *EVN AG*. Die Wehrstufe wurde 1907 als 67m breites, flaches Schusswehr ausgeführt und in Betrieb genommen, wie in Abbildung 3.1 zu sehen ist.[15]

Es gibt nun die Überlegung, im Zuge einer nötigen Sanierung das Stauziel zu erhöhen. Für diese Untersuchung werden die Randbedingungen für den hydraulischen Modellversuch schon nach dem geplanten, erhöhten Stauziel gewählt. Die Flußsohle liegt auf 273,80m ü.A. und das geplante Stauziel auf 279,75m ü.A., damit ergibt sich eine Wehrhöhe von 5,95m.[15]

Das *Ingenieurbüro Tschernutter* entwickelte für den Ausbau bereits verschiedene Wehrformen, welche im Anhang A.1 zu finden sind. Diese werden teilweise für die untersuchten



Abbildung 3.1: Wehrbauwerk Kraftwerk Rosenberg, aktueller Bestand [15]

Varianten als Vorlage genommen und angepasst. Ab Kapitel 3.4 werden die gewählten Varianten für den hydraulischen Modellversuch erläutert.

3.3 Hydrologische Grundlagen

Um die Wehranlage mit angeschlossenen Tosbecken rechnerisch bemessen zu können, müssen Abflüsse und Unterwasserspiegel bekannt sein. Die Kamp-Abflüsse und Hochwasserkennwerte beziehen sich auf den Pegel Rosenberg unterhalb der Rückgabestelle des Krafthauses und sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Abflusswerte Zeitreihe 1971 – 2010 (Pegel Rosenberg) [15]

	Spezifischer Abfluss (Q_{Natur})	
HQ ₃₀₀	535,0 m ³ /s	8,0 m ³ /s m
HQ ₁₀₀	387,0 m ³ /s	5,8 m ³ /s m
HQ ₃₀	256,0 m ³ /s	3,8 m ³ /s m
HQ ₁₀	160,0 m ³ /s	2,4 m ³ /s m
HQ ₅	120,0 m ³ /s	1,8 m ³ /s m
HQ ₁	35,0 m ³ /s	0,5 m ³ /s m
MQ	8,1 m ³ /s	0,1 m ³ /s m
MJNQ _T	3,2 m ³ /s	0,0 m ³ /s m
MNQ _T	2,5 m ³ /s	0,0 m ³ /s m

Da von dieser Wehrstelle kein Pegelschlüssel vorhanden ist, wird der Unterwasserspiegel mit einer vereinfachten hydraulischen Berechnung von offenen Gerinnen berechnet. Dafür wird die weit verbreitete empirische Formel 18 nach *Manning-Strickler* benutzt.[11]

$$v = k_{Str} \cdot r_{hy}^{\frac{2}{3}} \cdot I_S^{\frac{1}{2}} \text{ [m/s]} \quad (18)$$

- v ... mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]
- k_{Str} ... Rauheitswert nach Manning-Strickler [$\text{m}^{\frac{1}{3}}/\text{s}$]
- r_{hy} ... $r_{hy} = \frac{A}{U}$ – hydraulischer Radius [m]
- I_S ... Sohlgefälle [-]
- A ... Fließquerschnittsfläche [m^2]
- U ... benetzter Umfang [m]

Kombiniert man Formel 18 mit der Kontinuitätsgleichung in Formel 19

$$Q = v \cdot A \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (19)$$

erhält man die Formel 20 zur Berechnung des Durchflusses in einem offenen Gerinne.[11]

$$Q = k_{Str} \cdot I_S^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{A^{\frac{5}{3}}}{U^{\frac{2}{3}}} \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (20)$$

Das Sohlgefälle I_S beträgt bei diesem Fluss durchschnittlich ca. 4 Promille [15] und der Rauheitswert k_{Str} wird nach den Fotos (Abbildung 3.1) zwischen 28 und 33 variiert. Die Breite des Flusses wird mit der vollen Wehrbreite von 67m angesetzt, um den niedrigsten Unterwasserspiegel zu erhalten. Als Fließquerschnitt wird vereinfacht ein Rechteck angenommen, somit ist nur mehr die Wassertiefe unbekannt. Diese kommt in Formel 20 im Fließquerschnitt A und im benetzten Umfang U vor und lässt dadurch nur ein iteratives Lösen der Gleichung 20 zu. In Tabelle 2 sind die Ergebnisse für die Normalabflusstiefen unterhalb des Wehres gegeben.

Tabelle 2: Normalabflusstiefen im Unterwasser

	Q_{Natur}	Normalabflusstiefen		
		k_{Str} 28	k_{Str} 30	k_{Str} 33
HQ ₃₀₀	535,0 m ³ /s	2,54 m	2,44 m	2,30 m
HQ ₁₀₀	387,0 m ³ /s	2,08 m	2,00 m	1,88 m
HQ ₃₀	256,0 m ³ /s	1,62 m	1,55 m	1,46 m
HQ ₁₀	160,0 m ³ /s	1,21 m	1,16 m	1,10 m
HQ ₅	120,0 m ³ /s	1,02 m	0,98 m	0,92 m
HQ ₁	35,0 m ³ /s	0,48 m	0,46 m	0,44 m
MQ	8,1 m ³ /s	0,20 m	0,19 m	0,18 m
MJNQ _T	3,2 m ³ /s	0,11 m	0,11 m	0,10 m
MNQ _T	2,5 m ³ /s	0,10 m	0,09 m	0,09 m

Da die Unterschiede in den Normalabflusstiefen zwischen den variierten Rauheitswerten k_{Str} minimal sind und weit über der Genauigkeit des hydraulischen Versuches liegen, werden in Folge nur die Normalabflusstiefen für den Rauheitswert k_{Str} von 30 herangezogen.

3.4 Variante 01A Sturzwehr mit Betontos Becken (17,10m; 1,00m Gegenschwelle)

Für die zu untersuchende Variante *01A Sturzwehr mit Betontos Becken* wird aus den übermittelten Planunterlagen vom *Ingenieurbüro Tschernutter* (2015) die erste Variante *01 A Sturzwehr mit Gegenschwelle* [15] als Vorbild genommen und rechnerisch angepasst.

Da der Unterwasserspiegel immer weit unter der Wehrkrone liegt, kann von einem vollkommenen Überfall ausgegangen werden und die Überfallhöhen über das Wehr nach *Poleni* wie in Formel 1 mit dem Überfallsbeiwert $\mu=0,5$ laut Abbildung 2.4 berechnet werden. Die Höhen für die unterschiedlichen Abflüsse sind in Tabelle 3 zu sehen.

Tabelle 3: Überfallhöhen nach Poleni für ein Sturzwehr

	Q_{Natur}	Überfallhöhe
HQ ₃₀₀	535,0 m ³ /s	3,08 m
HQ ₁₀₀	387,0 m ³ /s	2,48 m
HQ ₃₀	256,0 m ³ /s	1,88 m
HQ ₁₀	160,0 m ³ /s	1,38 m
HQ ₅	120,0 m ³ /s	1,14 m
HQ ₁	35,0 m ³ /s	0,50 m

Der Aufprallpunkt des Wurfstrahls wird mit einer Wurfparabel nach Formel 4 berechnet. Der Winkel α beträgt bei diesem Wehr 0° und die Fließgeschwindigkeiten v wird mit der Bedingung aus Gleichung 3 und der Kontinuitätsgleichung aus Formel 19 abgeschätzt. Der Höhenunterschied y entspricht der Wehrhöhe von 5,95m, da das Tosbecken laut Plan A.1 nicht eingetieft ist.

In Tabelle 4 kann man erkennen, dass die Wurfweite beim HQ₁₀₀, welches als Bemessungssituation gilt, mit dem im Plan A.1 des *Ingenieurbüros Tschernutter* (2015) angegebenen 4,60m als Aufprallbereich gut übereinstimmen.

Tabelle 4: Wurfweiten des Überfallstrahls

	Q_{Natur}	Fließgeschwindigkeit v	Wurfweite x für die Unterseite	Wurfweite x für die Oberseite
HQ ₃₀₀	535,0 m ³ /s	3,70 m/s	4,08 m	5,02 m
HQ ₁₀₀	387,0 m ³ /s	3,32 m/s	3,66 m	4,36 m
HQ ₃₀	256,0 m ³ /s	2,90 m/s	3,19 m	3,66 m
HQ ₁₀	160,0 m ³ /s	2,48 m/s	2,73 m	3,03 m
HQ ₅	120,0 m ³ /s	2,25 m/s	2,48 m	2,70 m
HQ ₁	35,0 m ³ /s	1,49 m/s	1,64 m	1,71 m

Für die Bemessung des Tosbeckens wird die Formeln 12 bis 16 nach *Khatsuria* (2005) [10] herangezogen, um die nötigen Wassertiefen zu erhalten. Die dazugehörigen Geschwindigkeiten werden mit der Kontinuitätsgleichung berechnet, die Froudzahlen nach Formel 9. Die Unterwassertiefen h_u stammen aus Tabelle 2. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Berechnete Froudzahlen und Wasserstände für das Sturzwehr

	Q_{Natur} [m ³ /s]	D [-]	L_d [m]	v_1 [m/s]	h_1 [m]	Fr_1 [-]	h_2 [m]	h_u [m]
HQ ₃₀₀	535,0	0,0309	10,00	10,90	0,73	4,07	3,86	2,44
HQ ₁₀₀	387,0	0,0161	8,40	10,38	0,56	4,44	3,24	2,00
HQ ₃₀	256,0	0,0071	6,72	9,76	0,39	4,98	2,59	1,55
HQ ₁₀	160,0	0,0028	5,21	9,09	0,26	5,67	2,01	1,16
HQ ₅	120,0	0,0016	4,46	8,71	0,21	6,13	1,72	0,98
HQ ₁	35,0	0,0001	2,29	7,24	0,07	8,61	0,89	0,46

Die berechneten Froudzahlen lassen einen stabilen Wechselsprung erwarten, nur die Wasserstände h_2 liegen über dem Unterwasserspiegel h_u . Dies würde bedeuten, dass der Wechselsprung ins Unterwasser abwandert, was es zu verhindern gilt. Nach Plan A.1 wird diesem Fall konstruktiv mit einer Gegenschwelle vorgebeugt. Die errechneten Werte sind skeptisch zu betrachten, da diewurfweite L_d laut *Khatsuria* (2005) [10] weit über den zuvor berechneten Wurfweiten nach der Wurfparabel liegen. Auch bei der Berechnung der erforderlichen Tosbeckenlängen L_T nach den Formeln in Kapitel 2.2.2, Tabelle 6 ergibt die Formel 17 nach *Khatsuria* (2005) [10] mit Abstand größere Abmessungen als die anderen Bemessungsformeln.

Tabelle 6: Berechnete Tosbeckenlänge für das Sturzwehr

	Q_{Natur} [m ³ /s]	Khatsuria [m]	Blind [m]	Smetana [m]	Tschertousow [m]	USBR [m]	Plan A.1 [m]
HQ ₃₀₀	535,0	21,59	14,08	18,78	18,70	18,53	12,50
HQ ₁₀₀	387,0	18,53	12,09	16,04	15,60	15,56	12,50
HQ ₃₀	256,0	15,19	9,91	13,06	12,34	12,45	12,50
HQ ₁₀	160,0	12,07	7,87	10,29	9,42	9,66	12,50
HQ ₅	120,0	10,47	6,83	8,87	7,97	8,27	12,50
HQ ₁	35,0	5,61	3,66	4,62	3,84	4,25	12,50

Wenn man die Bemessungssituation für HQ₁₀₀ in Tabelle 4 beachtet, kann man erkennen, dass die berechnete Tosbeckenlänge mit der im Plan A.1 des *Ingenieurbüros Tschernutter* (2015) angegebenen 12,50m gut übereinstimmt.

Aufgrund der errechneten Dimensionen werden für die Untersuchungsvariante 01A die Angaben aus dem Plan A.1 übernommen. Das heißt, dass im Modellversuch ein Sturzwehr mit einem Betontos Becken von 17,10m Länge (4,60m + 12,50m) mit einer 1,00m hohen und 1,50m langen Gegenschwelle untersucht wird. Als Kolkschutz werden bei jeder Variante 3,00m nach der befestigten Anlage Wasserbausteine der Klasse V (80-100cm) lose verlegt. Die endgültigen Maße sind in Abbildung 3.2 zu sehen oder im Anhang A.2 zu finden.

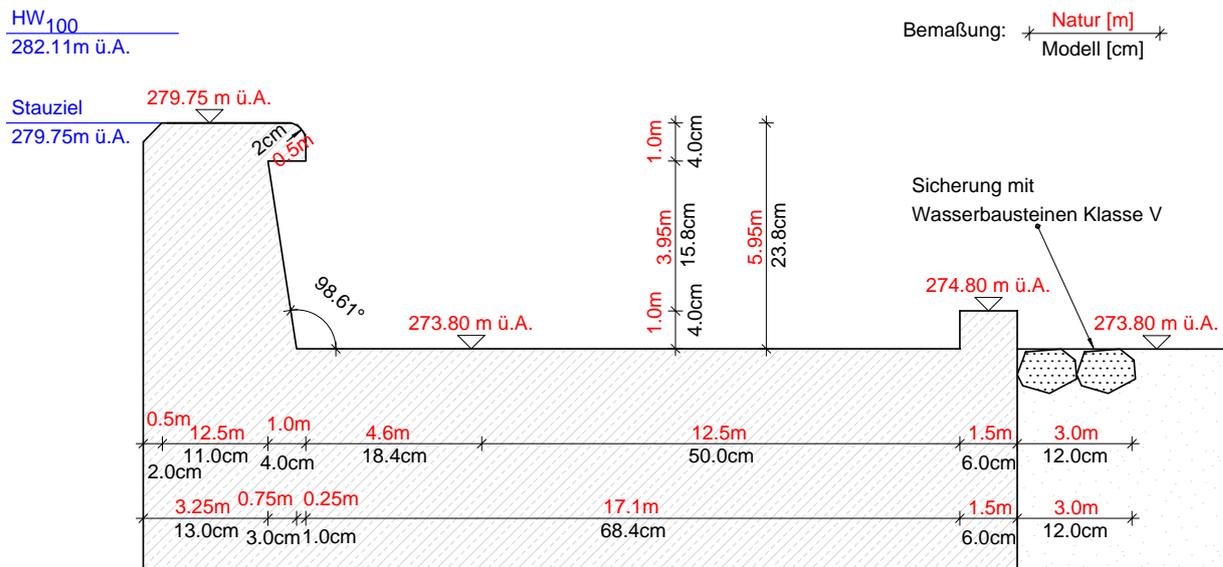


Abbildung 3.2: Abmessungen Variante 01A Sturzwehr mit Betontos Becken (17,10m; 1,00m Gegenschwelle)

3.5 Variante 01B Sturzwehr mit kurzem Betontos Becken (10,25m; 0,50m Gegenschwelle)

Für die Variante 01B wird Variante 01A angepasst, um die Erfahrungen aus dem vorhergehenden Modellversuch umzusetzen. Diese Erkenntnisse werden in Kapitel 5.0.1 beschrieben. Das Tosbecken wird in dieser Anordnung um 6,85m auf 10,25m Gesamtlänge gekürzt, damit nur noch die Zone des Strahlauflpralles befestigt ist. Die Gegenschwelle wird um die Hälfte, auf 0,5m, reduziert, um eine erneute Überfall-Wirkung zu verhindern. Die restliche Wehrform bleibt aus Variante 01A erhalten. Als Kolkschutz werden, wie bei jeder Variante, 3,00m nach der befestigten Anlage Wasserbausteine der Klasse V (80-100cm) lose verlegt. Die endgültigen Maße sind in Abbildung 3.3 zu sehen sowie im Anhang A.2 zu finden.

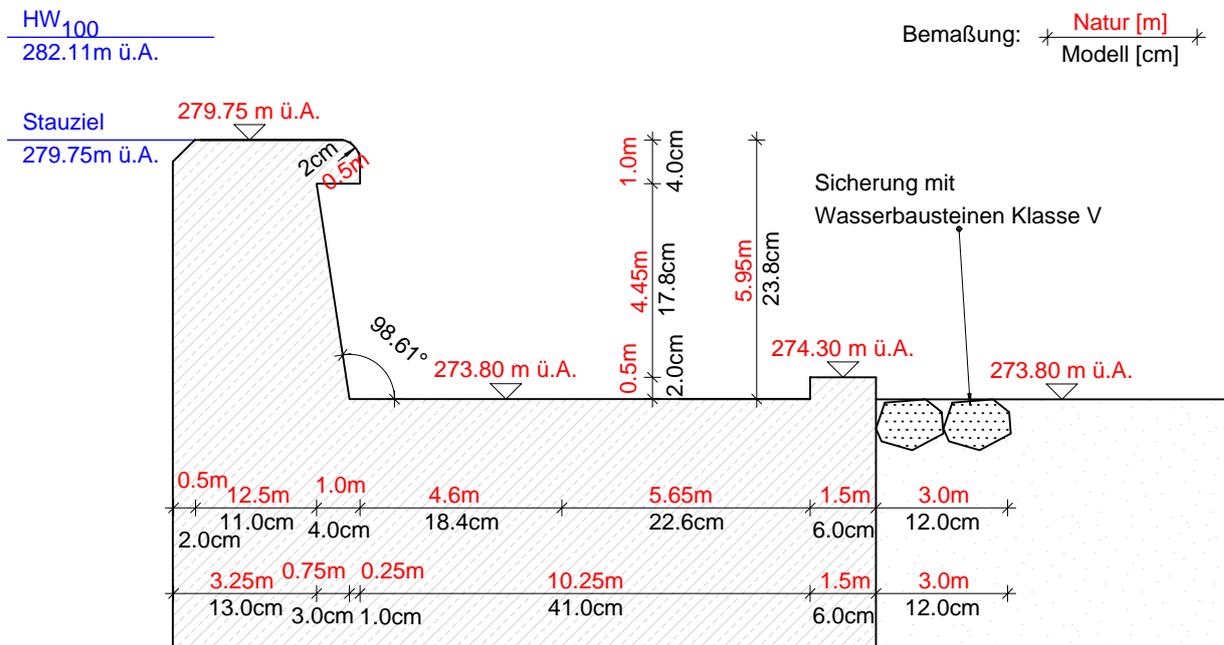


Abbildung 3.3: Abmessungen Variante 01B Sturzwehr mit Betontos Becken (10,25m; 0,50m Gegenschwelle)

3.6 Variante 01C Sturzwehr mit kurzem Betontos Becken (10,25m; 0,50m Gegenschwelle) und Mulde auf HQ₁₀₀ ausgelegt

In Variante 01C bleibt die befestigte Form wie in Variante 01B unverändert. Das heißt, dass die Abmessungen in Abbildung 3.3 erhalten bleiben. Durch Vorversuche wird nun eine Mulde aus Wasserbausteinen der Klasse V (80-100cm) lose auf einer Filterschicht in einer Muldenform verlegt. Die Muldenform wird auf die Kolkentwicklung ohne Wasserbausteine bei einem HQ₁₀₀ bemessen und die halbe Tiefe dieser Kolkmulde als Muldenbecken mit

Wasserbausteinen geformt. Das ergibt eine 20,00m lange Mulde mit einem Stich in der Mitte von 2,00m. Diese Mulde wird unmittelbar an den befestigten Wehrteil angelegt.

3.7 Variante 01D Sturzwehr mit kurzem Betontos Becken (10,25m; 0,50m Gegenschwelle) und Mulde auf HQ₃₀ ausgelegt

In Variante 01D bleibt die befestigte Form, wie in Variante 01B, unverändert. Das heißt, die Abmessungen in Abbildung 3.3 bleiben erhalten. Durch Vorversuche wird eine Mulde aus Wasserbausteinen der Klasse V (80-100cm) lose auf einer Filterschicht in einer Muldenform verlegt. Die Muldenform wird bei dieser Variante auf die Kolkentwicklung ohne Wasserbausteine bei einem HQ₃₀ bemessen und erneut wird die halbe Tiefe dieser Kolkmulde als Muldentosbecken mit Wasserbausteinen geformt. Dies ergibt eine 10,00m lange Mulde mit einem Stich von 1,30m in der Mitte. Diese Mulde wird wie bei Variante 01C unmittelbar an den befestigten Wehrteil angelegt.

3.8 Variante 02A Schusswehr mit Betontosbecken (16,50m; 1,00m Eintiefung / Gegenschwelle)

Für die zu untersuchende Variante *02A Schusswehr mit Betontosbecken* wird aus den übermittelten Planunterlagen des *Ingenieurbüros Tschernutter* (2015) die Variante *02 A Schusswehr mit Gegenschwelle* [15] als Vorbild genommen und rechnerisch angepasst. Die Ausformung der rundkronigen Wehrkrone wird vom *Ingenieurbüro Tschernutter* (2015) auf einen Abfluss des HQ₁₀₀ bemessen und für diese Untersuchung übernommen, ohne genauer auf die Anpassung der Form einzugehen.

Es kann, wie zuvor, von einem vollkommenem Überfall ausgegangen werden. Da sich nun aber die Wehrform und damit auch der Überfallsbeiwert μ ändert, müssen die Überfallhöhen über das Wehr erneut nach *Poleni*, wie in Formel 1, mit dem Überfallsbeiwert $\mu=0,75$ laut Abbildung 2.4 berechnet werden. Die Höhen für die unterschiedlichen Abflüsse sind in Tabelle 7 zu sehen.

Tabelle 7: Überfallhöhen nach Poleni für ein rundkroniges Schusswehr

	Q_{Natur}	Überfallhöhe
HQ ₃₀₀	535,0 m ³ /s	2,35 m
HQ ₁₀₀	387,0 m ³ /s	1,89 m
HQ ₃₀	256,0 m ³ /s	1,44 m
HQ ₁₀	160,0 m ³ /s	1,05 m
HQ ₅	120,0 m ³ /s	0,87 m
HQ ₁	35,0 m ³ /s	0,38 m

Für die Bemessung des Tosbeckens werden konstante Werte für die Wehrhöhe $w=5,95\text{m}$ und bekannte Tosbeckeneintiefung $\delta=1,00\text{m}$ angenommen. Die durch Überströmen auftretenden Reibungsverluste werden durch die Variable $\lambda=0,1$ berücksichtigt. Mittels Bernoulli-Gleichung, Kontinuitätsgesetz und Ergebnissen aus Tabelle 7 kann die Zulaufwassertiefe h_1 wie in Gleichung 21 ermittelt werden. Die Zulaufgeschwindigkeit v_1 am Beginn des Wechselsprunges ergibt sich aus der Kontinuitätsgleichung 19, die konjugierte Wassertiefe h_2 aus Formel 10 mit Fr_1 nach Formel 9.

$$\delta + w + h_0 + \frac{v_0^2}{2g} = h_1 + (1 + \lambda) \cdot \frac{1}{2g} \cdot \left(\frac{Q}{h_1} \right)^2 \quad (21)$$

- δ ... Tosbeckeneintiefung
- w ... Wehrhöhe
- h_0 ... Überfallhöhe aus Tabelle 7
- v_0 ... zu h_0 zugehörige Überfallsgeschwindigkeit
- g ... Erdbeschleunigung
- h_1 ... Zulaufwassertiefe vor dem Wechselsprung
- λ ... Verlustbeiwert

Unter Anwendung der oben genannten Formeln ergeben sich für die jeweiligen Durchflüsse die in Tabelle 8 zusammengefassten Ergebnisse.

Die berechneten Froudzahlen lassen einen stabilen Wechselsprung erwarten, nur die Wasserstände h_2 liegen über dem Unterwasserspiegel $h_u + \delta(1,00\text{m})$. Dies würde bedeuten, dass der Wechselsprung ins Unterwasser abwandert, was es zu verhindern gilt. Es ist aber wahrscheinlich, dass durch die Eintiefung und die Gegenschwelle der Wechselsprung trotzdem im Tosbecken gehalten wird. Deswegen wird vorerst nach Plan A.1 vorgegangen und die Eintiefung nicht angepasst.

Tabelle 8: Berechnete Froudzahlen und Wassertiefen für das Schusswehr

	Q_{Natur} [m ³ /s]	h_0 [m]	v_0 [m/s]	h_1 [m]	v_1 [m]	Fr_1 [-]	h_2 [m]	h_u [m]
HQ ₃₀₀	535,0	2,35	3,40	0,62	12,86	5,21	4,28	2,44
HQ ₁₀₀	387,0	1,89	3,05	0,46	12,57	5,92	3,62	2,00
HQ ₃₀	256,0	1,44	2,66	0,31	12,27	7,02	2,94	1,55
HQ ₁₀	160,0	1,05	2,27	0,20	11,99	8,58	2,32	1,16
HQ ₅	120,0	0,87	2,06	0,15	11,86	9,74	2,01	0,98
HQ ₁	35,0	0,38	1,37	0,05	11,47	17,17	1,08	0,46

Nun können erneut nach den Formeln aus Kapitel 2.2.2 die erforderlichen Tosbeckenlängen berechnet werden, welche in Tabelle 9 zusammengefasst sind.

Tabelle 9: Berechnete Tosbeckenlänge für das Schusswehr

	Q_{Natur} [m ³ /s]	Blind [m]	Smetana [m]	Tschertousow [m]	USBR [m]	Plan A.1 [m]
HQ ₃₀₀	535,0	16,44	21,92	20,49	25,65	16,50
HQ ₁₀₀	387,0	14,24	18,99	17,21	21,75	16,50
HQ ₃₀	256,0	11,83	15,77	13,73	18,02	16,50
HQ ₁₀	160,0	9,54	12,72	10,58	14,22	16,50
HQ ₅	120,0	8,35	11,13	9,01	12,30	16,50
HQ ₁	35,0	4,67	6,22	4,47	6,64	16,50

Wenn man wieder die Bemessungssituation für HQ₁₀₀ in Tabelle 4 betrachtet, kann man erkennen, dass die berechnete Tosbeckenlänge mit der im Plan A.1 des *Ingenieurbüros Tschernutter* (2015) angegebenen 16,50m im Mittel gut übereinstimmt.

Aufgrund der errechneten Dimensionen werden für die Untersuchungsvariante 02A die Angaben aus Plan A.1 übernommen. Das heißt, ein Schusswehr mit einem Betontosbecken von 16,50m mit einer 1,00m Eintiefung und 1,50m langen Gegenschwelle im Modellversuch wird untersucht. Der einzige Unterschied zu Plan A.1 ist, dass der Anschluss von Wehr und Tosbecken ausgerundet (2,5m Radius) ausgeführt wird, wie in der Fachliteratur empfohlen [1]. Als Kolkschutz werden, wie bei jeder Variante, 3,00m nach der befestigten Anlage Wasserbausteine der Klasse V (80-100cm) lose verlegt. Die endgültigen Maße sind in Abbildung 3.4 zu sehen sowie im Anhang A.2 zu finden.

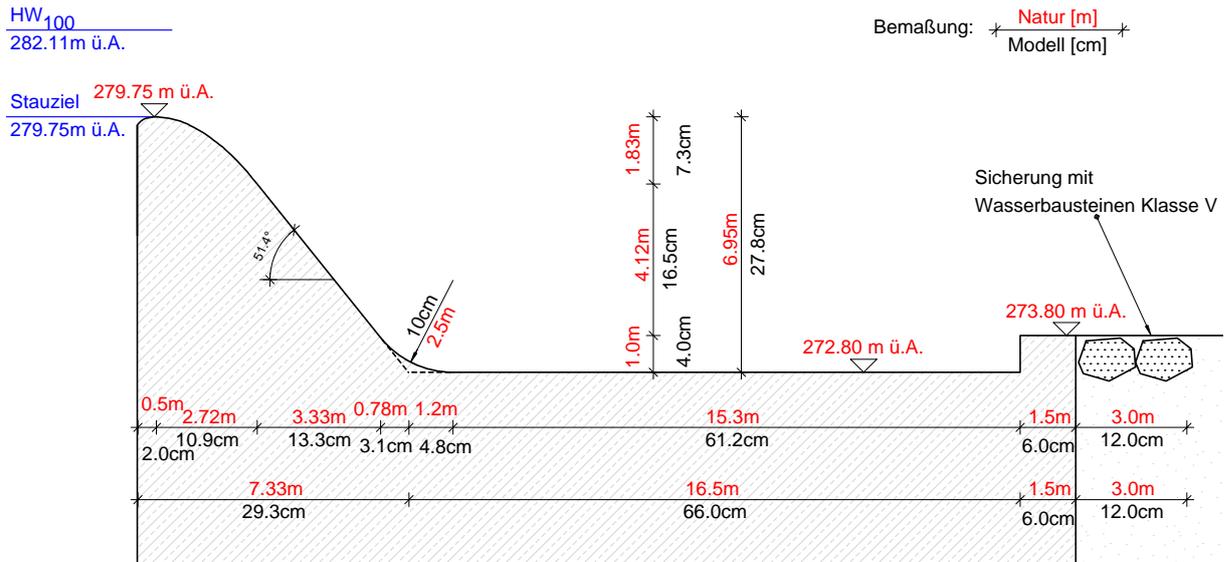


Abbildung 3.4: Abmessungen Variante 02A Schusswehr mit Betontosbecken (16,50m; 1,00m Eintiefung/Gegenschwelle)

3.9 Variante 02B Schusswehr mit kurzem Betontosbecken (12,50m; 1,00m Eintiefung / Gegenschwelle)

Für Variante 02B wird Variante 02A angepasst, um die Erfahrungen aus dem vorhergehenden Modellversuch umzusetzen. Diese Erkenntnisse werden in Kapitel 5.0.6 beschrieben. Das Tosbecken wird in dieser Anordnung um 4,00m auf 12,50m Gesamtlänge gekürzt, der Größe des tatsächlichen Wechselsprungs aus dem Versuch mit Variante 02A. Die Eintiefung und die restliche Wehrform bleibt aus Variante 02A erhalten. Als Kolkschutz werden, wie bei jeder Variante, 3,00m nach der befestigten Anlage Wasserbausteine der Klasse V (80-100cm) lose verlegt. Die endgültigen Maße sind in Abbildung 3.5 zu sehen sowie im Anhang A.2 zu finden.

3.10 Variante 02C Schusswehr mit Betonauslauf (2,50m, 1,00m Eintiefung) und Mulde auf HQ₃₀ ausgelegt

In Variante 02C wird das Betontosbecken aus den vorigen Varianten durch eine Mulde aus Wasserbausteinen ersetzt. Dazu wird das Betontosbecken 2,50m nach der Ausrundung abgeschnitten. Die Strahlumlenkungen findet somit noch auf Beton statt. Durch Vorversuche wird nun eine Mulde aus Wasserbausteinen der Klasse V (80-100cm) lose auf einer Filterschicht in einer Muldenform verlegt. Die Muldenform wird auf die Kolkentwicklung ohne Wasserbausteine bei einem HQ₃₀ bemessen. Das ergibt eine 14m lange Mulde, die langsam auf Flusssohlniveau einbindet. Die Eintiefung und die Wehrform bleiben unverändert wie bei Variante 02A. Die Maße sind in Abbildung 3.6 zu sehen sowie im Anhang A.2 zu finden.

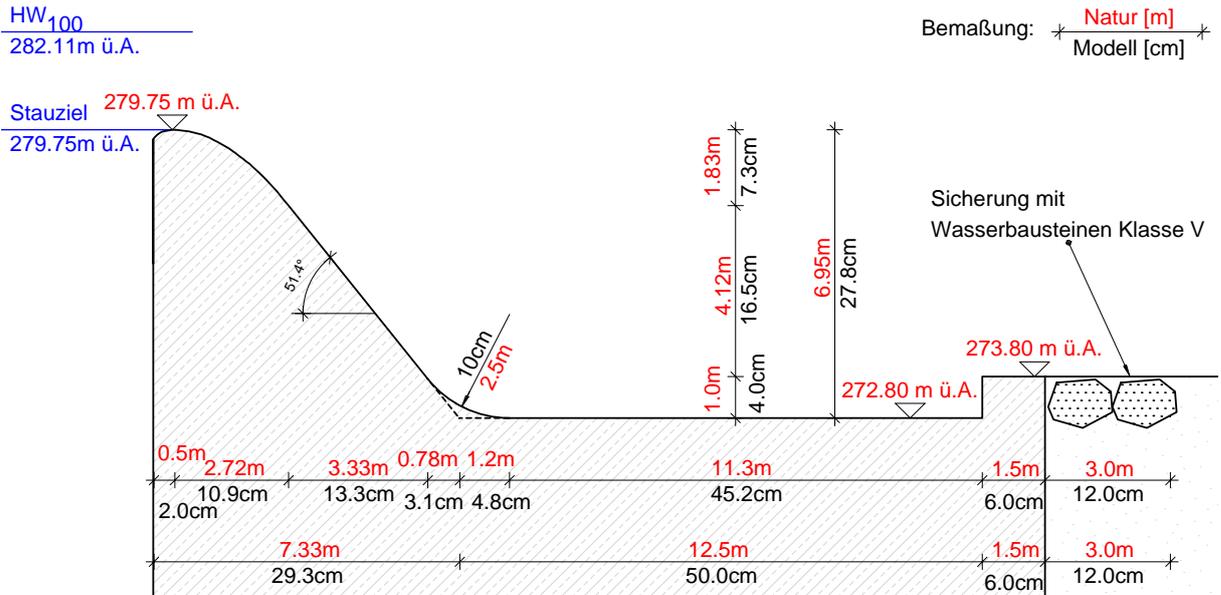


Abbildung 3.5: Abmessungen Variante 02B Schusswehr mit kurzem Betontos Becken (12,50m; 1,00m Eintiefung/Gegenschwelle)

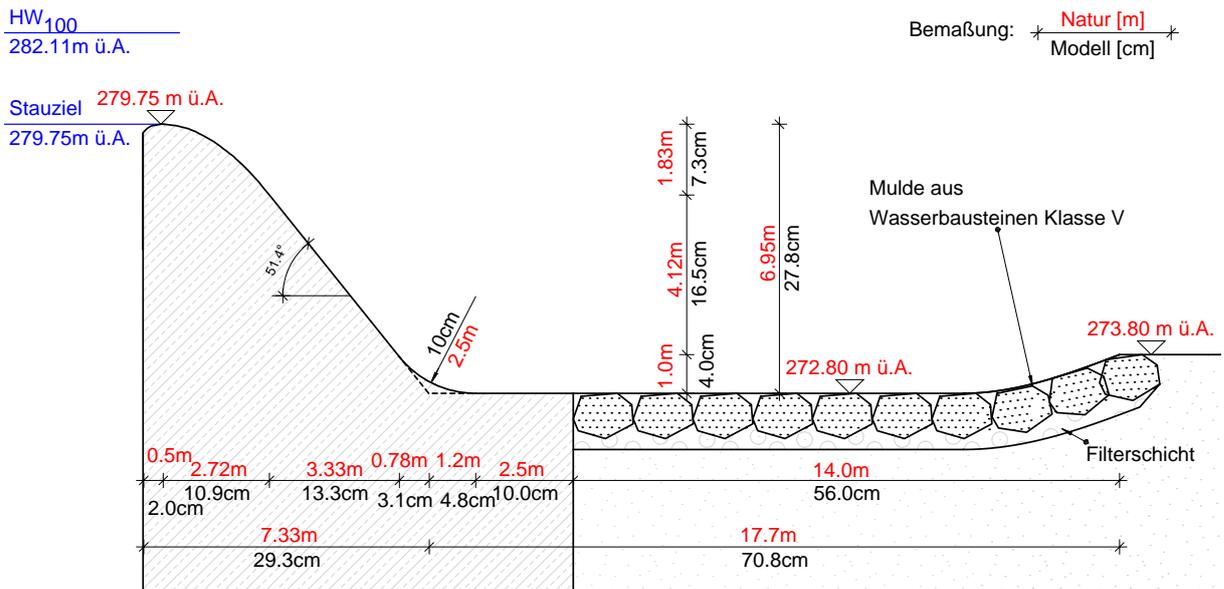


Abbildung 3.6: Abmessungen Variante 02C Schusswehr mit Betonauslauf (2,50m, 1,00m Eintiefung) und Mulde auf HQ₃₀ ausgelegt

3.11 Variante 03A Stufenwehr mit 1,00m Stufen und tiefem Tosbecken (10,25m Gesamtlänge Tosbecken, 2,05m Eintiefung/Gegenschwelle)

Mit der zu untersuchenden Variante 03A Stufenwehr mit 1,00m Stufen und tiefem Tosbecken wird zu den übermittelten Planunterlagen des Ingenieurbüros Tschernutter (2015)

eine Alternative entwickelt. Der Grundgedanke ist, dass ein Teil der Energieumwandlung schon auf dem Wehrrücken stattfindet, wie auch in Kapitel 2.1.2 erläutert wird. Des Weiteren kann eine günstige Herstellung angenommen werden, da es sich um rechtwinklige Elemente handelt und keine aufwendigen Rundungen. Als weiteren Pluspunkt kann man das optische Erscheinungsbild bei geringen Abflüssen aufführen. Die Ausbildung vieler kleiner Wasserfälle, ist optisch ansprechender, dies ist aber natürlich von der subjektiven Wahrnehmung abhängig.

Für den ersten Entwurf des Stufenwehres wird eine Stufenhöhe und -breite von 1,00m gewählt, da der Schussstrahl in Tabelle 8 die Wassertiefe von 0,70m nie überschreitet und damit eine effiziente Energieumwandlung auf den Stufen zu erwarten ist. Die Stufen sind in 45° entlang der Konturen des Schusswehres angeordnet und enden in einem kurzen Tosbecken bei 2,05m Eintiefung. Das Tosbecken besitzt zwei Gegenschwellen, jeweils 1,00m hoch, um wieder auf das Niveau der Flusssohle zu gelangen. Danach folgt ein mit Beton befestigter Bereich von 4,00m. Diese Dimensionierung erweist sich in Vorversuchen als vielversprechend. Als Kolkschutz werden, wie bei jeder Variante, 3,00m weit nach der befestigten Anlage Wasserbausteine der Klasse V (80-100cm) lose verlegt. Die endgültigen Abmessungen sind in Abbildung 3.7 zu sehen sowie im Anhang A.2 zu finden.

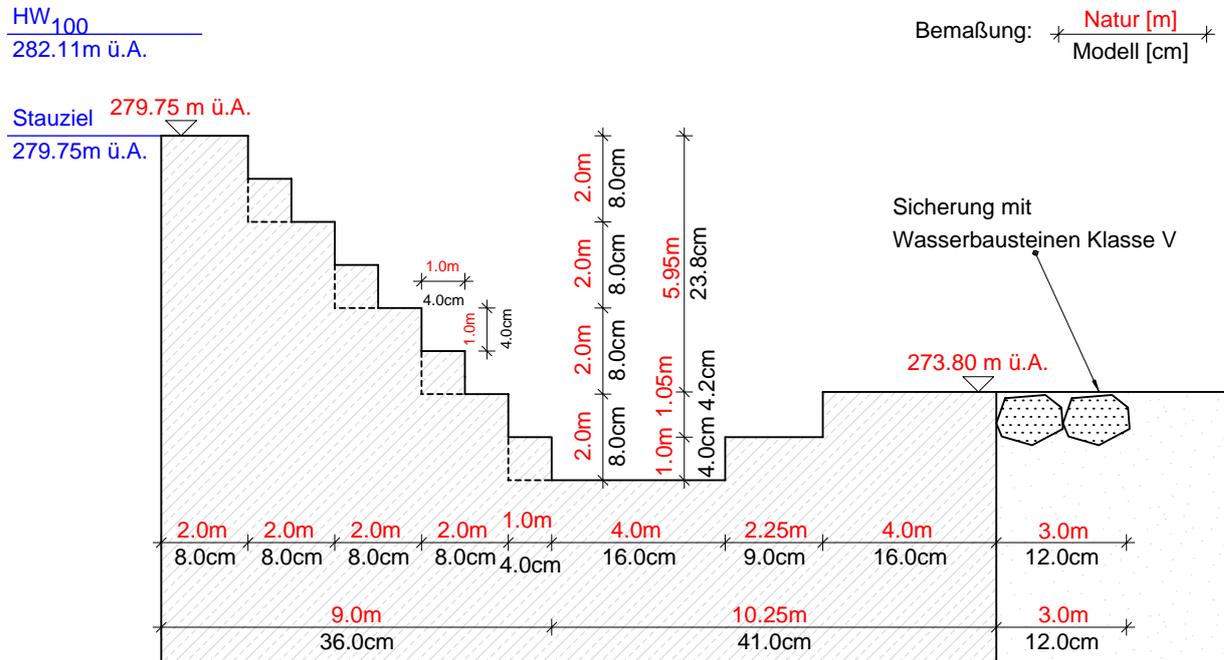


Abbildung 3.7: Abmessungen Variante 03A Stufenwehr mit 1,00m Stufen und tiefem Tosbecken (10,25m Gesamtlänge Tosbecken, 2,05m Eintiefung/Gegenschwelle)

3.12 Variante 03B Stufenwehr mit 2,00m Stufen und tiefem Tosbecken (10,25m Gesamtlänge Tosbecken, 2,05m Eintiefung/Gegenschwelle)

Für Variante 03B wird Variante 02B angepasst. Die Stufengrößen werden auf 2,00m verdoppelt, um eher eine bessere Kaskaden-Wirkung zu erzielen und damit mehr Energieumwandlung auf den Wehrrücken zu verlagern. Die restlichen Abmessungen bleiben gleich wie bei Variante 03A. Die größeren Stufen sind in Abbildung 3.7 mit strichlierten Linien eingezeichnet. Als Kolkschutz werden, wie bei jeder Variante, 3,00m weit nach der befestigten Anlage Wasserbausteine der Klasse V (80-100cm) lose verlegt.

3.13 Variante 03C Stufenwehr mit 2,00m Stufen und „Herstellungsmulde“ aus Wasserbausteinen (25° geneigt, ungefähr Baugrube ausgelegt)

Die Überlegungen zu dieser Variante fußen in der günstigen Herstellung des Wehres mit möglichst wenig Betonmasse. Dabei wird ein standsicherer Boden in einer Tiefe von 4,00-6,00m unterhalb der Flusssohle angenommen. Es müsste eine Baugrube bis in diese Tiefe freigelegt werden. Das Wehr würde dann als Stufenwehr bis zum standsicheren Boden fortgeführt werden, was zwei zusätzliche Stufen ergeben würde. Das Tosbecken wird dabei durch eine Mulde aus Wasserbausteinen der Klasse V (80-100cm), lose auf einer Filterschicht verlegt, ersetzt. Diese Mulde würde der Baugrube entsprechen, also ungefähr vom Wehrfuß in 25° ansteigend bis zur Flusssohle verlaufen. Die Wehrform bleibt unverändert mit 2,00m Stufen, wie bei Variante 02A. Die Maße sind in Abbildung 3.8 zu sehen sowie im Anhang A.2 zu finden.

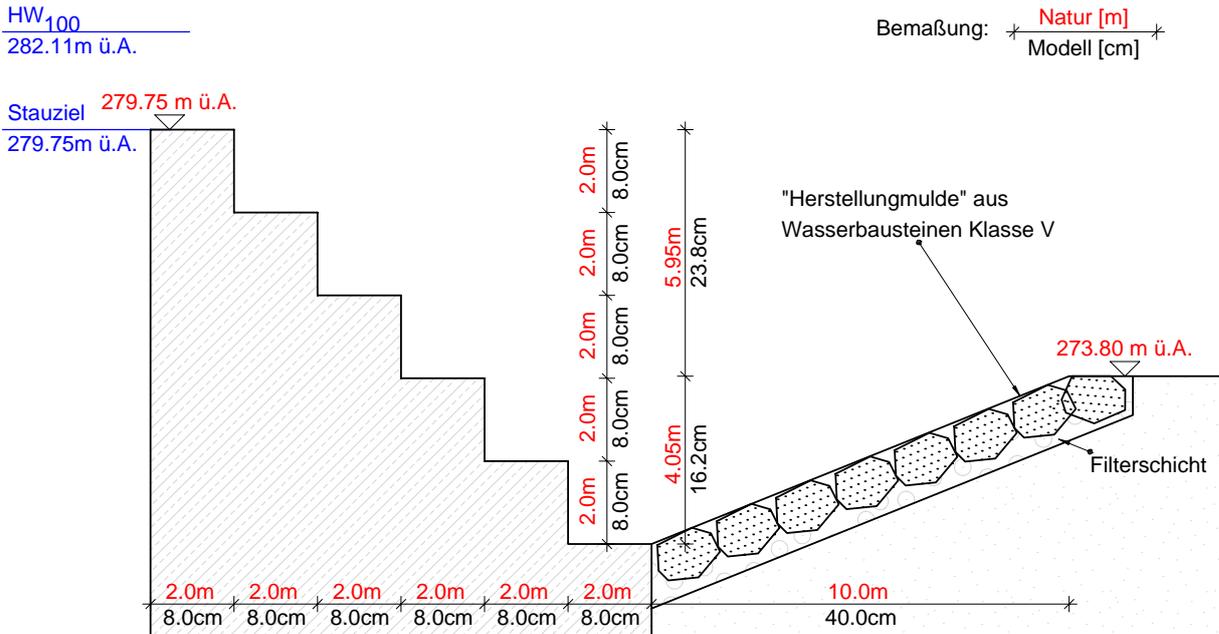
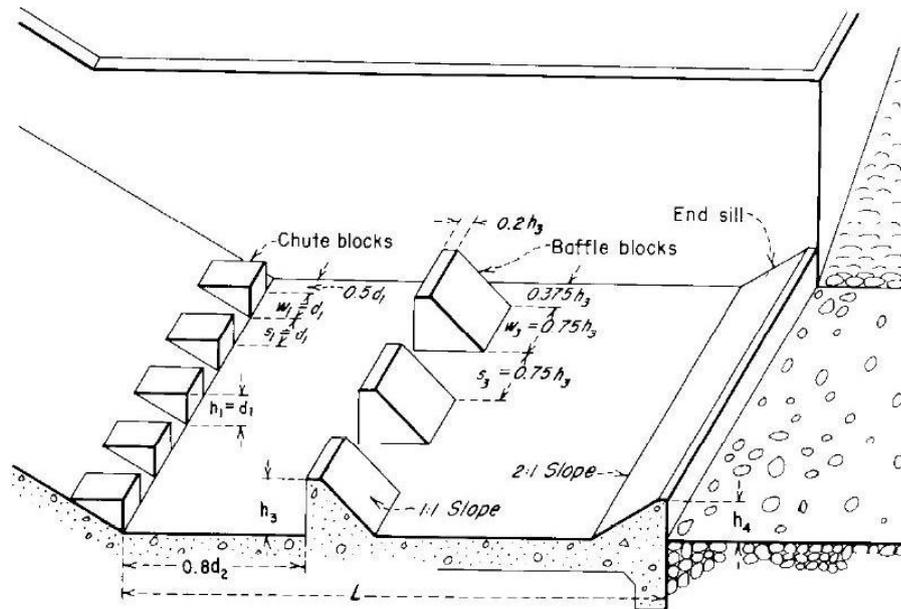


Abbildung 3.8: Abmessungen Variante 03C Stufenwehr mit 2,00m Stufen und „Herstellungsmulde“ aus Wasserbausteinen (25° geneigt, ungefähr Baugrube ausgelegt)

3.14 Variante 04A Schusswehr mit Störkörpertosbecken (7,50m Gesamtlänge Tosbecken, Strahlaufreißer 0,50m hoch, Störkörper 1,00m hoch)

Für die zu untersuchende Variante 04A Schusswehr mit Störkörpertosbecken wird aus den übermittelten Planunterlagen des Ingenieurbüros Tschernutter (2015) die Variante 04 Schusswehr mit Störkörpertosbecken [15] als Vorbild genommen und angepasst. Die Ausformung der rundkronigen Wehrkrone und die Form des Wehres sind gleich den Varianten 02. Die Eintiefung des Tosbeckens wird ebenfalls mit 1,00m aus den vorherigen Schusswehrvarianten übernommen.

Die Einbauten für das Tosbecken werden nach dem Tosbecken Typ 3 von USBR [3] bemessen, welches ab einer Froudzahl von 4,5 und einer Eintrittsgeschwindigkeit kleiner als 18m/s zum Einsatz kommen kann. Diese Bedingungen sind nach den vorhergehenden Berechnungen in Tabelle 8 erfüllt. Abbildung 3.9 zeigt die Bemessungsdiagramme, nach denen die Einbauten für diese Variante gewählt werden. Es ergeben sich somit beim Übergang vom Wehrrücken zum Tosbecken Strahlaufreißer mit einer Höhe von 0,50m und einer Breite von 0,75m. Der Abstand der Strahlaufreißer beträgt ebenfalls 0,75m. 2,25m danach wird eine Reihe von dreieckigen Störkörpern mit einer Höhe von 1,00m und einer Breite und Abstand von ebenfalls 0,75m platziert. Diese werden in die Lücken zwischen die Strahlaufreißer angebracht. Nach weiteren 2,75m begann die mit 45° geneigte Endschwelle, um wieder auf das Niveau der Flusssohle zu kommen. Als Kolkschutz werden, wie bei jeder



(A) TYPE III BASIN DIMENSIONS

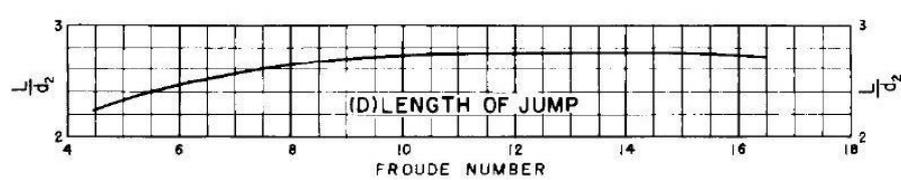
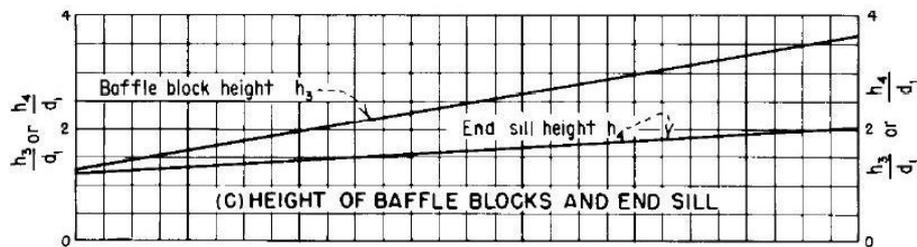
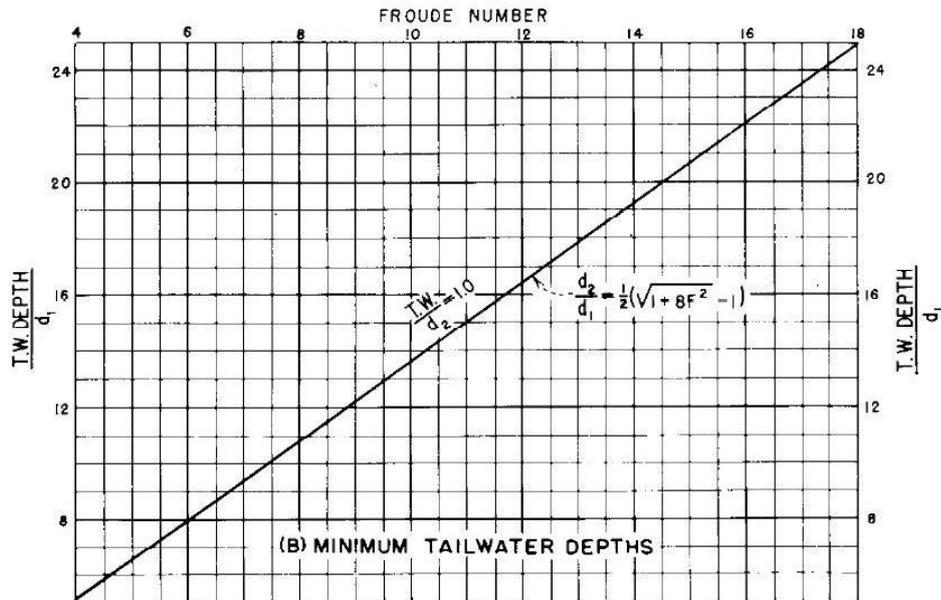


Abbildung 3.9: Bemessungsdiagramme für ein Tosbecken Typ 3 [3]

Variante, 3,00m nach der befestigten Anlage Wasserbausteine der Klasse V (80-100cm) lose verlegt. Die endgültigen Abmessungen sind in Abbildung 3.10 zu sehen sowie im Anhang A.2 zu finden.

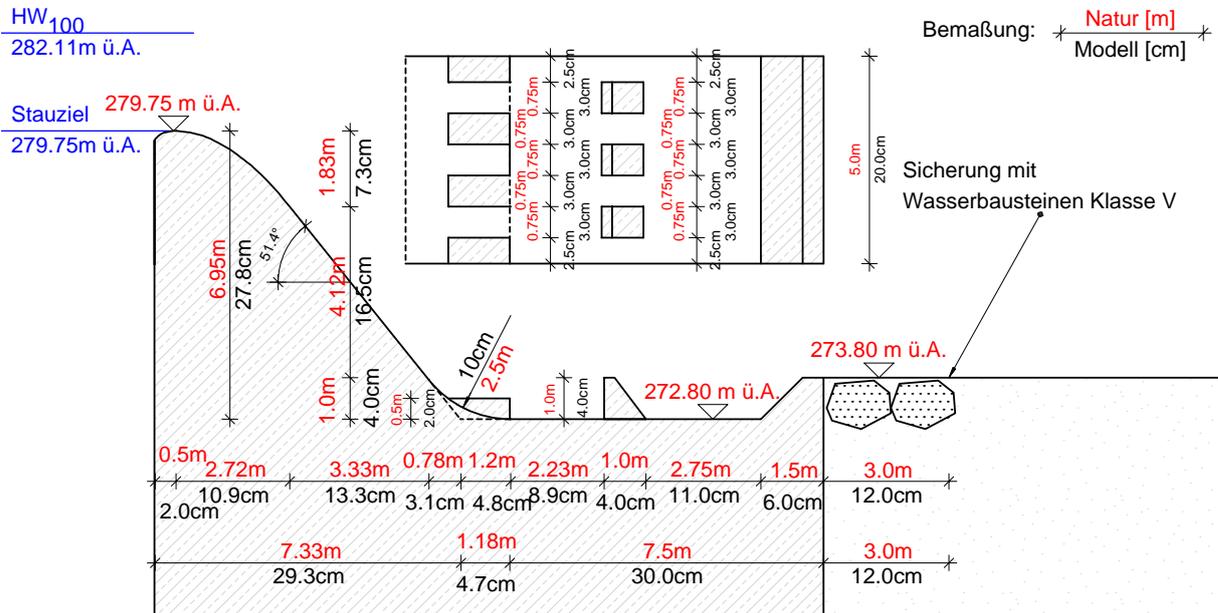


Abbildung 3.10: Abmessungen Variante 04A Schusswehr mit Störkörperbecken (7,50m Gesamtlänge Tosbecken, Strahlaufrößer 0,50m hoch, Störkörper 1,00m hoch)

4 Modellversuche

Die vorliegende Arbeit beinhaltet die Ergebnisse und Beobachtungen bei der Durchführung der Modellversuche an einem 1:25 Schnittmodell durch Wehr und Tosbecken des geplanten Kraftwerksausbau Rosenberg (Planungsunterlagen *Ingeniuerbüros Tschernutter* [15]). Die Versuche wurden im Wasserbaulabor des Institutes für Wasserbau und Ingenieurhydrologie der TU Wien im Zeitraum November 2015 bis Jänner 2016 durchgeführt. Das Modell wurde als ein Schnittmodell konzipiert, das heißt, das Wehr wurde nur als Ausschnitt nachgebaut. Um die unterschiedlichen Kolkbildungen bei verschiedenen Wehr- und Tosbeckenformen zu untersuchen, änderten sich die Geometrien dieser Bestandteile von Versuch zu Versuch.

4.1 Modellaufbau

Für die Versuche wurde eine eigene Rinne mit einer Breite von 20cm, einer Höhe von 70cm im Oberwasserbereich und 50cm im Unterwasserbereich und einer Länge von 8,90m angefertigt. Die Rinne wurde aus Schaltafeln mit einem 4,00m langem Sichtfenster aus Plexiglas gebaut. Die Rinne bestand im Wesentlichen aus einem fixen Oberwasserbehälter mit Zulauf, dem Sichtbereich mit den verschiedenen Modelleinbauten, dem Unterwasserbereich mit beweglicher Flusssohle zur Kolkausbildung und danach einem Sandfang der durch eine veränderliche Klappe vom Unterwasserbehälter getrennt war. Eine Skizze des Aufbaues ist in Abbildung 4.1 sowie im Anhang A.3 ersichtlich.

Die Wasserversorgung erfolgte mit einer Pumpe, welche das Wasser in einem eigenen Kreislaufbetrieb vom Unterwasserbehälter zum Oberwasserbehälter pumpte. Die Pumpe konnte maximal 13,00l/s fördern. Die jeweils erforderliche Zuflussmenge konnte mit einem Schieber eingestellt und die Durchflussmenge an einem magnetisch induktiven Durchflussmesser abgelesen werden.

Die Unterwassertiefe wurde mit einer manuell bedienbaren Klappe anhand einer aufgeklebten Wasserstands-Sakla auf die errechneten Werte laut Tabelle 12 eingestellt. In Vorversuchen wurde das Material für das Nachbilden der Flusssohle ermittelt. Da es bei dieser Untersuchung nicht um quantitative Kolkermittlung ging, sondern um qualitative Bewertung, wurde ein Modellsand der Körnung 0-2mm gewählt, welcher anschauliche Kolkformen lieferte. Die Sieblienen zweier Sand-Proben des verwendeten Materials sind in Abbildung 4.2 zu sehen. Das eingebaute Material wurde im Modell an die planmäßigen Koten angepasst. Nach jedem Versuch wurde der Sand erneut in die Ausgangsform gebracht.

Für das Erfassen der Kolkformen wurde ein Raster auf den Sichtbereich aufgebracht,

Rinnenbreite: 20cm, max. Durchfluss: 13l/s

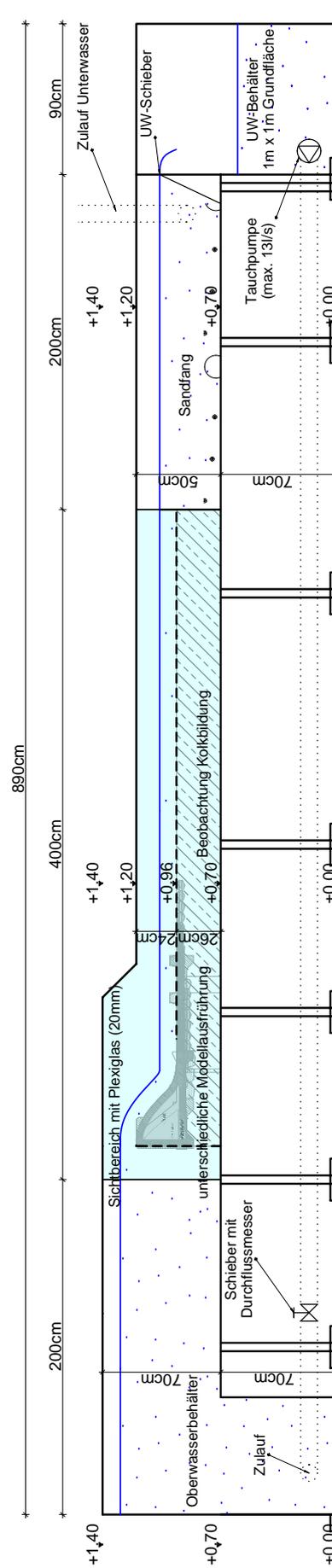


Abbildung 4.1: Skizze Modellaufbau

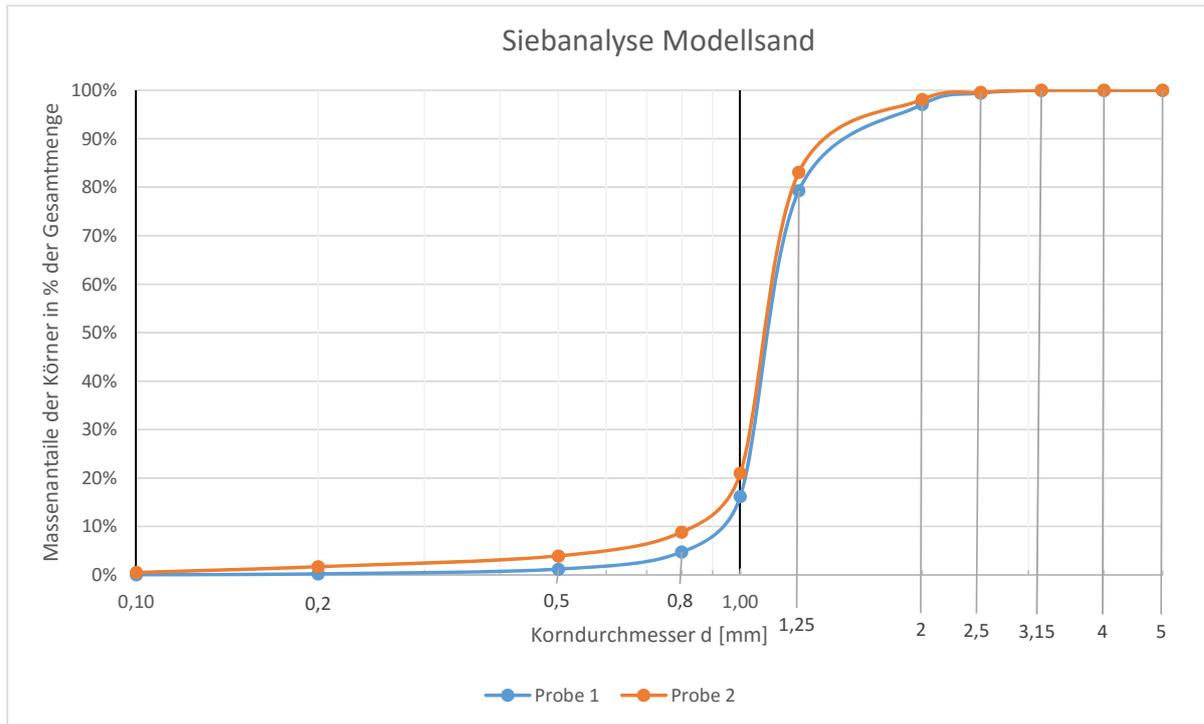


Abbildung 4.2: Sieblinien des verwendeten Donausandes

anhand dessen mittels Fotos und digitaler Messung die Kolkformen erhoben und digitalisiert wurden.

4.2 Modellgesetz

Das Modell der Wehranlage Rosenberg wurde im Maßstab 1:25 aufgebaut, wobei die Umrechnung der Naturparameter in die Modellparameter nach dem Froude'schen Modellgesetz erfolgte, welches speziell Trägheits- und Schwerkraftseinflüsse berücksichtigt und für Wehranlagen, offene Kanäle, etc. angewendet wird. In Tabelle 10 und Tabelle 11 sind die verschiedenen Übertragungsverhältnisse aufgelistet.[7]

Tabelle 10: Froud'sche Modellgesetz, Umrechnungsfaktoren

Größen	Modellmaßstab nach Froude
Geometrischer Maßstab	$\lambda=0,04$
Beschleunigung	λ^0
Druck	λ
Geschwindigkeit	$\lambda^{\frac{1}{2}}$
Durchfluss	$\lambda^{\frac{5}{2}}$
Zeit	$\lambda^{\frac{1}{2}}$

Tabelle 11: Übertragungsverhältnisse

Maßstabsverhältnisse		1:	25
Länge, Breite, Höhe	m	1:	25
Fläche	m^2	1:	625
Volumen	m^3	1:	15.625
Zeit	s	1:	5
Geschwindigkeit	m/s	1:	5
Beschleunigung	m/s^2	1:	1
Abfluss	m^3/s	1:	3125
Dichte	kg/m^3	1:	1

Aus dem Umrechnungsverhältnissen aus Tabelle 11 ergeben sich folgende Modelldurchflüsse und Wasserstände im Modell 1:25 in Tabelle 12.

Tabelle 12: Modelldurchflüsse und Wassertiefen

	Abfluss			Unterwasser		Überfallhöhe Sturzwehr		Überfallhöhe Schusswehr	
	Natur	Modell	Modell	Natur	Modell	Natur	Modell	Natur	Modell
	$[m^3/s]$	$[l/s]$	$[l/s.20cm]$	$[m]$	$[cm]$	$[m]$	$[cm]$	$[m]$	$[cm]$
HQ ₃₀₀	535,0	171,2	12,78	2,44	9,74	3,08	12,32	2,35	9,41
HQ ₁₀₀	387,0	123,8	9,24	2,00	7,98	2,48	9,93	1,89	7,58
HQ ₃₀	256,0	81,9	6,11	1,55	6,20	1,88	7,54	1,44	5,75
HQ ₁₀	160,0	51,2	3,82	1,16	4,66	1,38	5,51	1,05	4,21
HQ ₅	120,0	38,4	2,87	0,98	3,91	1,14	4,55	0,87	3,47
HQ ₁	35,0	11,2	0,84	0,46	1,86	0,50	2,00	0,38	1,53

4.3 Versuchsdurchführung

Um das in Kapitel 3.1 formulierte Ziel zu erreichen, wurde folgendes Untersuchungsprogramm durchgeführt.

Bei jeder Variante wurden hintereinander vier Abflussgrößen untersucht, welche zeitlich definiert wurden:

- HQ₁₀: 60 Minuten Versuchsdauer
- HQ₃₀: 60 Minuten Versuchsdauer
- HQ₁₀₀: 120 Minuten Versuchsdauer
- HQ₃₀₀: 120 Minuten Versuchsdauer

Jeder Abfluss wurde einzeln betrachtet, es gab somit keinen aufeinanderfolgenden Zyklus. Nach jedem Versuch wurde der Sand erneut in die Ausgangsform gebracht. Die definierte Versuchsdauer für die einzelnen Abflüsse stellte sich in Vorversuchen heraus, da sich bei diesen Zeitspannen annähernd Endkolkzustände einstellten. In besonderen Versuchsfällen ohne Kolkbewegungen wurde die Versuchsdauer verkürzt, ohne das Ergebnis zu beeinflussen.

Die unterschiedlichen Abflusszustände im Modellversuch wurden zur Dokumentation alle 15 Minuten fotografisch und durch Videoaufzeichnungen festgehalten, die eine einfache visuelle Beurteilung erlauben. Aus Platzgründen wurde das Modell mit Fließrichtung von Rechts nach Links fotografiert, entgegen der üblichen Darstellungskonvention. Durch einen aufgeklebten Raster (1,00m Natur/4,00cm Modell) konnten die fotografisch erfassten Kolkprofile digitalisiert und weiter ausgewertet und verglichen werden. Um die Ergebnisse überschaubar zu halten, waren für den Vergleich der Varianten nur die Endkolkprofile relevant. Deswegen werden im Weiteren auch nur die Endkolkprofile und -tiefen dargestellt. Bei der Berechnung der Kolkflächen und -massen wurde zwischen den gemessenen Rasterpunkten mittels Trapezen interpoliert. Mulden, die Teil des Modells sind, wurden dabei herausgerechnet und spielen bei den Flächen und Massen keine Rolle.

5 Versuchsergebnisse (Varianten)

Im Folgenden werden die Beobachtungen und Ergebnisse der Modellversuche chronologisch beschrieben.

5.0.1 Variante 01A Sturzwehr mit Betontos Becken

Bei Variante 01A nach Abbildung 3.2 sowie Anhang A.2 stellte sich schnell heraus, dass die 1,00m hohe Gegenschwelle mehr zur Verstärkung der Kolkbildung beitrug, als diese zu verhindern. Es bildete sich bei jedem Abfluss ein unvollkommener Überfall über die Gegenschwelle, wodurch es danach zu einer kurzen, tiefen Kolkmulde kam, die sogar die Wasserbausteine verlagerte.

Des Weiteren bildete sich bei den Abflüssen von HQ_{10} und HQ_{30} keine ausgeprägte Walze mit Energieumwandlung, sondern ein Rückstau durch die Gegenschwelle. Dieses Verhalten ist auch in Abbildung 5.3 durch den erhöhten Wasserspiegel im Tosbecken im Vergleich zum Unterwasser zu sehen. Bei HQ_{10} wurde eine Kolkentiefe von 2,05m erreicht, bei HQ_{30} durch die Wasserbausteinbewegungen sogar eine Tiefe von 3,30m laut Abbildung 5.2.

Bei einem HQ_{100} und HQ_{300} bildete sich eine Deckwalze, welche durch die Gegenschwelle im Tosbecken gehalten wurde. Es kam dennoch zu einem zweiten Überfall über die Gegenschwelle. Dies endete in beiden Fällen in einer maximalen Kolkentiefe von 2,75m, wie in Abbildung 5.1 zu sehen ist.

Die Endkolkprofile sind in Abbildung 5.3 und 5.4 ersichtlich. Abbildung 5.2 zeigt die maximalen Kolkiefen und die bewegten Kolkflächen beziehungsweise die Kolkmassen pro Wehrbreiten-Meter.

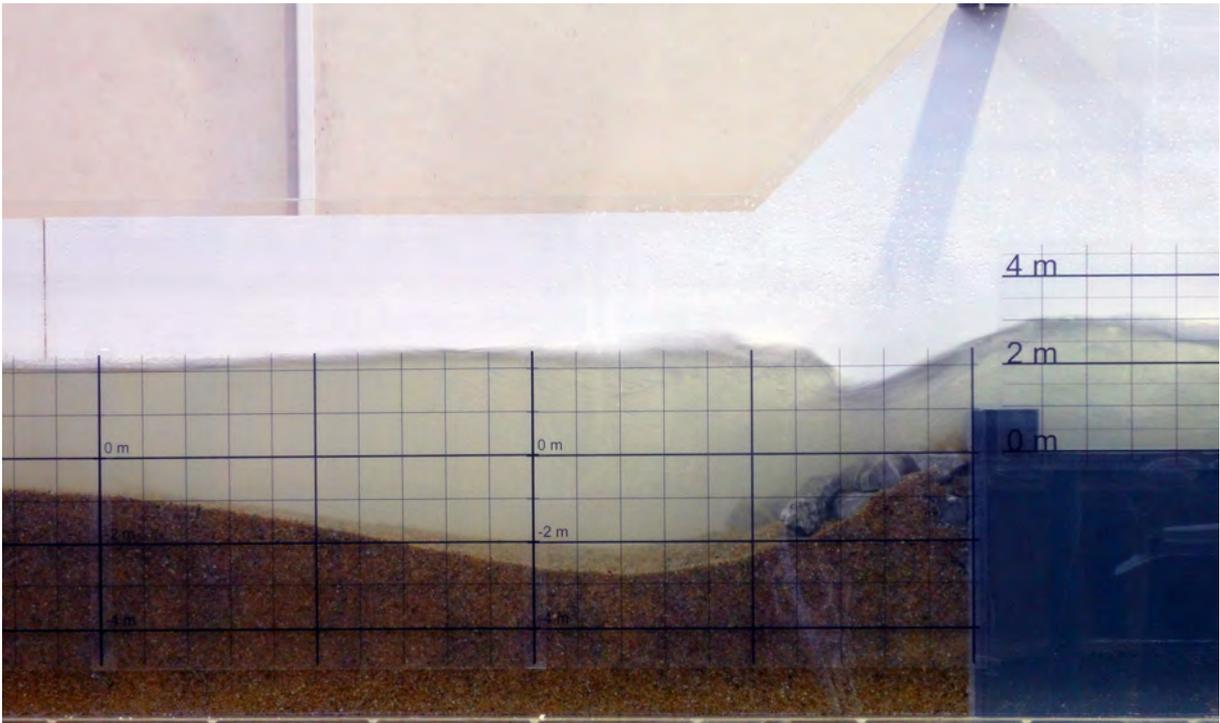


Abbildung 5.1: Unvollkommener Überfall über Gegenschwelle bei HQ_{100} nach 120 Minuten bei der Variante 01A

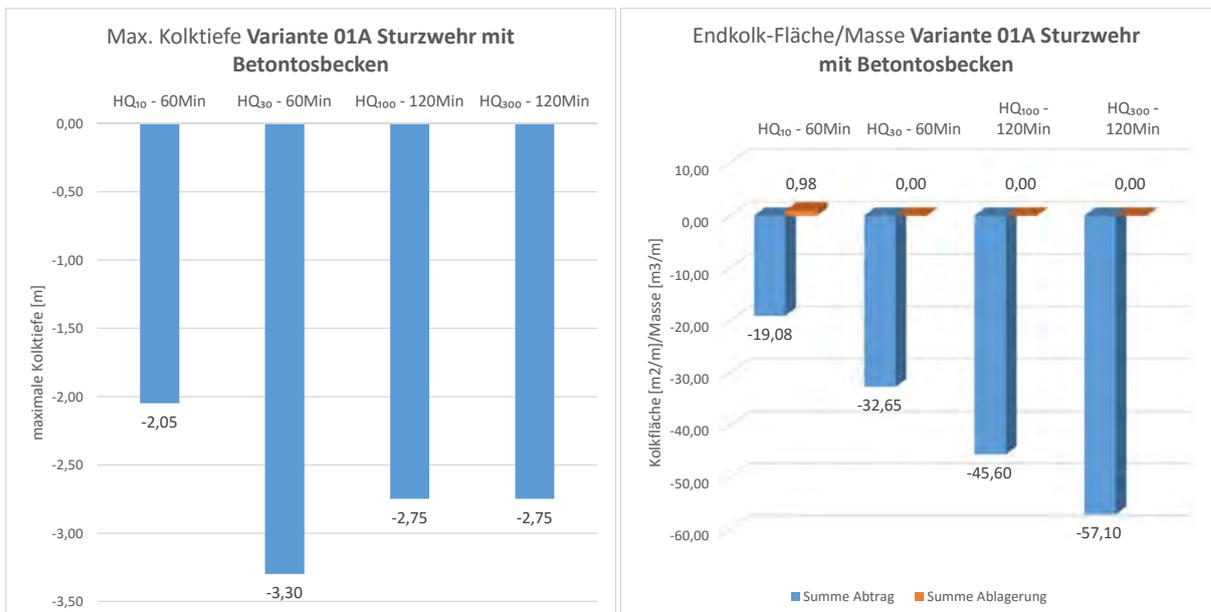


Abbildung 5.2: Maximale Kolkiefen und Kolkflächen bzw. Massen der Variante 01A

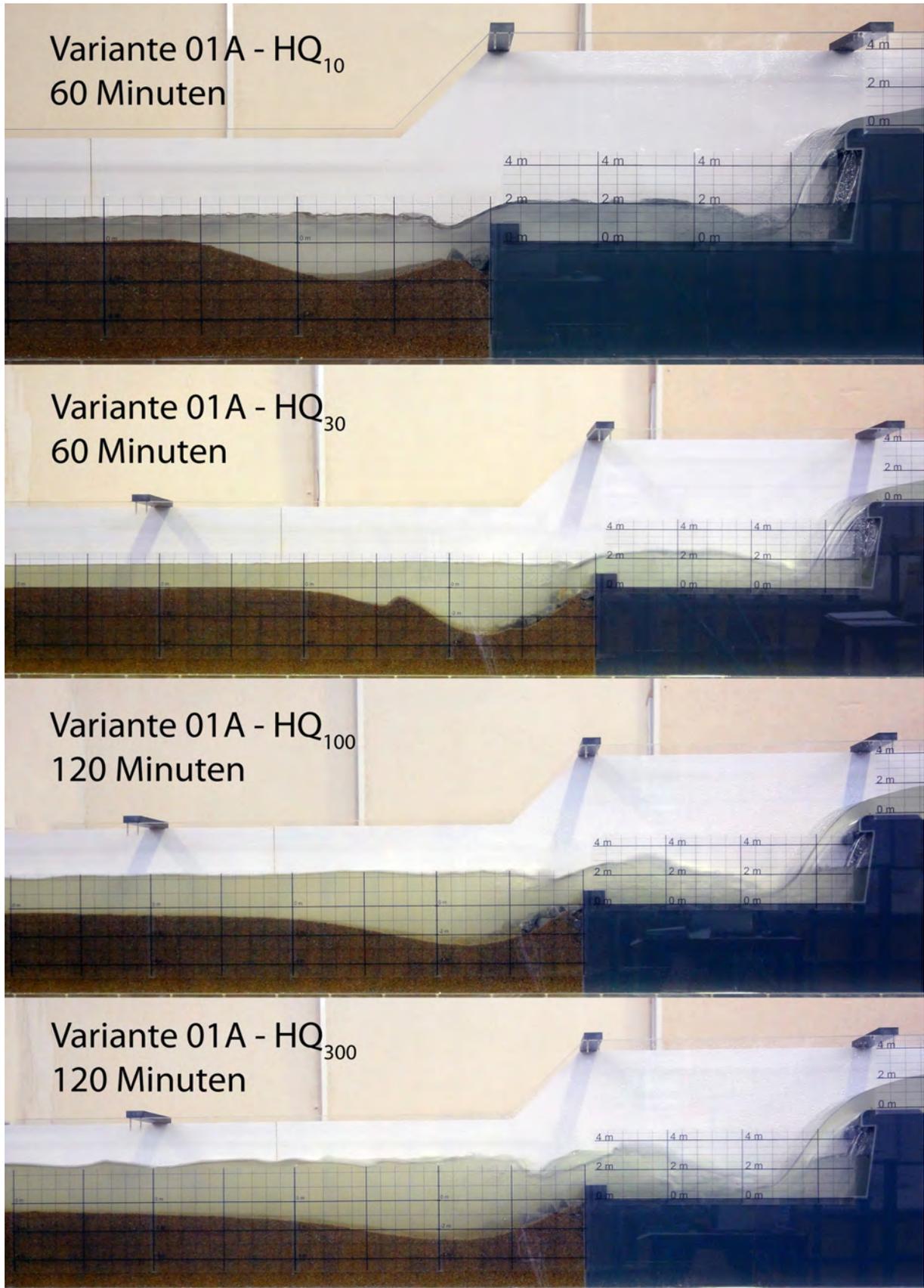


Abbildung 5.3: Fotografische Endkolkprofile der Variante 01A

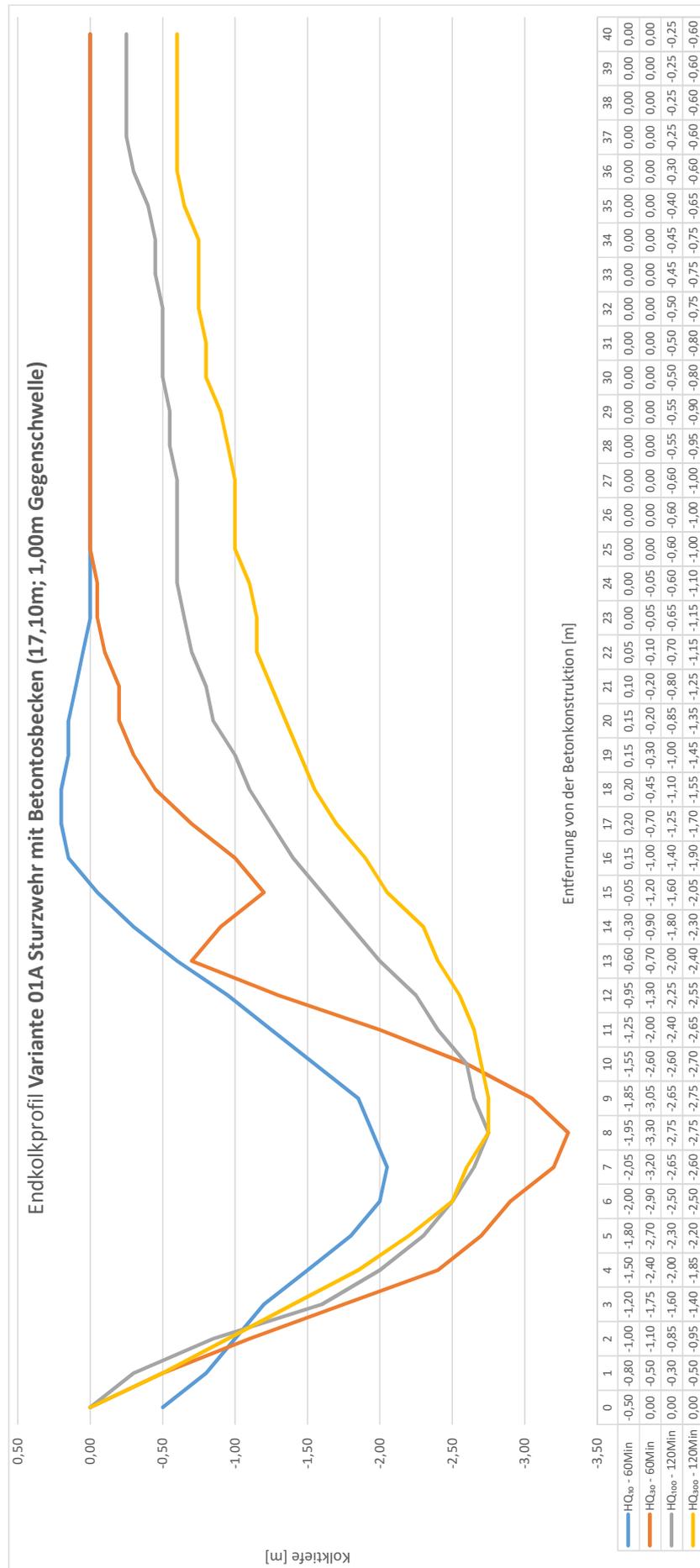


Abbildung 5.4: Endkolkprofile der Variante 01A

5.0.2 Variante 01B Sturzwehr mit kurzem Betontos Becken

Für Variante 01B wurde Variante 01A angepasst, um die Erfahrungen aus dem vorhergehenden Modellversuch umzusetzen. Das Tosbecken wurde in dieser Anordnung um 6,85m auf 10,25m Gesamtlänge gekürzt, damit nur mehr die Zone des Strahlaufpralles befestigt ist. Die Gegenschwelle wurde um die Hälfte auf 0,50m reduziert, um eine erneute Überfall-Wirkung zu verhindern. Die Variante wurde laut Abbildung 3.3 sowie Anhang A.2 untersucht.

Die Halbierung der Gegenschwelle zeigte bei den Abflüssen von HQ_{10} und HQ_{30} eine positive Wirkung. Es kam zu keinem Rückstau und auch zu keinem zweiten Überfall, dadurch reduzierten sich die Kolk-tiefen bei HQ_{10} auf 1,30m und bei HQ_{30} auf 2,00m, laut Abbildung 5.6.

Bei den höheren Abflüssen kam es zu einer Verschlechterung im Vergleich zu Variante 01A, da das Tosbecken zur Ausbildung eines Wechselsprunges zu kurz war und sich dadurch nach der Gegenschwelle eine Walze bildete, wie in Abbildung 5.5 zu sehen ist. Die Kolk-tiefen erhöhten sich somit auf 3,40m bei HQ_{100} und 3,85m bei HQ_{300} .

Die Endkolkprofile sind in Abbildung 5.7 und 5.8 zu sehen. Abbildung 5.6 zeigt die maximalen Kolk-tiefen und die bewegten Kolkflächen beziehungsweise die Kolkmassen pro Wehrc-breiten-Meter.

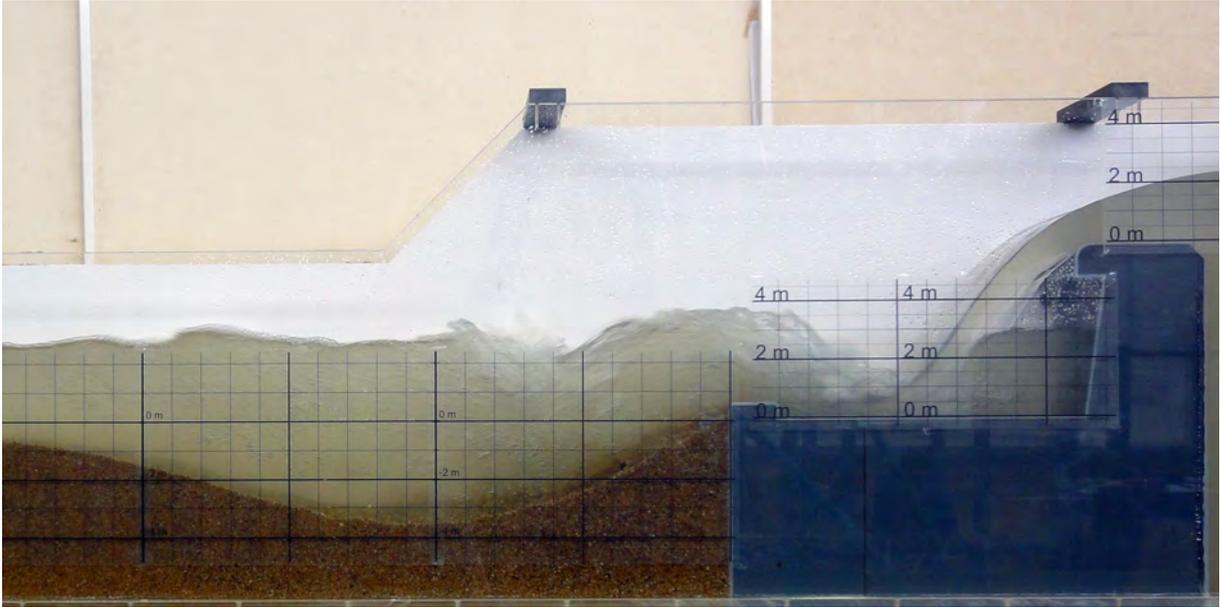


Abbildung 5.5: Sprung über Gegenschwelle und nachfolgende Walze bei HQ300 nach 45 Minuten bei der Variante 01B

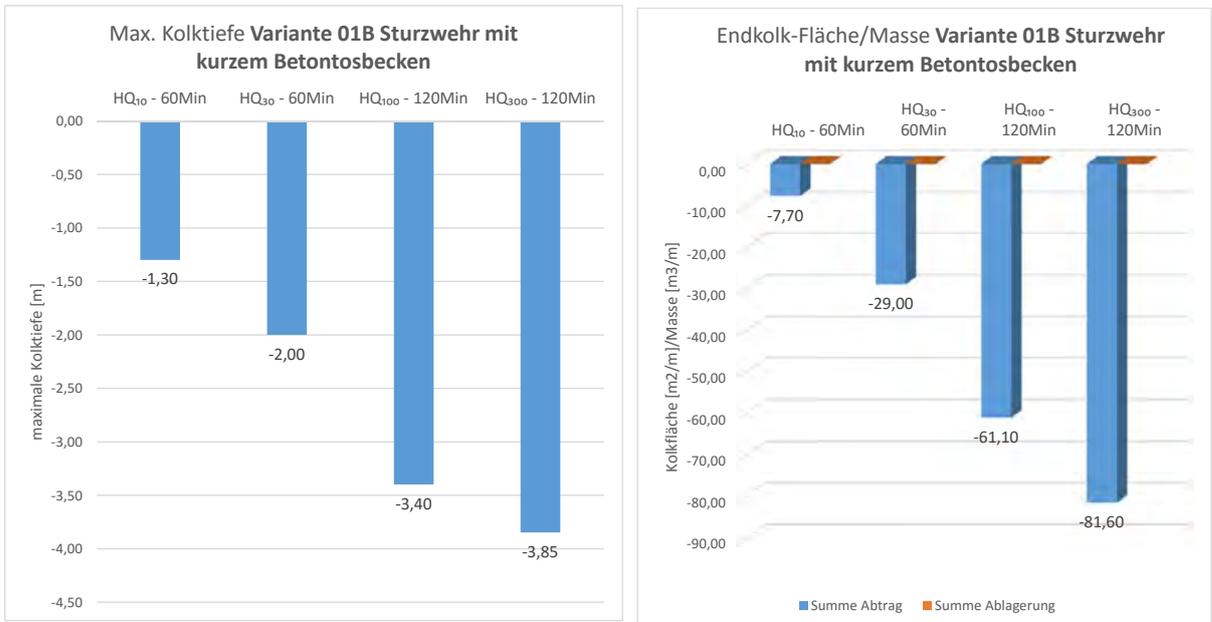


Abbildung 5.6: Maximale Kolkiefen und Kolkflächen bzw. Massen der Variante 01B

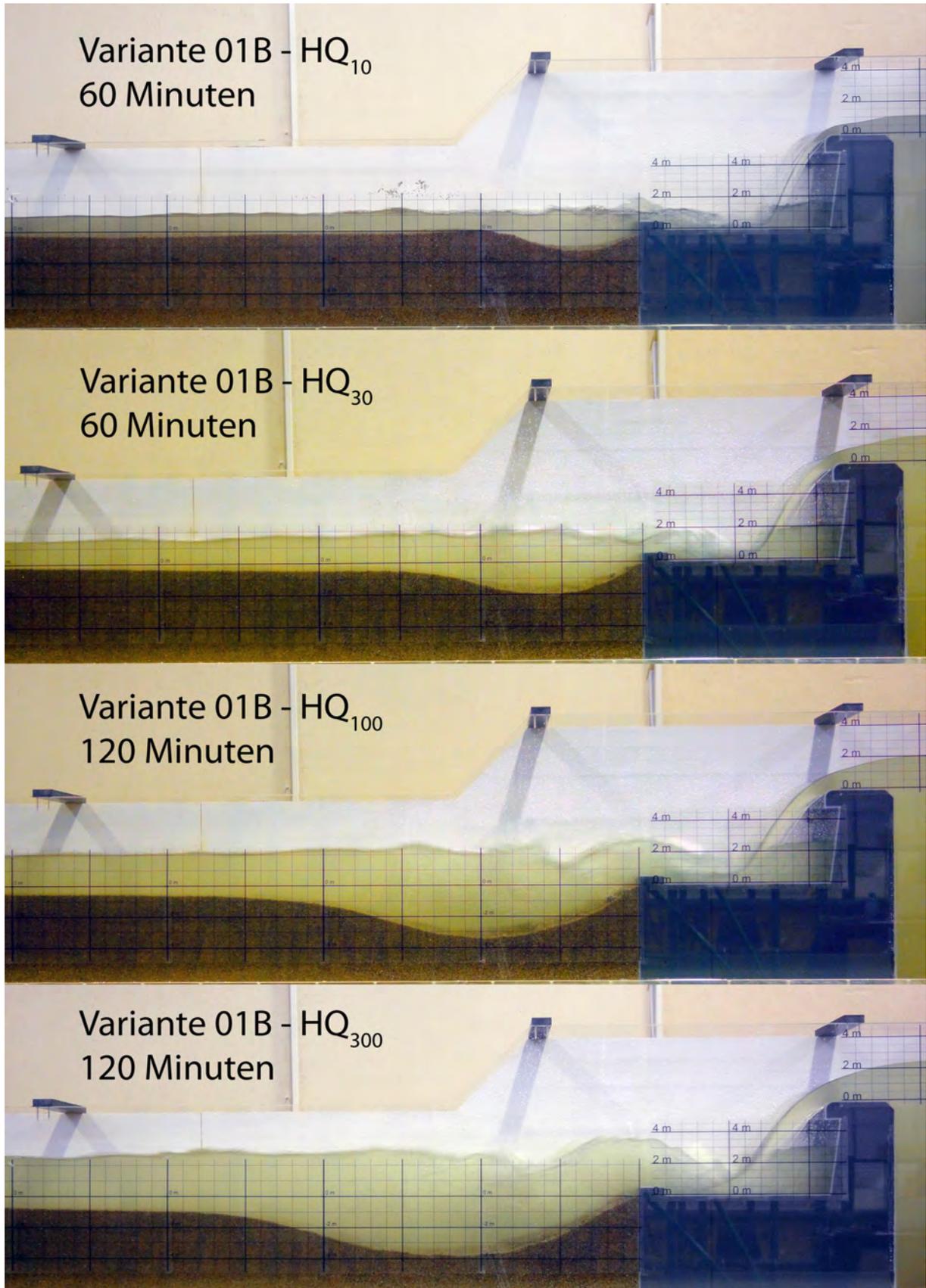


Abbildung 5.7: Fotografische Endkolkprofile der Variante 01B

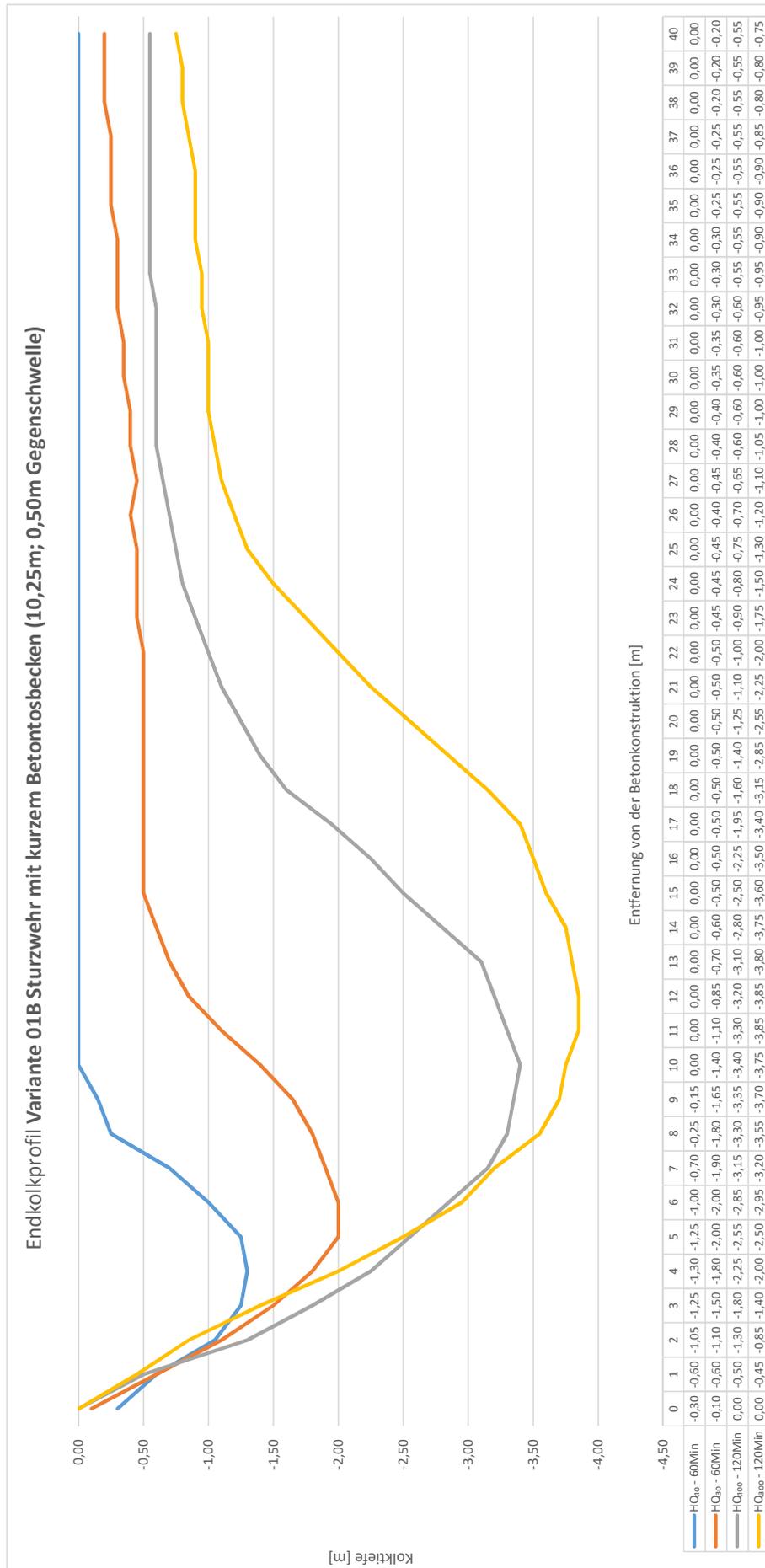


Abbildung 5.8: Endkolkprofile der Variante 01B

5.0.3 Variante 01C Sturzwehr mit kurzem Betontos Becken und HQ₁₀₀-Mulde

In Variante 01C blieb die befestigte Form wie in Variante 01B unverändert. Das heißt, die Abmessungen aus Abbildung 3.3 blieben erhalten. Durch Vorversuche wurde nun eine Mulde aus Wasserbausteinen der Klasse V (80-100cm) lose auf einer Filterschicht in einer Muldenform verlegt. Die Muldenform wurde auf die Kolkentwicklung ohne Wasserbausteine bei einem HQ₁₀₀ bemessen und die halbe Tiefe dieser Kolkmulde als Muldentosbecken mit Wasserbausteinen geformt. Das ergab eine 20,00m lange Mulde mit einem Stich in der Mitte von 2,00m. Diese Mulde wurde unmittelbar an den befestigten Wehrteil angelegt.

Bei einem Abfluss, der HQ₁₀ entsprach, traten keine nennenswerten Bewegungen auf, deswegen wurde die Versuchsdauer auf 30 Minuten reduziert. Selbst bei einem HQ₃₀ traten nur geringe Kolkiefen mit einem Maximum von 0,70m auf. In beiden Fällen bewegten sich die Wasserbausteine der Mulde nicht.

Bei einem HQ₁₀₀ und HQ₃₀₀ Abfluss kam es zu einem leichten Absacken der letzten Steinreihe durch Unterspülungen. Die entstandenen Flusssohlenbewegungen sind aber auf strömungsbedingte Erosion zurückzuführen. Das heißt, es handelte sich dabei um keinen klassischen Kolk aufgrund unzureichender Energieumwandlung, welche ausschließlich in der Mulde statt fand, wie in Abbildung 5.9 zu sehen ist. Da sich die Materialbewegungen zu Beginn des Versuches abspielten und danach keine Veränderungen mehr wahrgenommen werden konnten, wurde hier die Versuchsdauer auf 90 Minuten reduziert. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass eine Mulde, die auf HQ₁₀₀ ausgelegt ist, im Regelfall überdimensioniert ist und eine unwirtschaftlich Variante darstellt. Im Wasserbau werden solche Strukturen üblicherweise für ein HQ₃₀ bemessen, deswegen wird diese Variante auch im folgenden Versuch behandelt.

Die Endkolkprofile sind in Abbildung 5.11 und 5.12 zu sehen. Abbildung 5.10 zeigt die maximalen Kolkiefen und die bewegten Kolkflächen beziehungsweise die Kolkmassen pro Wehrbreiten-Meter.

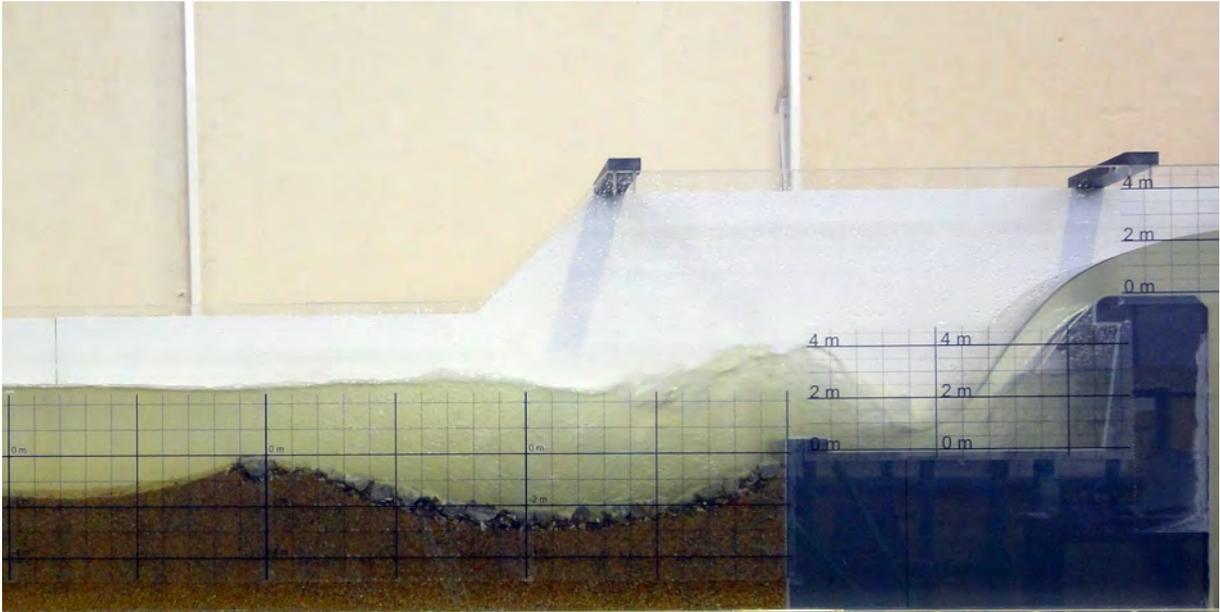


Abbildung 5.9: Walze in der Mulde aus Wasserbausteinen bei HQ_{300} nach 90 Minuten bei der Variante 01C

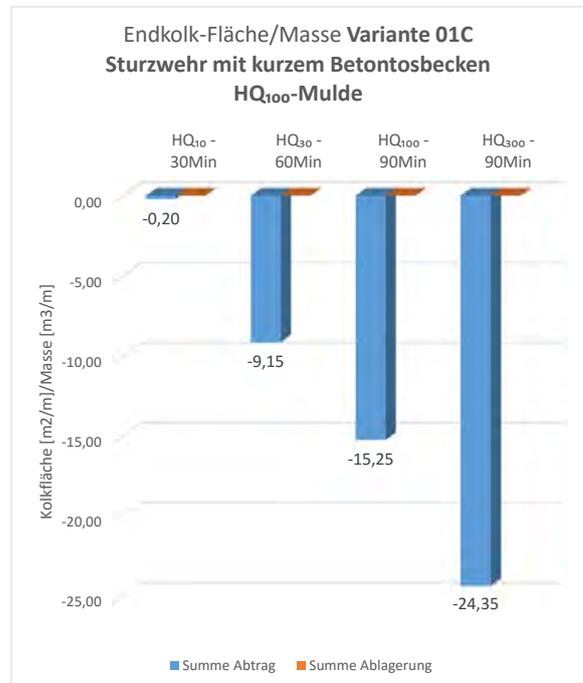
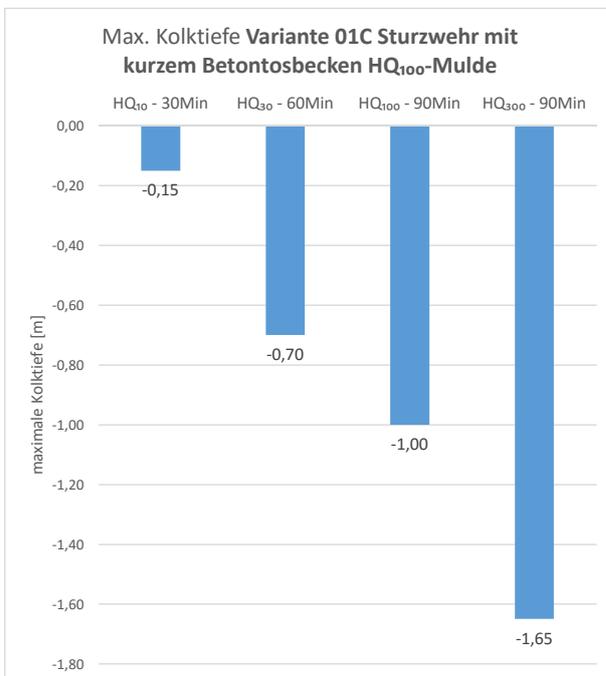


Abbildung 5.10: Maximale Kolkiefen und Kolkflächen bzw. Massen der Variante 01C

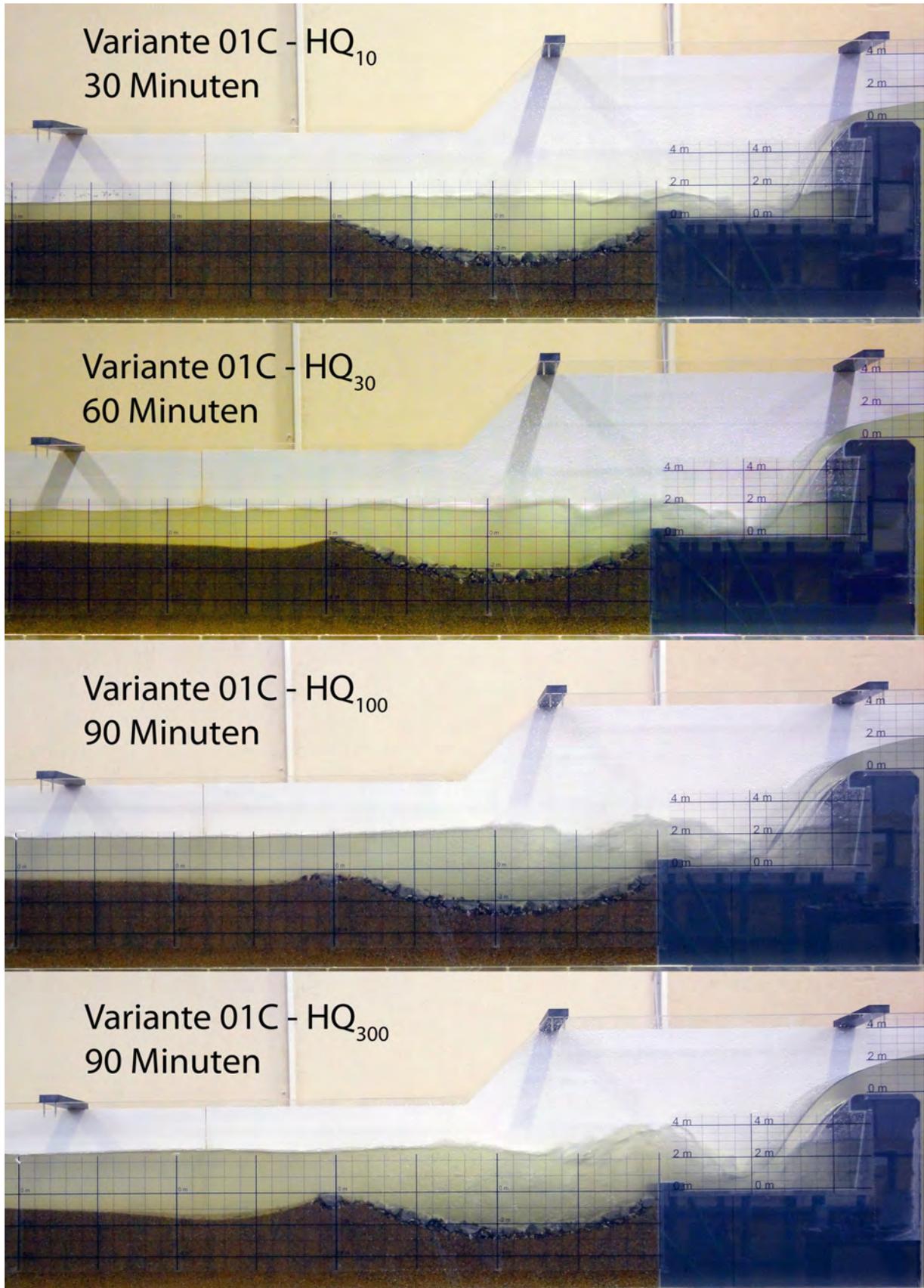


Abbildung 5.11: Fotografische Endkolkprofile der Variante 01C

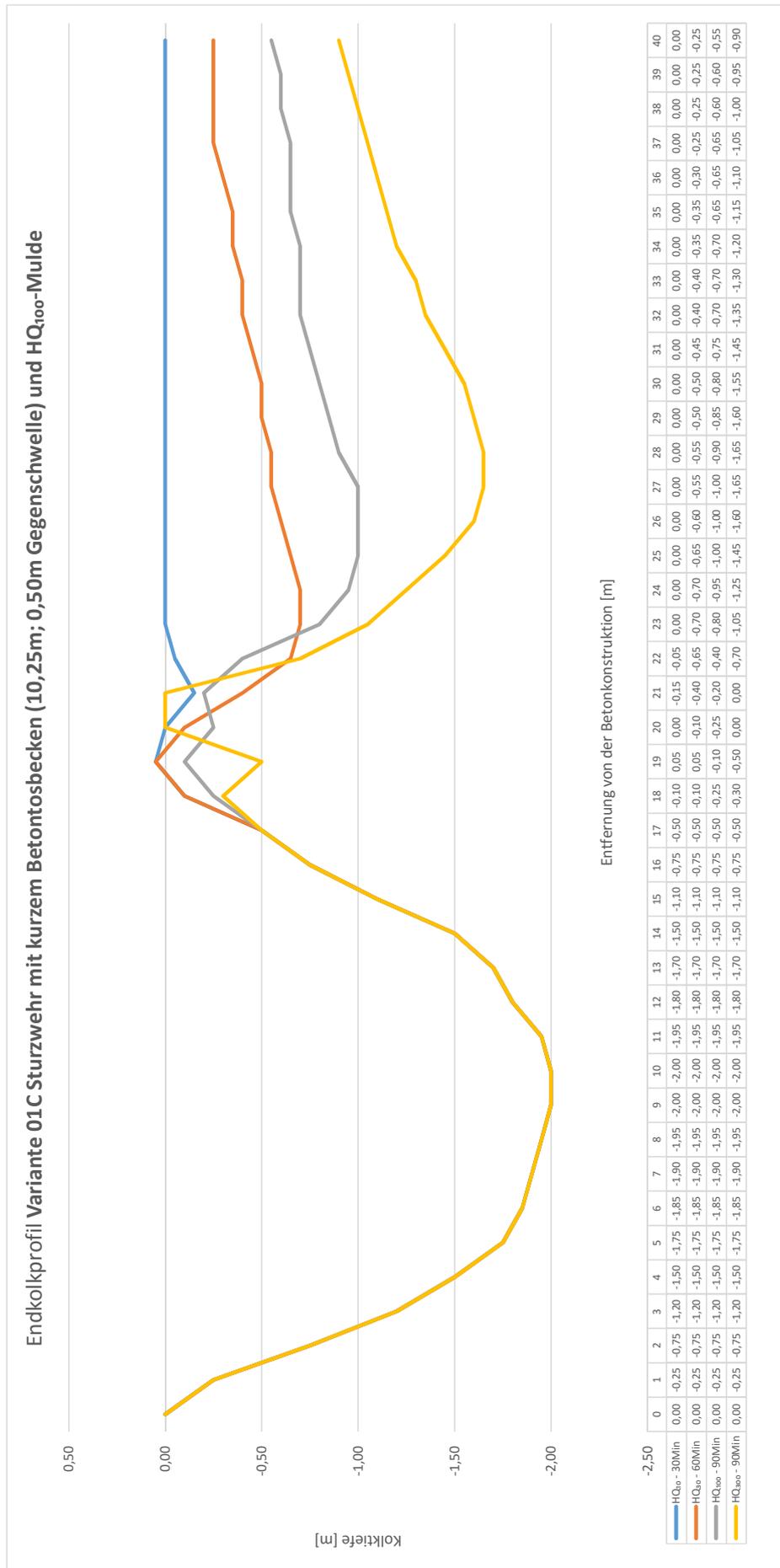


Abbildung 5.12: Endkolkprofile der Variante 01C

5.0.4 Variante 01D Sturzwehr mit kurzem Betontos Becken und HQ₃₀-Mulde

In Variante 01D blieb ebenfalls die befestigte Form wie in Variante 01B unverändert. Das heißt, die Abmessungen in Abbildung 3.3 blieben erhalten. Durch Vorversuche wurde eine Mulde aus Wasserbausteinen der Klasse V (80-100cm) lose auf einer Filterschicht in einer Muldenform verlegt. Die Muldenform wurde bei dieser Variante auf die Kolkentwicklung ohne Wasserbausteine bei einem HQ₃₀ bemessen und wieder die halbe Tiefe dieser Kolkmulde als Muldentosbecken mit Wasserbausteinen geformt. Das ergab eine 10,00m lange Mulde mit einem Stich in der Mitte von 1,30m. Diese Mulde wurde wie bei Variante 01C unmittelbar an den befestigten Wehrteil angeordnet.

Bei einem Abfluss, der HQ₁₀ entsprach, traten keine nennenswerten Bewegungen auf. Selbst bei einem HQ₃₀ traten nur geringe Kolkstiefen mit einem Maximum von 0,75m auf. In beiden Fällen bewegten sich die Wasserbausteine der Mulde nicht und die Mulde blieb intakt.

Bei einer Wassermenge von HQ₁₀₀ bewegten sich teilweise Wasserbausteine am Ende der Mulde. Die Walze blieb aber in der Mulde und es wurden Kolkstiefen von 1,55m erreicht.

Bei HQ₃₀₀ traf die Walze direkt auf das Ende der Mulde auf und riss sofort die letzten Steinreihen weg. Nach 10 Minuten Versuchsdauer war die hintere Hälfte der Mulde vollständig in Bewegung. Es bildete sich eine neue Mulde, als wäre keine Mulde aus Wasserbausteinen vorhanden gewesen und wie bei Variante 01B wurde eine Kolkstiefe von 3,85m erreicht. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.13 genauer zu sehen.

Die Endkolkprofile sind in Abbildung 5.15 und 5.16 zu sehen. Abbildung 5.14 zeigt die maximalen Kolkstiefen und die bewegten Kolkflächen beziehungsweise die Kolkmassen pro Wehrbreiten-Meter.

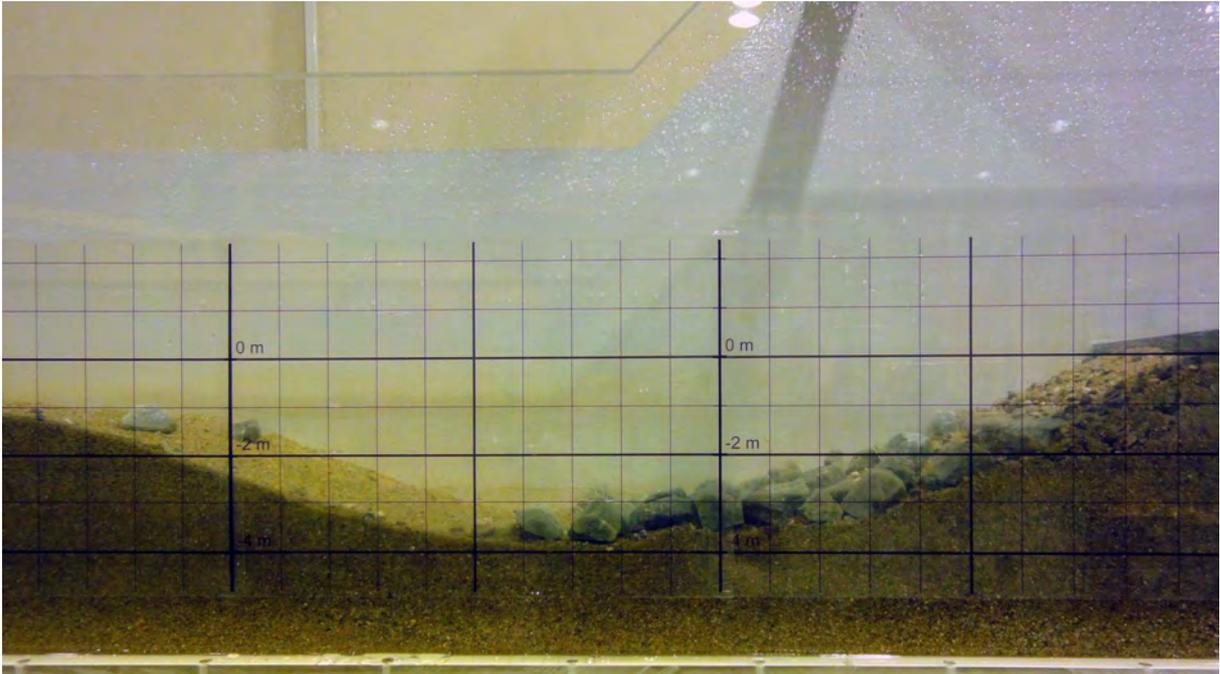


Abbildung 5.13: Mulde aus Wasserbausteinen bei einem HQ_{300} nach 120 Minuten Versuchsdauer der Variante 01D

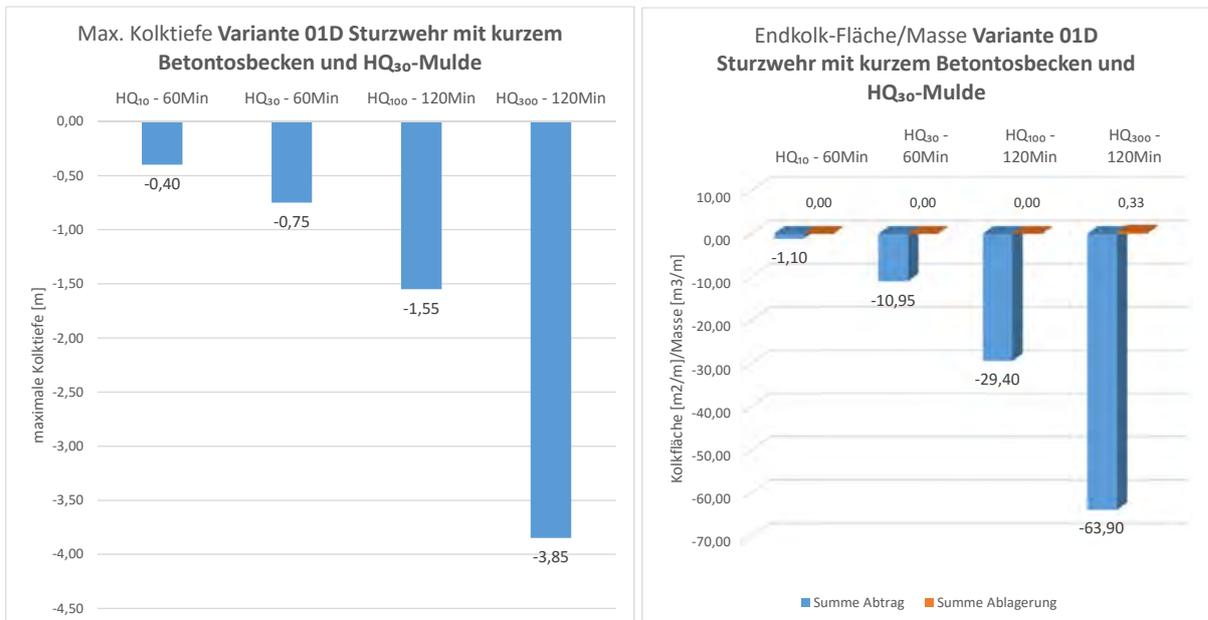


Abbildung 5.14: Maximale Kolkttiefen und Kolkflächen bzw. Massen der Variante 01D

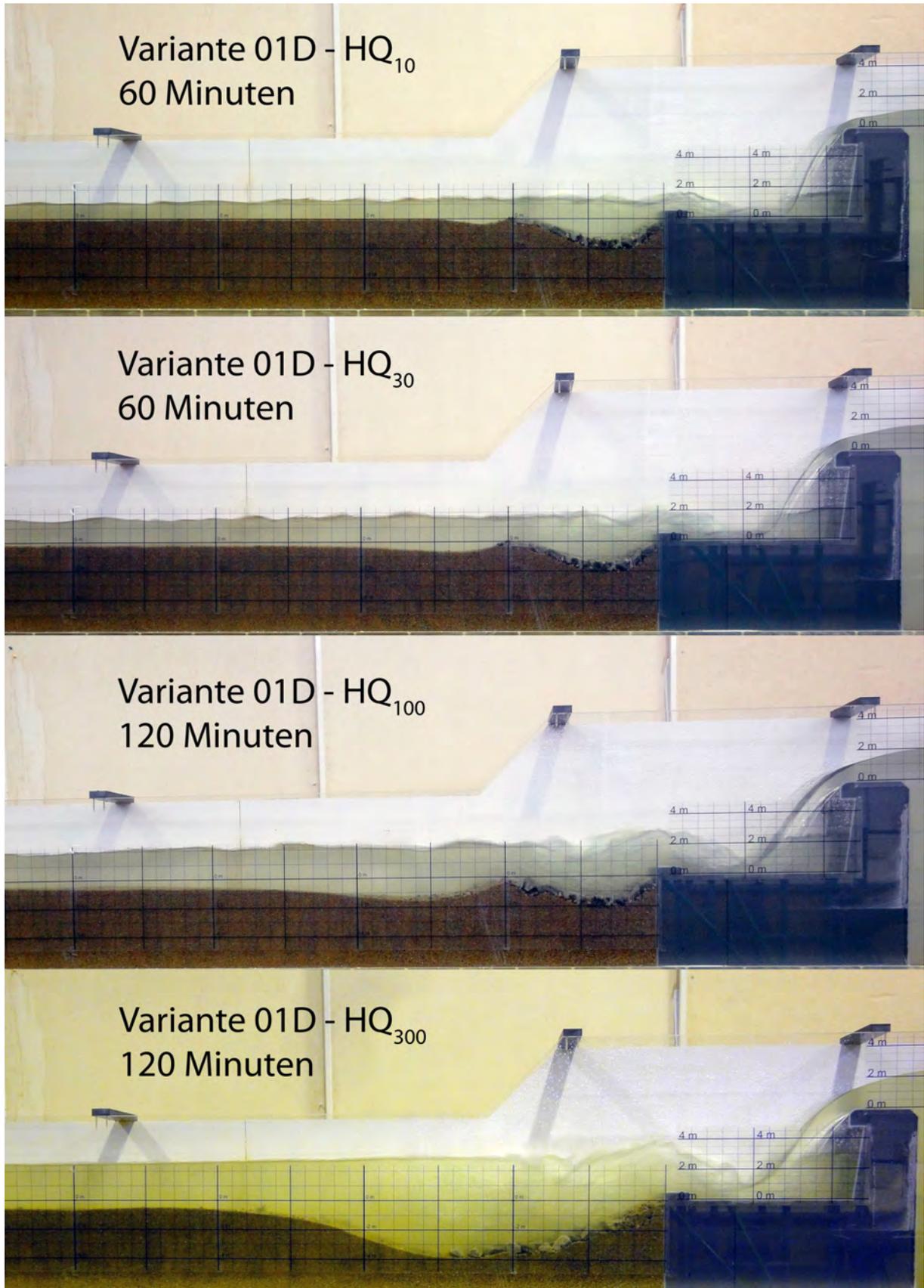


Abbildung 5.15: Fotografische Endkolkprofile der Variante 01D

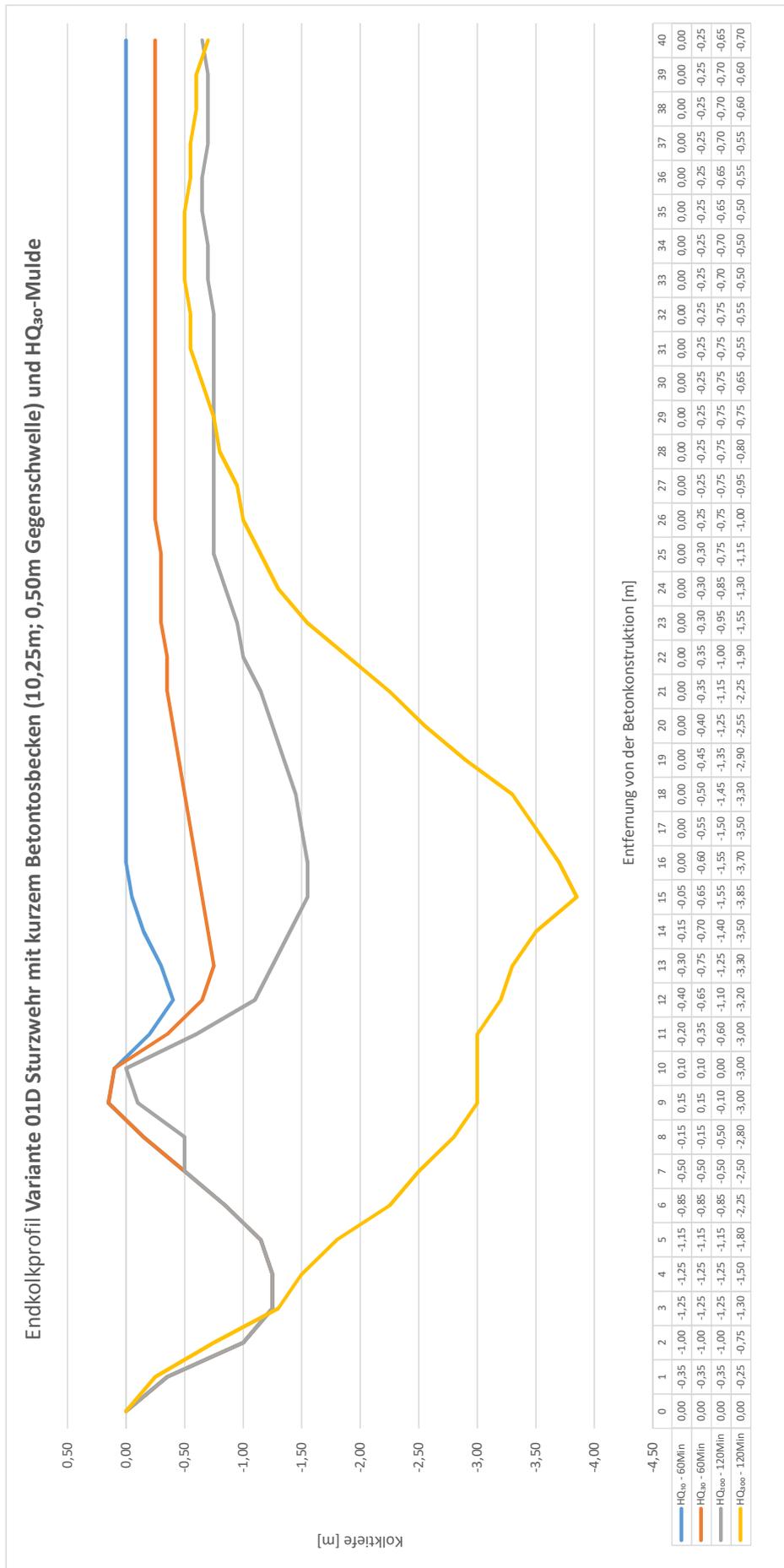


Abbildung 5.16: Endkolkprofile der Variante 01D

5.0.5 Variante 02A Schusswehr mit Betontos Becken

Bei Variante 02A nach Abbildung 3.4 sowie Anhang A.2 stellte sich im Vergleich zu Variante 01A schnell heraus, dass die Eintiefung von 1,00m viel effektiver für die Energieumwandlung ist als eine Gegenschwelle.

Keine nennenswerten Bewegungen wurden bei einem HQ_{10} Abfluss beobachtet. Bei einem Abfluss von HQ_{30} bildete sich leichter Kolk, der sich schnell bei einer Tiefe von ca. 1,00m stabilisierte. Bei beiden Abflüssen wurde die volle Länge des Tosbeckens vom Wechselsprung nicht genützt, wie in Abbildung 5.17 zu sehen ist. Deswegen wurde bei der folgenden Variante das Tosbecken verkürzt.

Der Abfluss bei HQ_{100} brachte nach 15 Minuten Versuchsdauer schnell eine Kolkentiefe von ca. 1,00m, danach eine langsame Vertiefung bis auf 1,80m. Bei einem HQ_{300} konnte ein ähnlicher zeitlicher Ablauf beobachtet werden. Zusätzlich begangen die Wasserbausteine der Nachkolkssicherung leicht zu wackeln, bewegten sich aber nicht von ihrer Stelle.

Die Endkolkprofile sind in Abbildung 5.19 und 5.20 zu sehen. Abbildung 5.18 zeigt die maximalen Kolkiefen und die bewegten Kolkflächen beziehungsweise die Kolkmassen pro Wehrcbreiten-Meter.

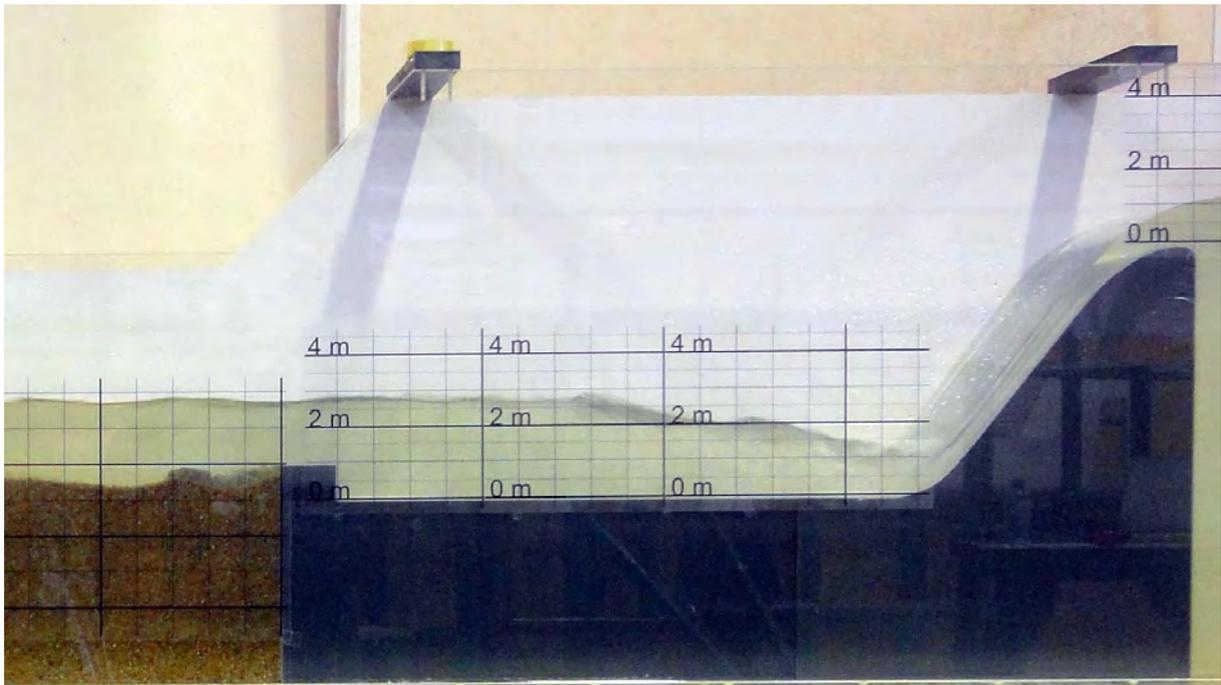


Abbildung 5.17: Deckwalze im Tosbecken bei HQ₃₀ nach 15 Minuten bei der Variante 02A

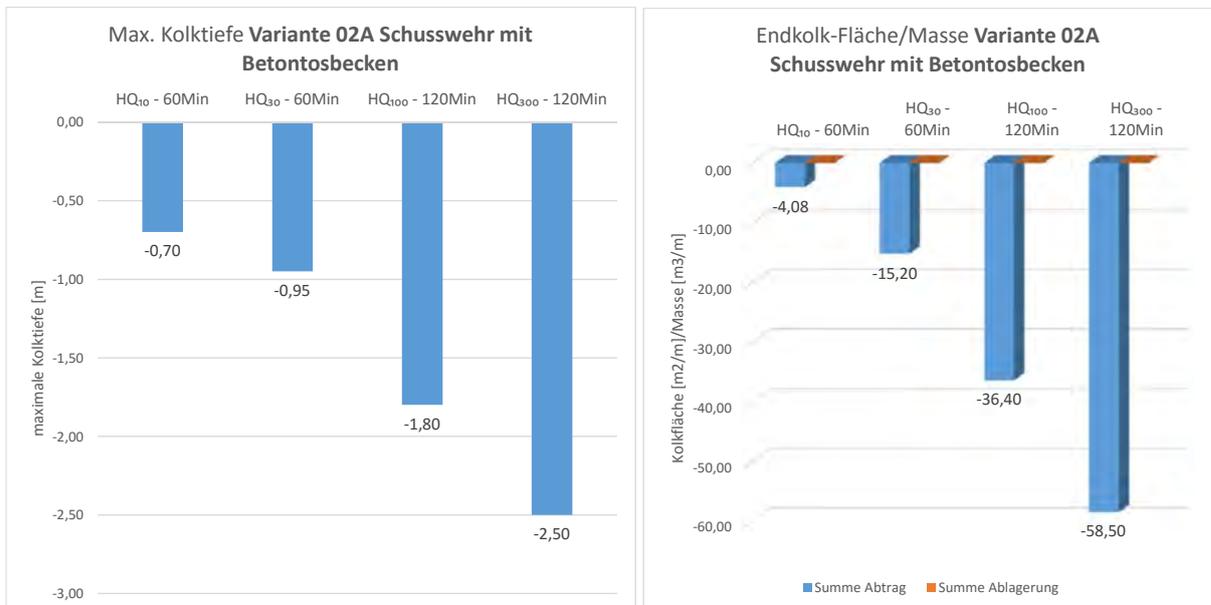


Abbildung 5.18: Maximale Kolkiefen und Kolkflächen bzw. Massen der Variante 02A

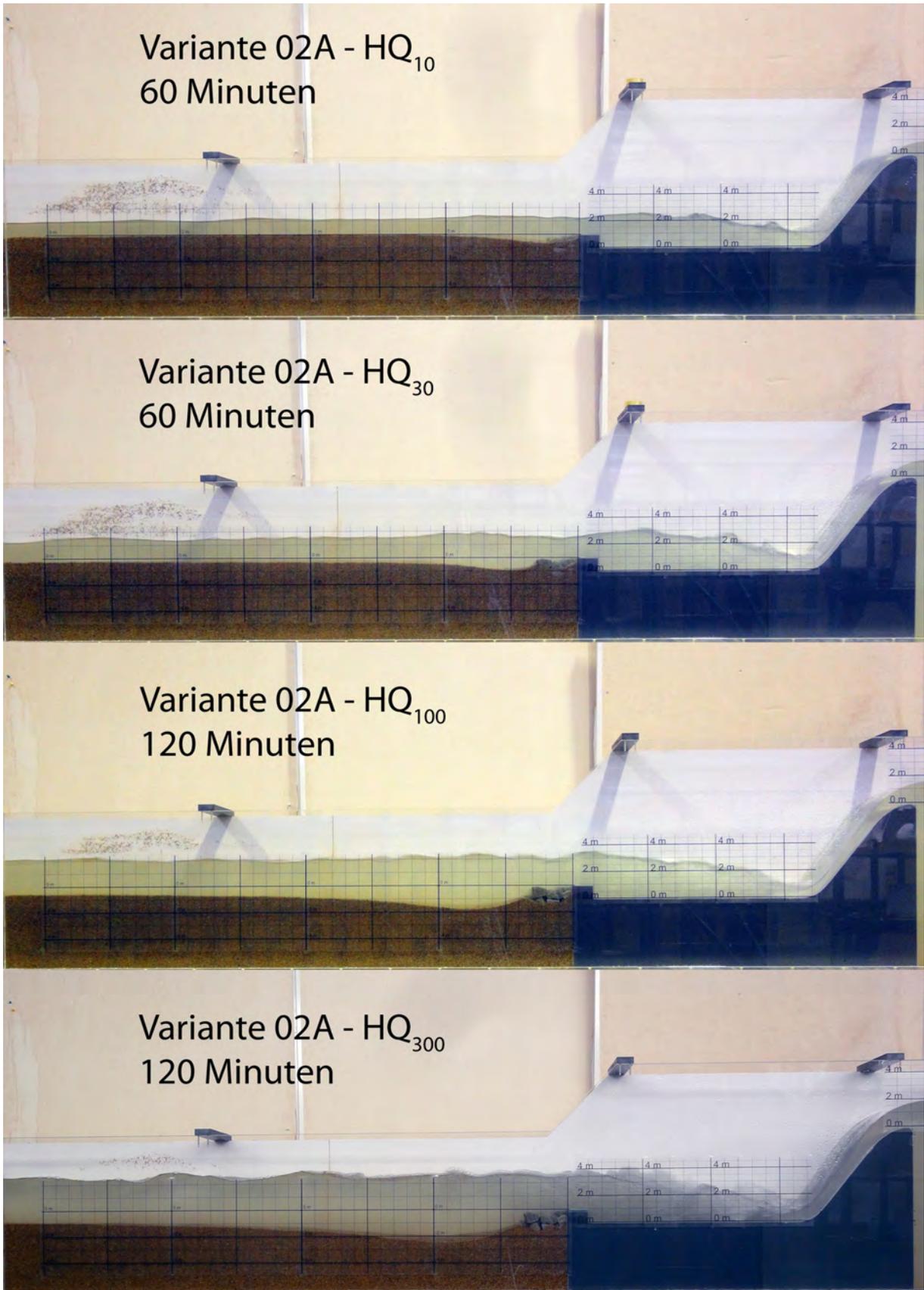


Abbildung 5.19: Fotografische Endkolkprofile der Variante 02A

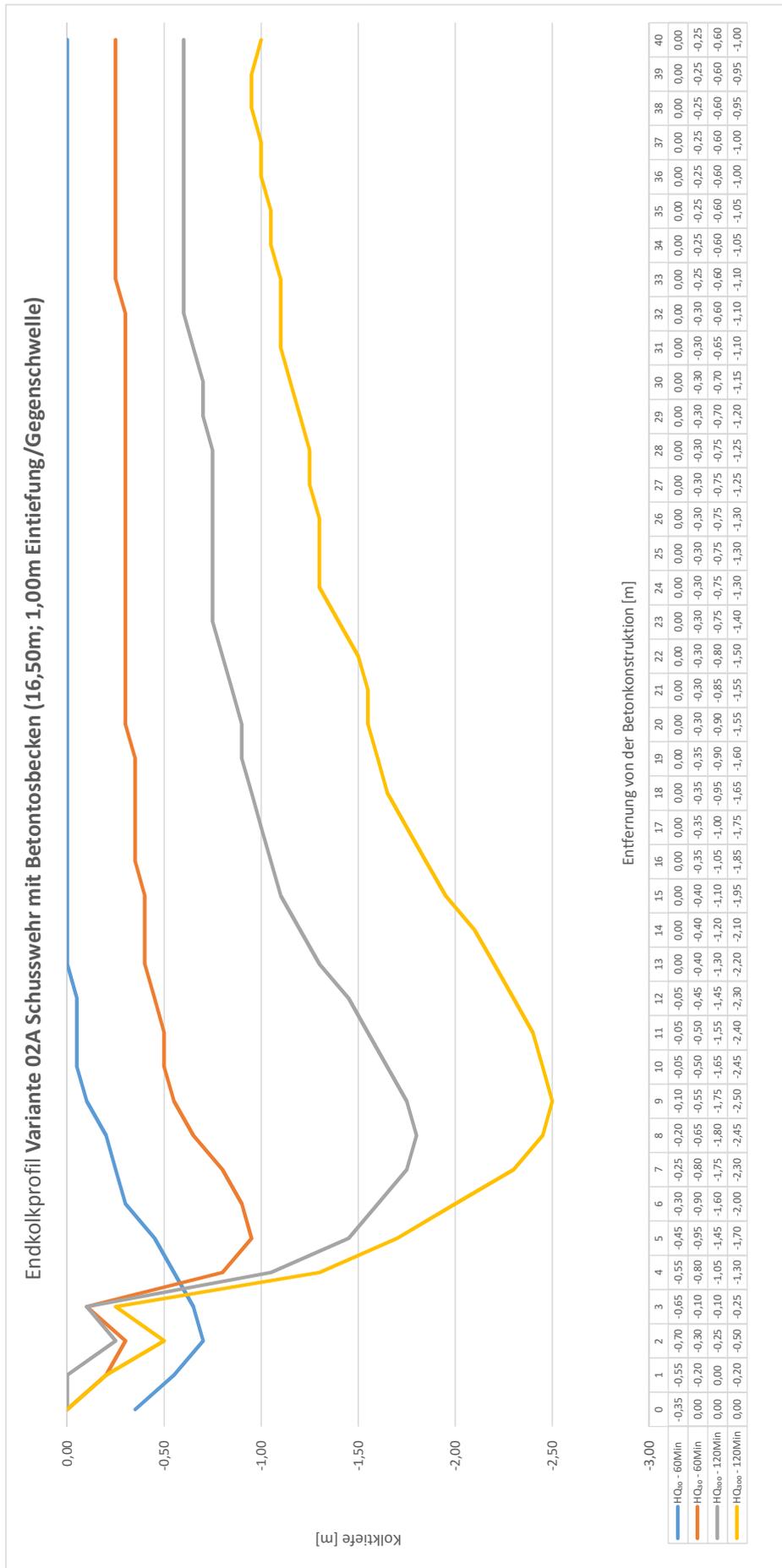


Abbildung 5.20: Endkolkprofile der Variante 02A

5.0.6 Variante 02B Schusswehr mit kurzem Betontos Becken

Für Variante 02B wurde Variante 02A angepasst, um die Erfahrungen aus dem vorhergehenden Modellversuch umzusetzen. Das Tosbecken wurde in dieser Anordnung um 4,00m auf 12,50m Gesamtlänge gekürzt, der Größe des tatsächlichen Wechselsprunges aus dem Versuch mit Variante 02A, wie in Abbildung 3.5 sowie Anhang A.2 zu sehen ist.

Bei einem Abfluss von HQ_{10} bildete sich ein unregelmäßiger Kolk, dessen Ursache nicht erkannt werden konnte. An den Modellwänden kam es zu tieferen Kolkentwicklungen als in der Mitte, aber alle Eintiefungen blieben trotzdem nicht tiefer als ca. 1,00m. Bei HQ_{30} fiel der Kolk wieder regelmäßiger über die Modellbreite aus und stabilisierte sich schnell bei ca. 1,00m. Die Tosbeckenlänge wurde bei dieser Variante im Vergleich zur vorigen besser ausgenutzt, wie in Abbildung 5.21 ersichtlich ist.

Wie schon bei Variante 02A führte ein HQ_{100} Abfluss zu einer schnellen Kolkentwicklung auf eine Tiefe von 1,00m innerhalb der ersten 10 Minuten. Danach konnte ein langsamer Fortschritt bis zu einer Tiefe von 2,05m beobachtet werden, wobei sich die Wasserbausteine nicht bewegten. Bei einem HQ_{300} wurde ein ähnlicher zeitlicher Ablauf wie bei HQ_{100} beobachtet. Der Kolk stabilisierte sich bei ca. 2,50m. Dabei bewegten sich die Wasserbausteine auf der Stelle, verließen diese aber nicht.

Die Endkolkprofile sind in Abbildung 5.23 und 5.24 zu sehen. Abbildung 5.22 zeigt die maximalen Kolkiefen und die bewegten Kolkflächen beziehungsweise die Kolkmassen pro Wehbreiten-Meter.

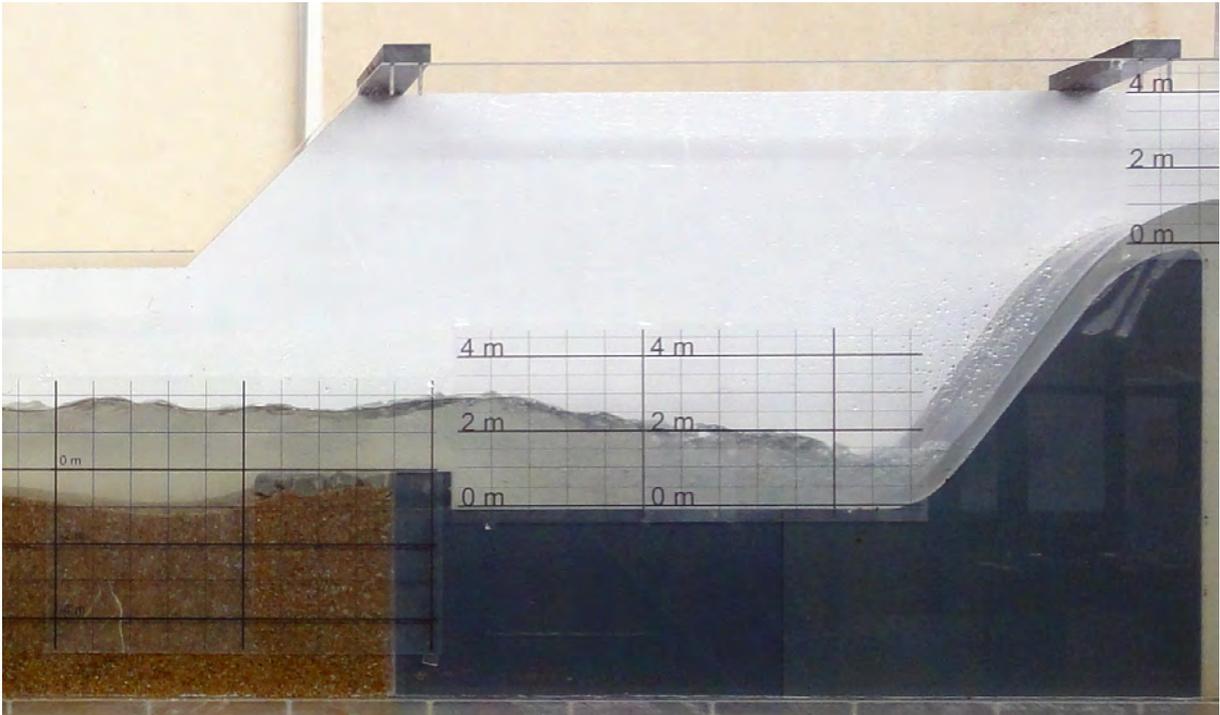


Abbildung 5.21: Deckwalze im Tosbecken bei HQ₃₀ nach 60 Minuten bei der Variante 02B

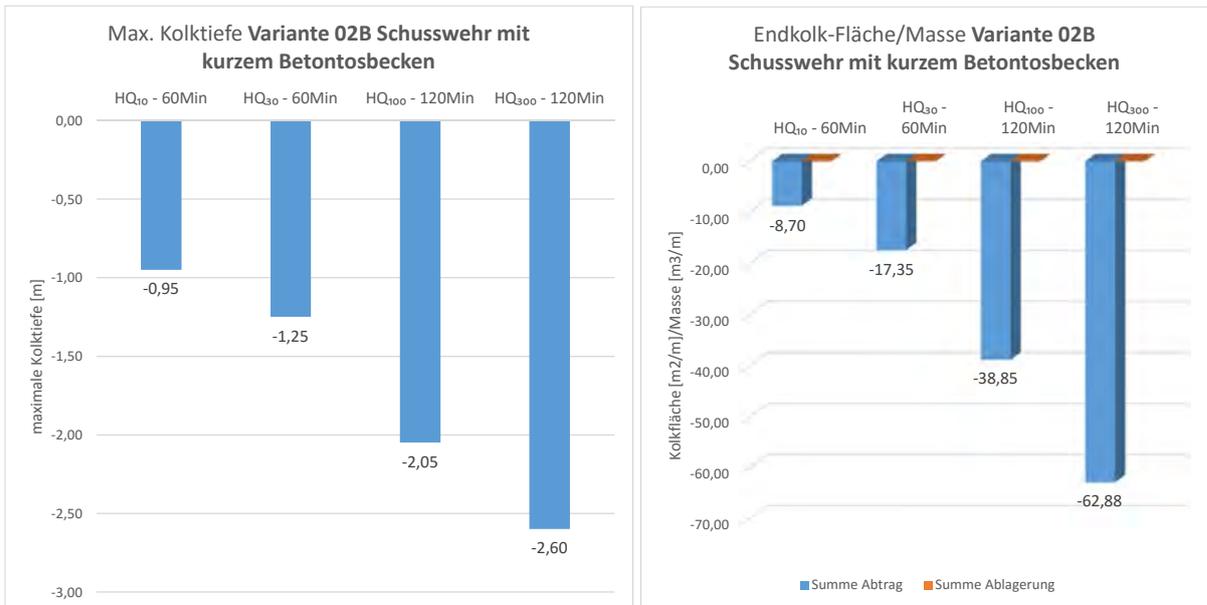


Abbildung 5.22: Maximale Kolkiefen und Kolkflächen bzw. Massen der Variante 02B

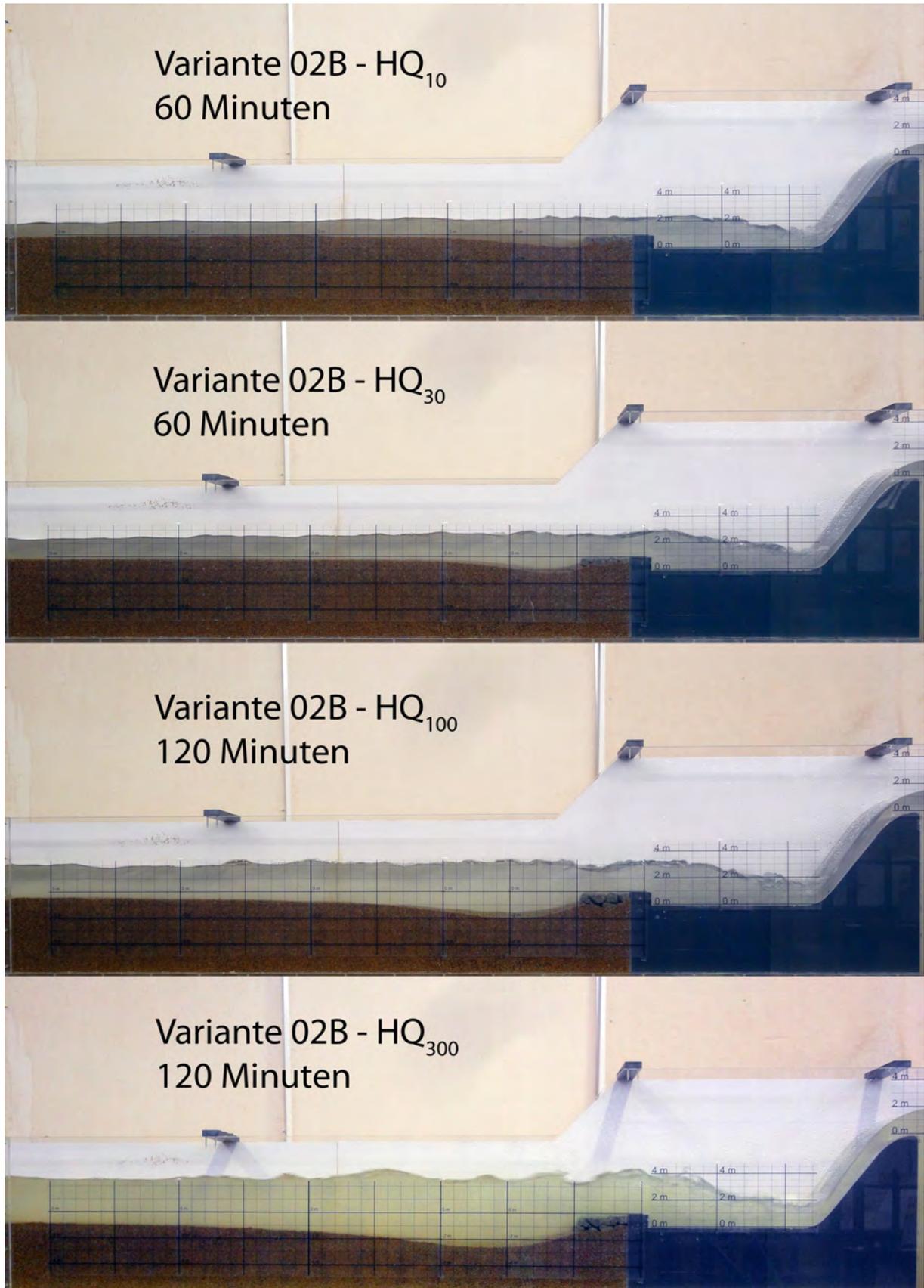


Abbildung 5.23: Fotografische Endkolkprofile der Variante 02B

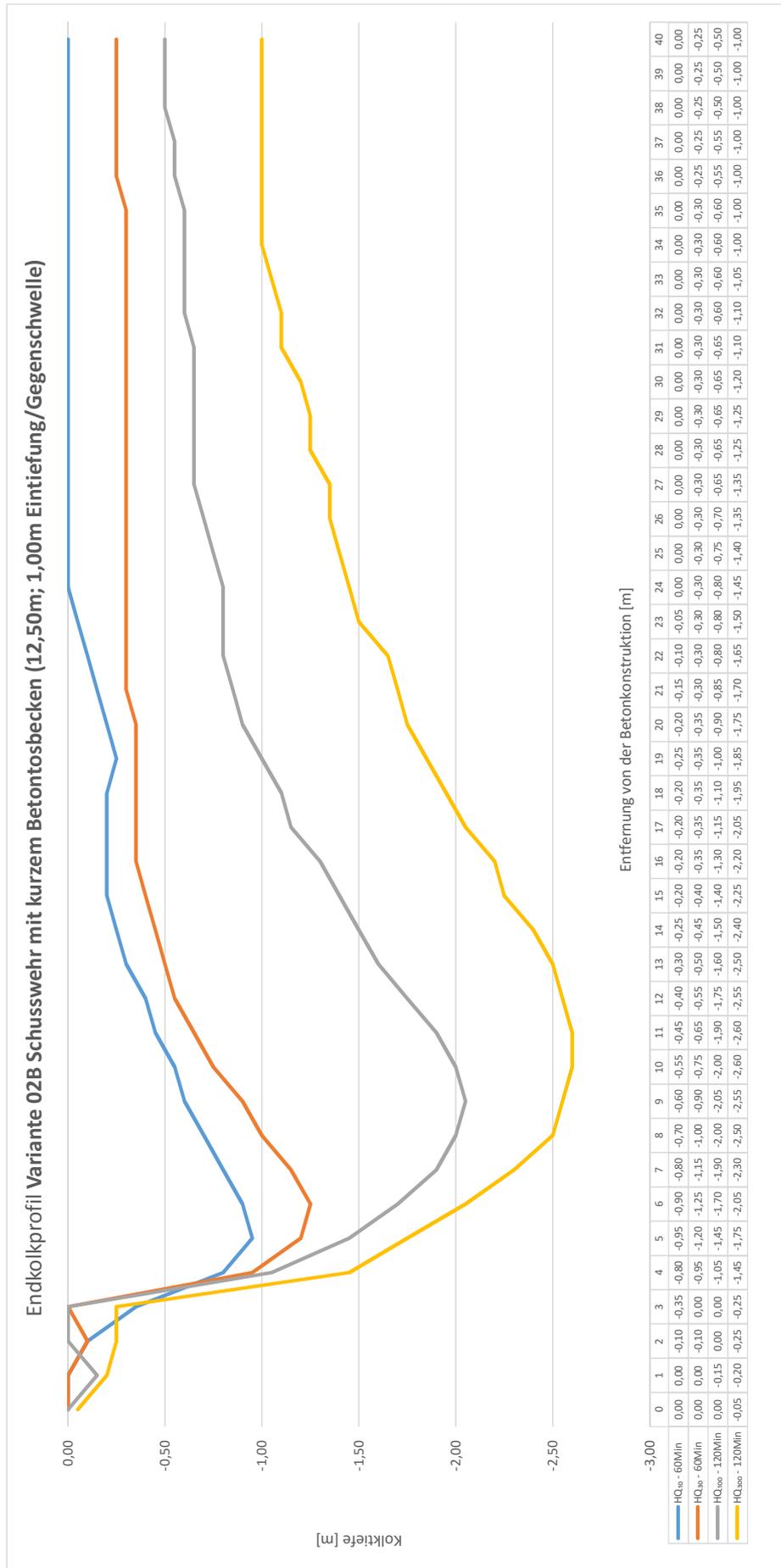


Abbildung 5.24: Endkolkprofile der Variante 02B

5.0.7 Variante 02C Schusswehr mit Betonauslauf HQ₃₀-Mulde

In Variante 02C wurde das Betontos Becken aus den vorigen Varianten durch eine Mulde aus Wasserbausteinen ersetzt. Dazu wurde das Betontos Becken 2,50m nach der Ausrundung abgeschnitten, wodurch die Strahlumlenkungen noch auf Beton statt findet. Die Muldenform wurde auf die Kolkentwicklung ohne Wasserbausteine bei einem HQ₃₀ bemessen. Das ergab eine 14m lange Mulde, die langsam auf Flusssohlenniveau einbindete, wie in Abbildung 3.6 zu sehen sowie im Anhang A.2 zu finden ist.

Durch HQ₁₀ und HQ₃₀ wurde nur eine minimale Kolkentwicklung beobachtet. Bei den Wasserbausteinen gab es keine Bewegungen und die maximalen Kolkiefen fielen mit maximal 0,50m beim HQ₃₀ sehr gering aus.

Bei einem Abfluss, der einem HQ₁₀₀ entsprach, bewegten sich die Wasserbausteine von Anfang an und wurden durch die Walze umgeordnet. Es bildete sich nach 15 Minuten eine neue, verkürzte Muldenform mit ca. 10,00m Länge die sich ab da nur mehr wenig änderte, wie in Abbildung 5.25 zu sehen ist. Erst nach einer Stunde setzte eine Kolkbildung hinter den Wasserbausteinen ein.

Auch beim HQ₃₀₀ wurden die Wasserbausteine sofort aus ihrer ursprünglichen Lager gerissen. Es bildete sich aber, wie schon bei HQ₁₀₀, auch hier nach etwa 15 Minuten wieder eine neue Muldenform, befestigt mit Wasserbausteinen, die während des Versuchsablaufes relativ stabil blieb. Aufgrund der Umlagerung der Wasserbausteine entwickelte sich ein unregelmäßiger Kolk über die Modellbreite.

Die Endkolkprofile sind in Abbildung 5.27 und 5.28 zu sehen. Abbildung 5.26 zeigt die maximalen Kolkiefen und die bewegten Kolkflächen beziehungsweise die Kolkmassen pro Wehbreiten-Meter.

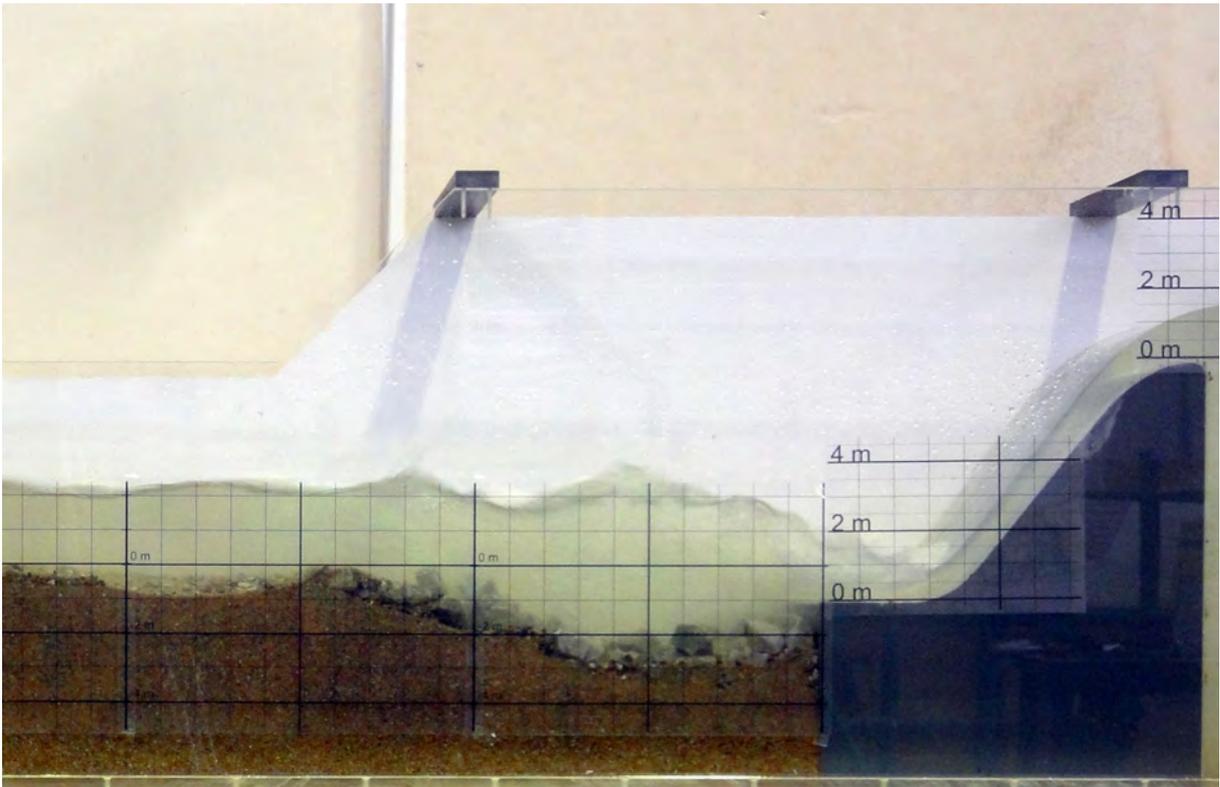


Abbildung 5.25: Umlagerung der Wasserbausteine bei HQ_{100} nach 90 Minuten bei der Variante 02C

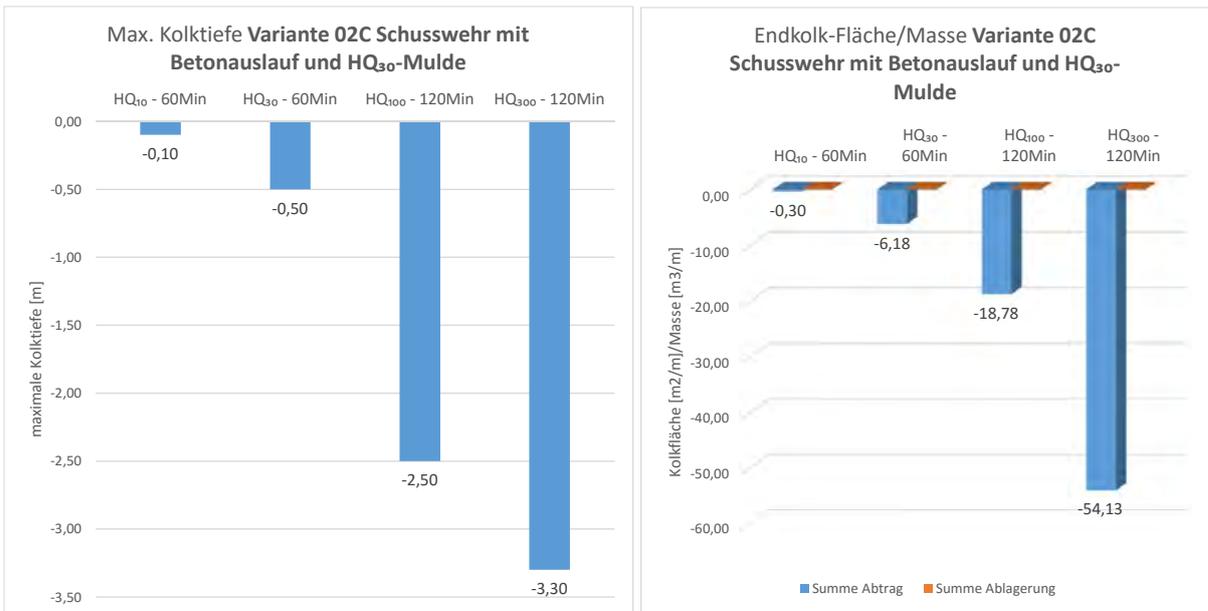


Abbildung 5.26: Maximale Kolkiefen und Kolkflächen bzw. Massen der Variante 02C

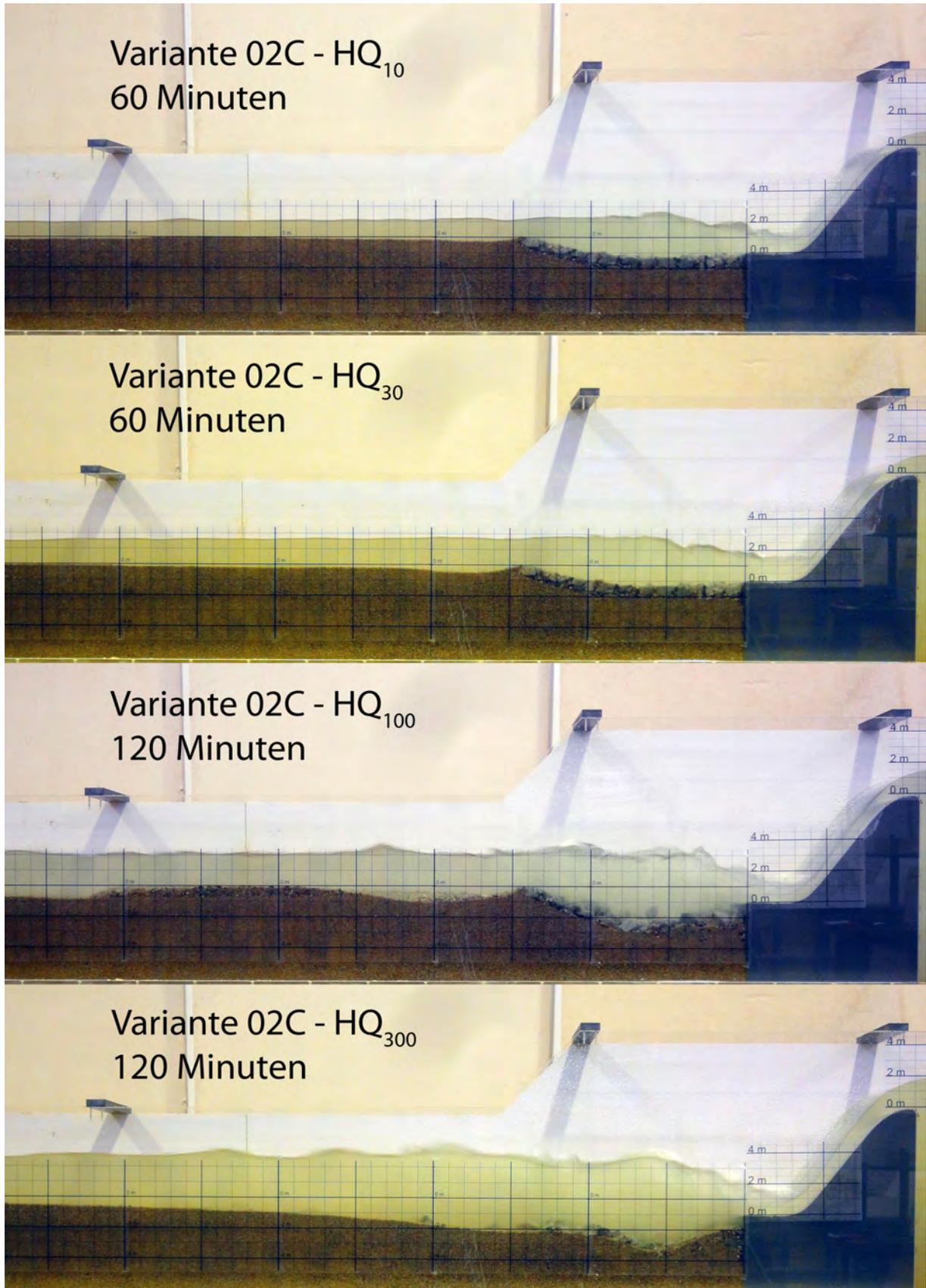


Abbildung 5.27: Fotografische Endkolkprofile der Variante 02C

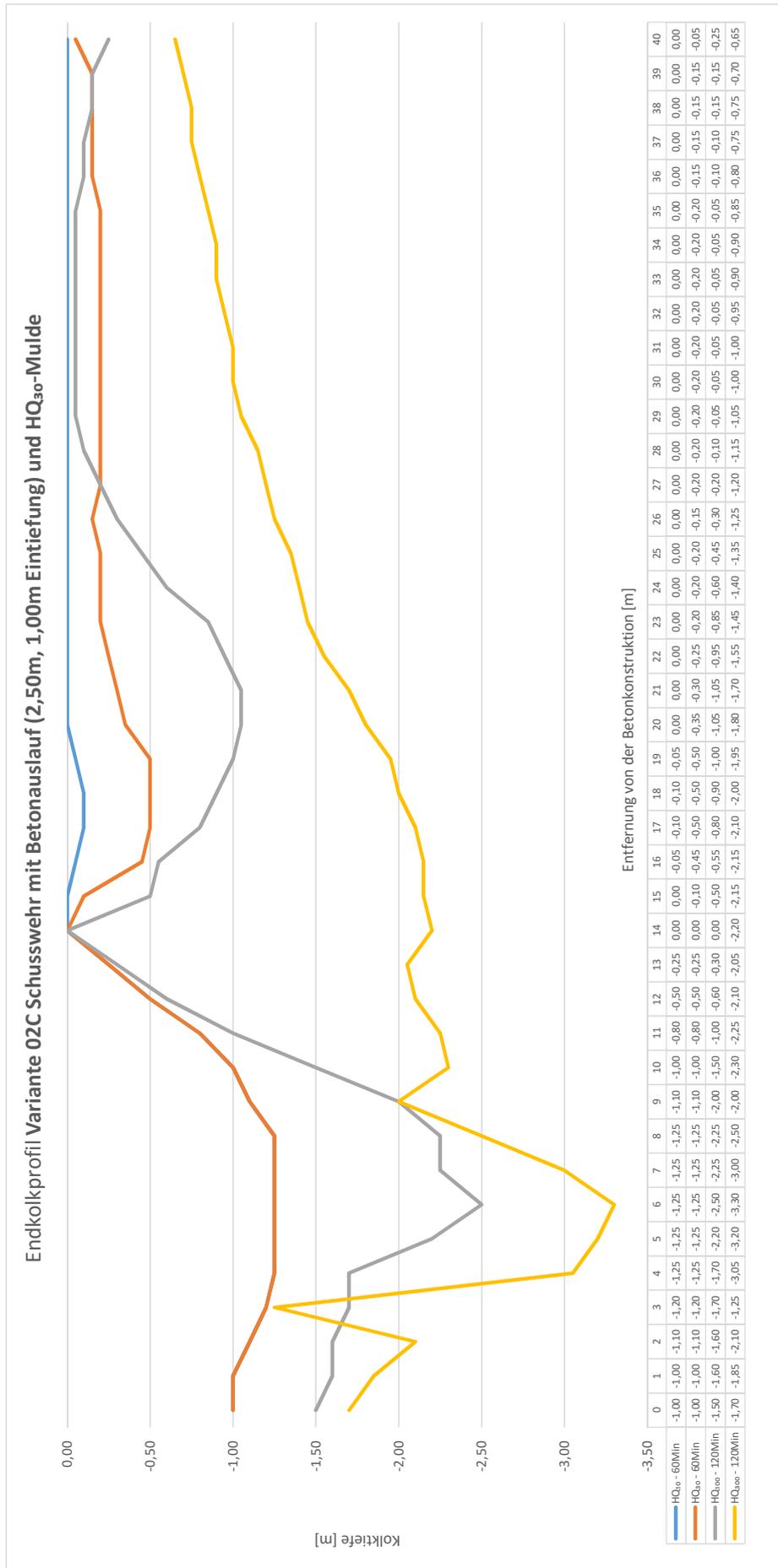


Abbildung 5.28: Endkolkprofile der Variante 02C

5.0.8 Variante 03A Stufenwehr mit 1,00m Stufen und tiefem Tosbecken

Mit der untersuchten Variante 03A wurde eine Alternative zu den übermittelten Planunterlagen des *Ingenieurbüros Tschernutter* (2015) entwickelt. Für den ersten Entwurf des Stufenwehres wurde eine Stufenhöhe und -breite von 1,00m mit einem kurzen Tosbecken bei 2,05m Eintiefung gewählt. Das Tosbecken besitzt zwei Gegenschwellen, jeweils 1,00m hoch, um wieder auf das Niveau der Flusssohle zu gelangen und danach einen mit Beton befestigten Bereich von 4,00m. Diese Dimensionierung hatte sich in Vorversuchen als vielversprechend erwiesen. Als Kolkschutz wurden, wie bei jeder Variante, 3,00m weit nach der befestigten Anlage Wasserbausteine der Klasse V (80-100cm) lose verlegt. Die endgültigen Abmessungen sind in Abbildung 3.7 zu sehen sowie im Anhang A.2 zu finden.

Bei den Abflüssen von HQ_{10} und HQ_{30} löst sich der Überfallstrahl bei der Wehrkrone ab und lag bei der zweiten Wehrstufe wieder an, wie in Abbildung 5.29 zu sehen ist. In den letzten Minuten der Untersuchung des HQ_{30} schlug das ganze Wehr zu und der Überfallstrahl lag vollständig an, somit wurde ein *Skimming Flow* erreicht. Dies ist auf die fehlende Belüftung zurückzuführen. Im Laufe der Zeit bildeten sich immer stärkere Unterdrücke aus. Es konnten kleine Wirbel auf den Stufen beobachtet werden. Die Hauptdeckwalze blieb immer im Tosbecken. Dadurch kam es nur zu sehr geringen Kolkerscheinungen weswegen der Versuch bei HQ_{10} nach 30 Minuten beendet wurde.

Bei einem HQ_{100} und HQ_{300} lag der Überfallstrahl von Anfang an vollständig am Wehrrücken an und es konnte von einem durchgehenden *Skimming Flow* gesprochen werden. Auf jeder Stufe konnten kleine Wirbel beobachtet werden, die zur Energieumwandlung betrogen. Auch bei diesen Abflüssen blieb die Hauptwalze im Tosbecken und bewirkte eine effektive Energieumwandlung. Deswegen stabilisierte sich die Kolkbildung in beiden Fällen nach 20 Minuten und schritt von da an nur mehr langsam voran, hauptsächlich durch strömungsbedingte Erosion.

Die Endkolkprofile sind in Abbildung 5.31 und 5.32 zu sehen. Abbildung 5.30 zeigt die maximalen Kolkiefen und die bewegten Kolkflächen beziehungsweise die Kolkmassen pro Wehrbreiten-Meter.

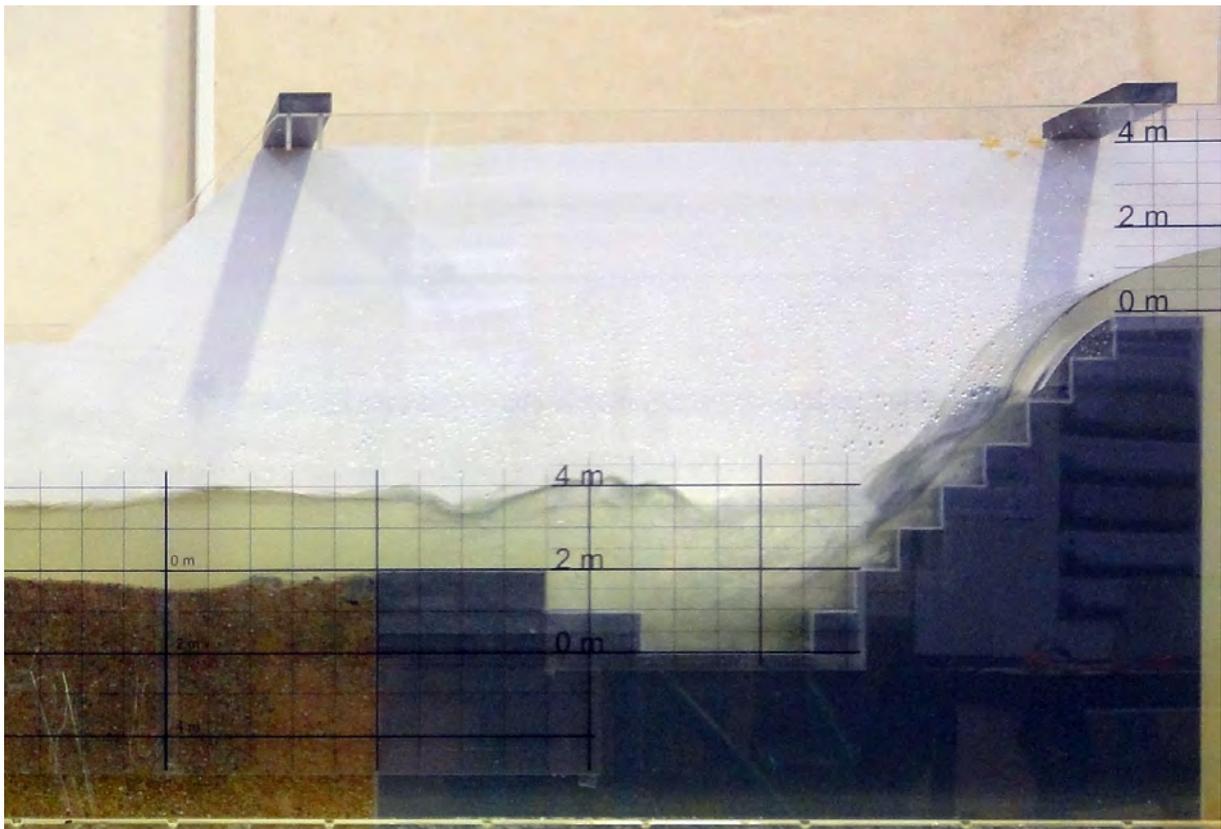


Abbildung 5.29: Ablösung des Überfallstrahls bei HQ_{30} nach 30 Minuten bei der Variante 03A

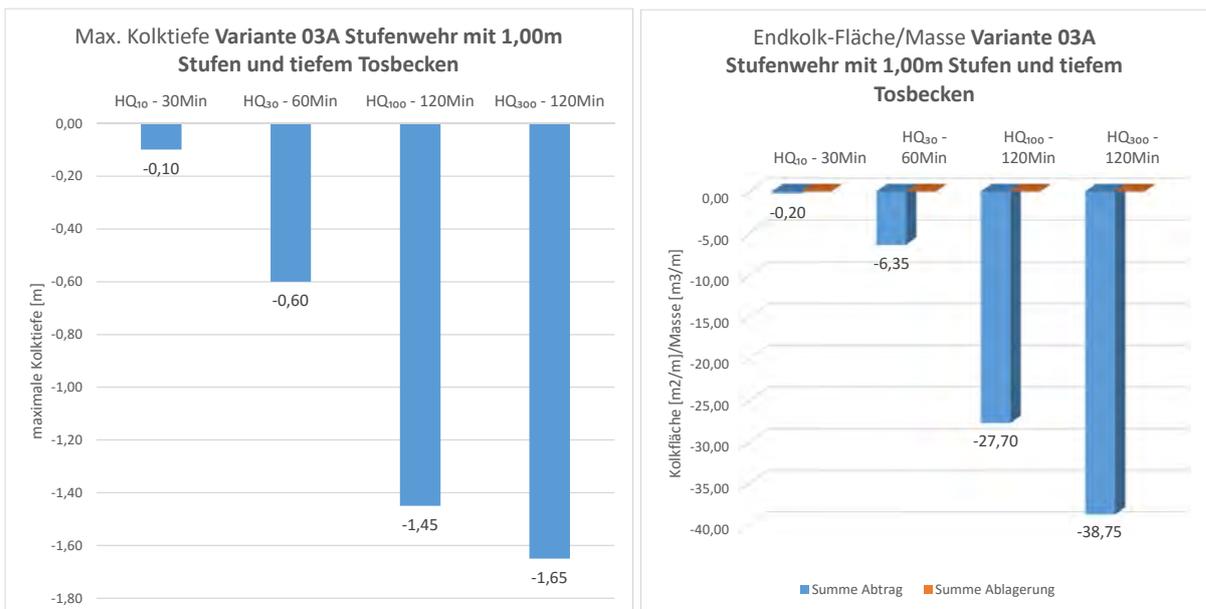


Abbildung 5.30: Maximale Kolkiefen und Kolkflächen bzw. Massen der Variante 03A

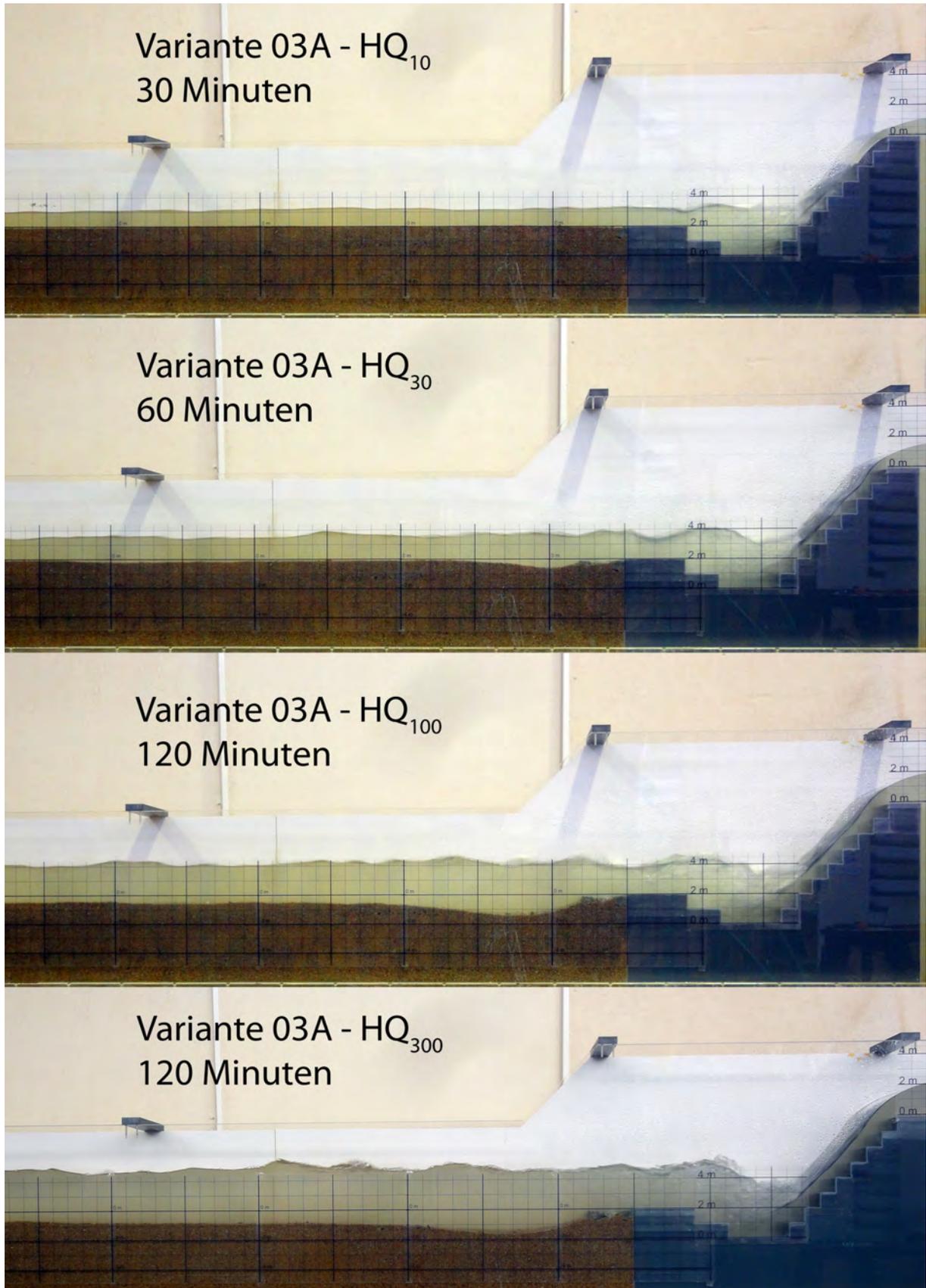


Abbildung 5.31: Fotografische Endkolkprofile der Variante 03A

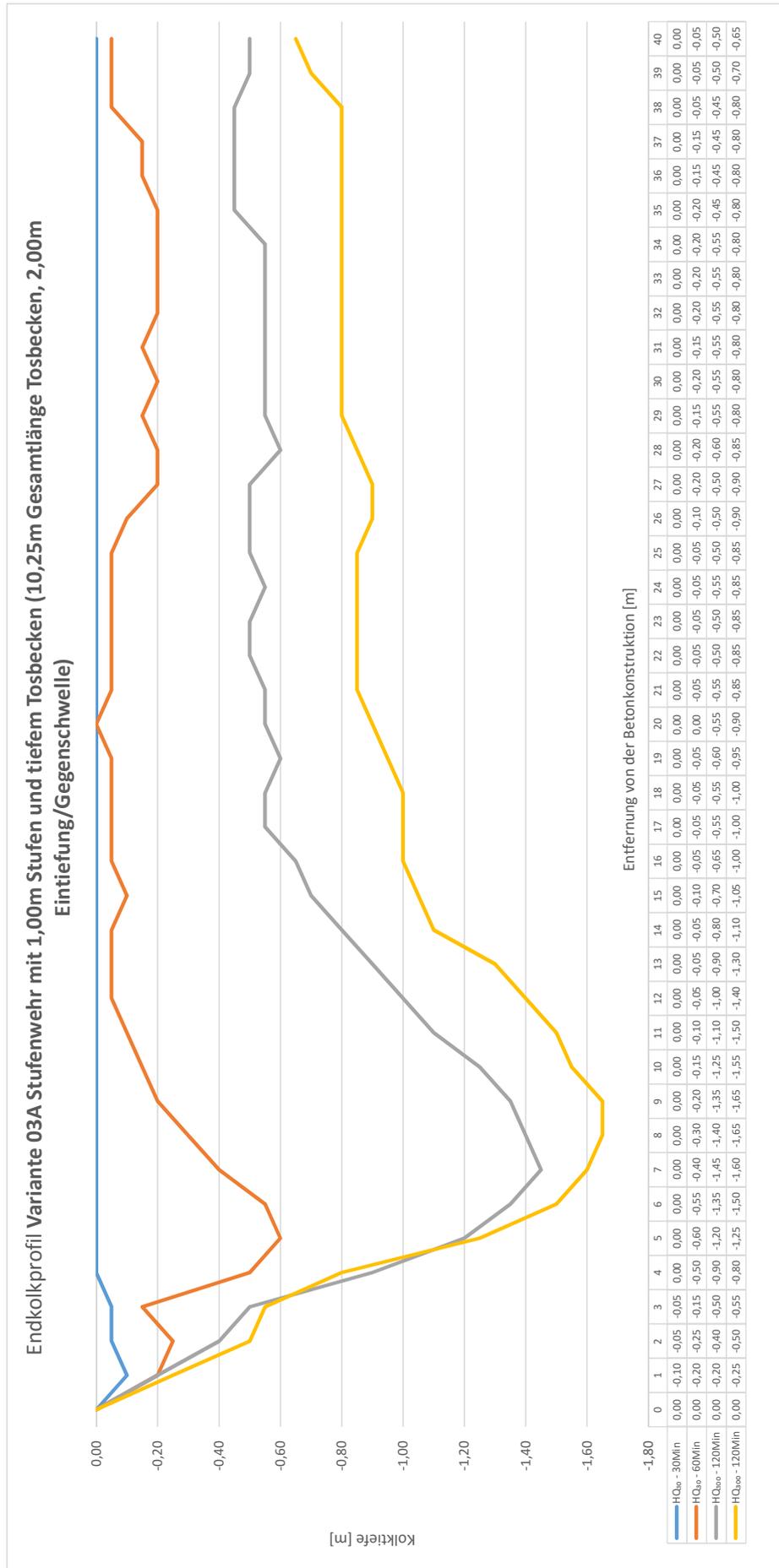


Abbildung 5.32: Endkolkprofile der Variante 03A

5.0.9 Variante 03B Stufenwehr mit 2,00m Stufen und tiefem Tosbecken

Für Variante 03B wurde Variante 02B angepasst. Die Stufengrößen wurde auf 2,00m verdoppelt, um eine bessere Kaskaden-Wirkung zu erzielen und damit mehr Energieumwandlung auf den Wehrrücken zu verlagern. Die restlichen Abmessungen blieben identisch zu Variante 03A.

Erneut kam es bei einem Abfluss von HQ_{10} zu einer Ablösung des Überfallstrahls bei der Wehrkrone. Dieser prallte auf der zweiten Stufe auf und löste sich wieder ab, um gegen die Gegenschwelle geworfen zu werden. Dies ist in Abbildung 5.33 zu sehen. Bei einem HQ_{30} löste sich der Strahl nur anfangs. Nach 5 Minuten lag dieser durch die fehlende Belüftung vollständig am Wehrrücken an. In beiden Fällen kam es erneut zu minimalen Kolkentwicklungen.

Bei HQ_{100} und HQ_{300} lag der Überfallstahl von Anfang an am Wehrrücken an. Durch händische Belüftung wurde gezeigt, dass die erste Stufe übersprungen werden würde. Um das Überspringen zu verhindern, empfiehlt sich bei einer genaueren Betrachtung eine bessere Ausformung der Überfallkrone, zum Beispiel durch kleinere Stufen in diesem Bereich. Bei beiden Abflüssen konnten deutliche Walzen auf den Stufen beobachtet werden und die Hauptwalze blieb im Tosbecken. Deswegen gab es nur eine langsame und geringe Kolkbildung.

Die Endkolkprofile sind in Abbildung 5.35 und 5.36 zu sehen. Abbildung 5.34 zeigt die maximalen Kolkiefen und die bewegten Kolkflächen beziehungsweise die Kolkmassen pro Wehrcbreiten-Meter.



Abbildung 5.33: Ablösung des Überfallstrahls bei HQ₁₀ nach 15 Minuten bei der Variante 03B

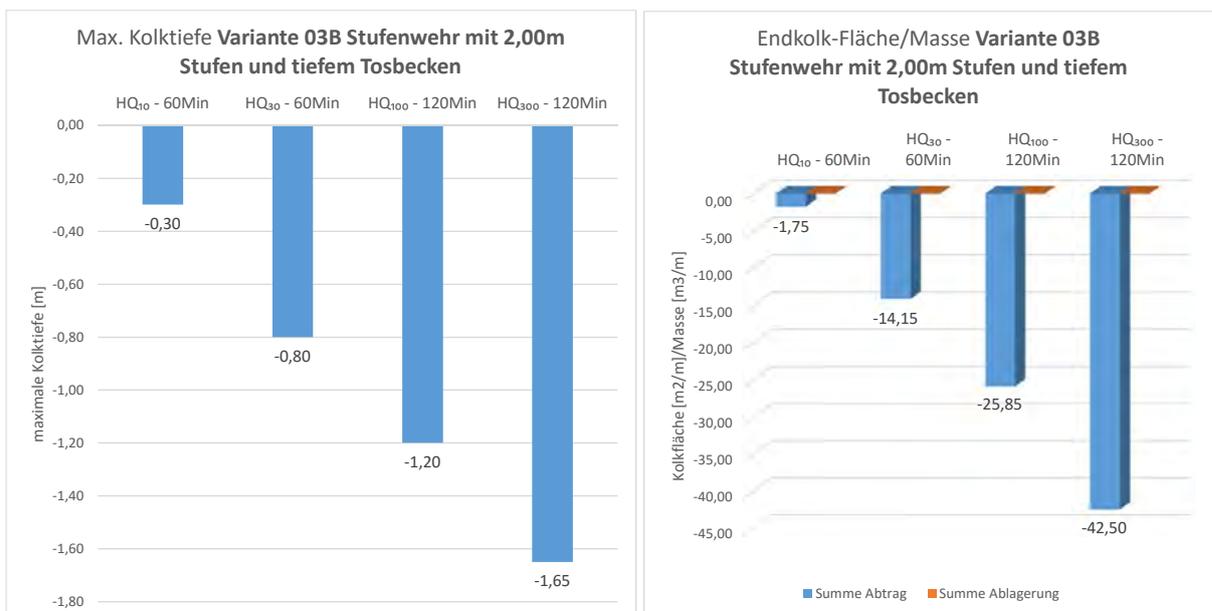


Abbildung 5.34: Maximale Kolkiefen und Kolkflächen bzw. Massen der Variante 03B

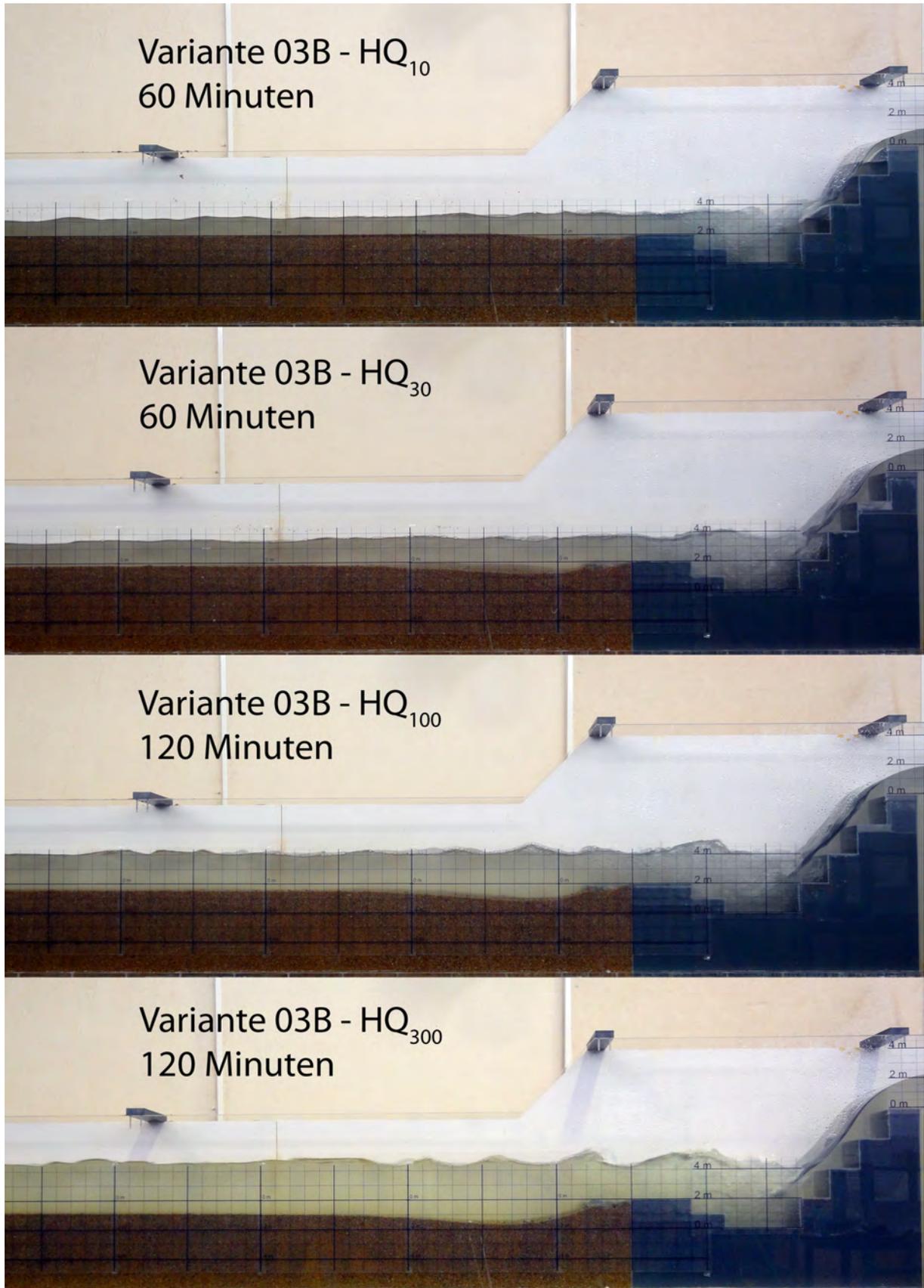


Abbildung 5.35: Fotografische Endkolkprofile der Variante 03B

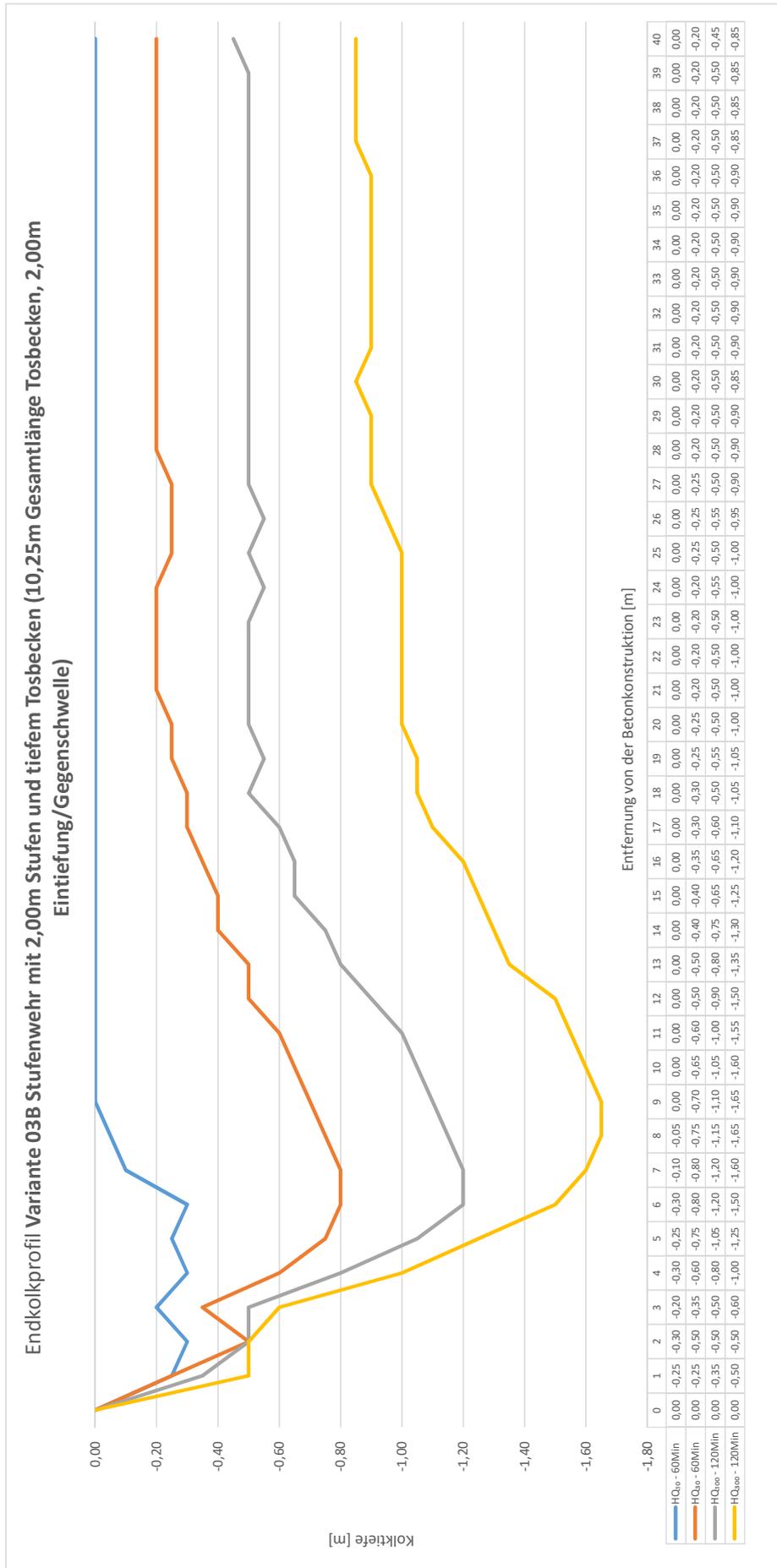


Abbildung 5.36: Endkolkprofile der Variante 03B

5.0.10 Variante 03C Stufenwehr mit 2,00m Stufen und „Herstellungsmulde“ aus Wasserbausteinen

Bei dieser Variante wurde das Tosbecken durch eine Mulde mit Wasserbausteinen der Klasse V (80-100cm), lose auf einer Filterschicht verlegt, ersetzt. Diese Mulde würde der Baugrube entsprechen, also ungefähr einer Böschung vom Wehrfuß in 25° bis zur Flusssohle ansteigend. Die Wehrform blieb unverändert mit 2,00m Stufen, wie bei Variante 02A. Die Maße sind in Abbildung 3.8 zu sehen sowie im Anhang A.2 zu finden.

Wie bei den vorigen Varianten löste sich der Überwurfstrahl bei einem HQ_{10} bei der Wehrkrone ab und traf auf der zweiten Stufe wieder auf. Nach 15 bis 30 Minuten schlug der Wehrrücken vollständig zu, wobei sich der Strahl bei der ersten Stufe nach 35 Minuten ablöste. Das Verhalten des Wurfstrahles wechselte somit unvorhersehbar, die Kolkbildung blieb aber minimal. Bei einem HQ_{30} lag der Überfallstrahl nach 5 Minuten völlig an und löste sich nicht mehr. Die Energieumwandlung durch Walzen fand größtenteils auf den Stufen statt, dadurch hielt sich die Kolkentwicklung in Grenzen. In beiden Fällen bewegten sich die Wasserbausteine der Mulde nicht.

Bei einem Abfluss, der einem HQ_{100} entsprach, schlug das Wehr von Anfang an völlig zu und ein *Skimming Flow* stellte sich ein. Einige Wasserbausteine versetzten sich in Schwingungen, bewegten sich aber nicht von ihrer Stelle. Die Kolkentwicklung schritt nur langsam und mäßig voran. Bei einem HQ_{300} kam es anfangs zu Umlagerungen der Wasserbausteine. Es bildete sich dadurch eine etwas steilere Mulde, die sich im restlichen Versuchsverlauf stabil hielt. Diese ist in Abbildung 5.37 erkennbar. Die letzte Reihe der Steine bewegte sich mit der Strömung und erzeugte einen unregelmäßigen Kolk, der sich bis zum Ende des Versuchs homogenisierte.

Die Endkolkprofile sind in Abbildung 5.39 und 5.40 zu sehen. Abbildung 5.38 zeigt die maximalen Kolkiefen und die bewegten Kolkflächen beziehungsweise die Kolkmassen pro Wehrbreiten-Meter.

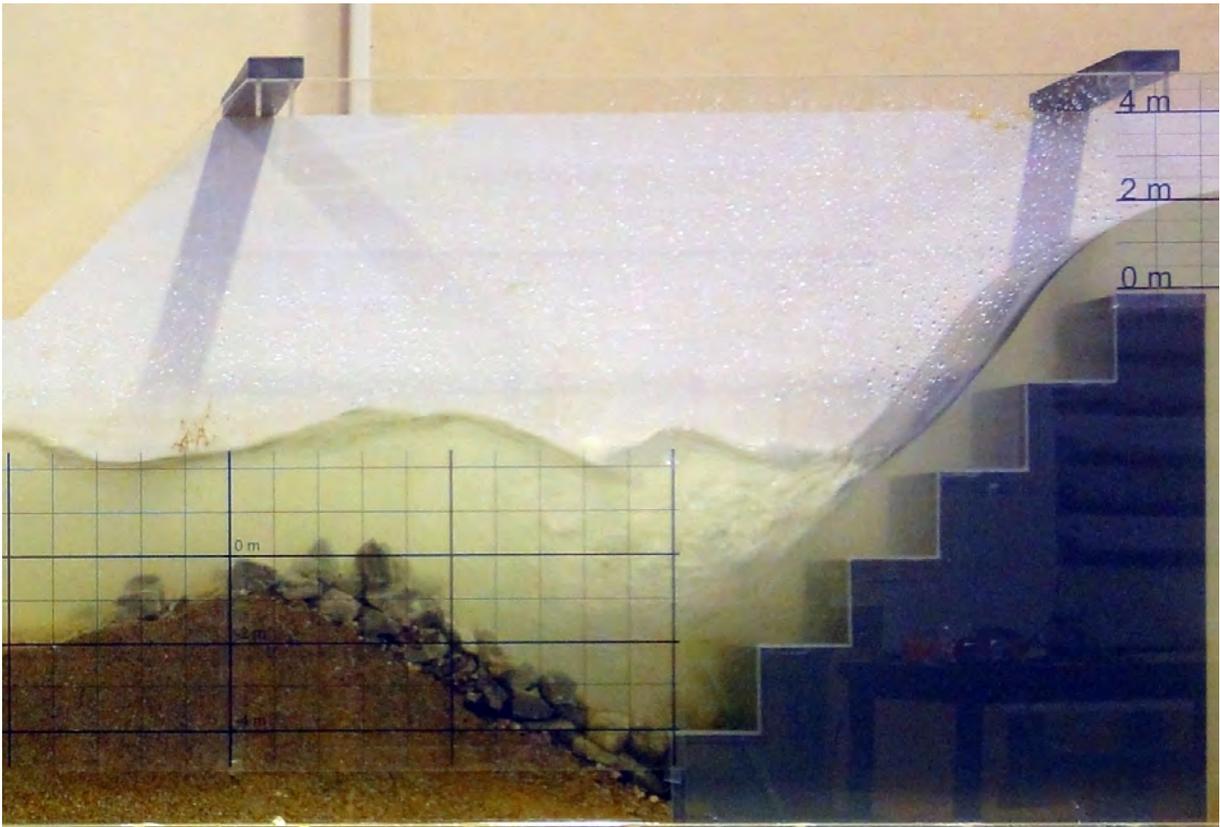


Abbildung 5.37: Umlagerung der Mulde bei HQ₃₀₀ nach 75 Minuten bei der Variante 03C

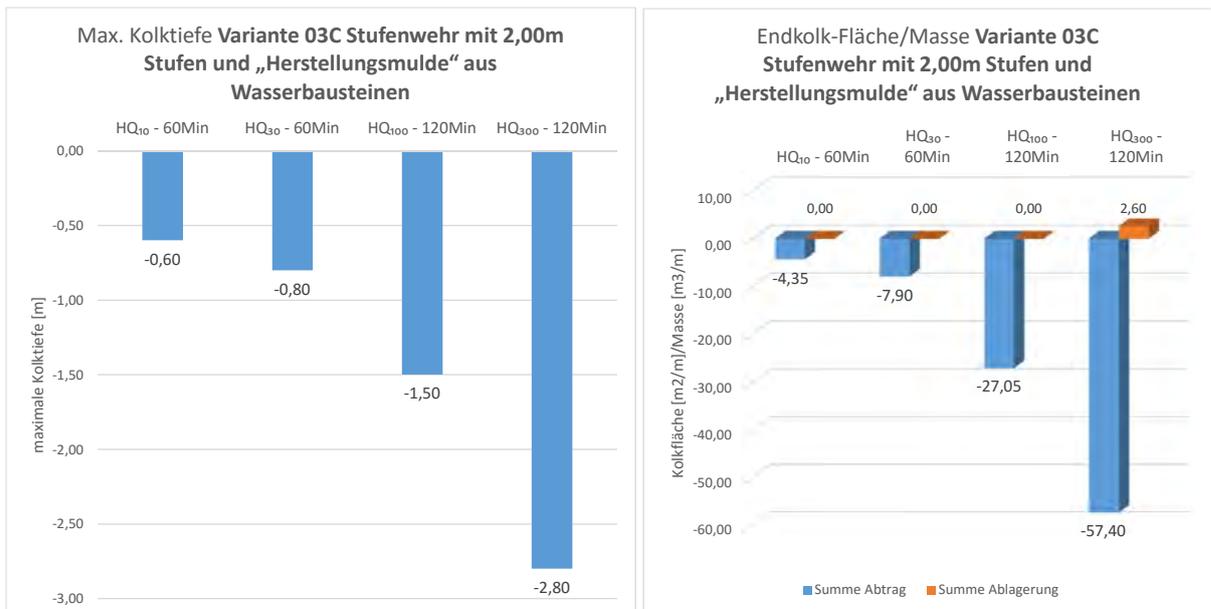


Abbildung 5.38: Maximale Kolkiefen und Kolkflächen bzw. Massen der Variante 03C

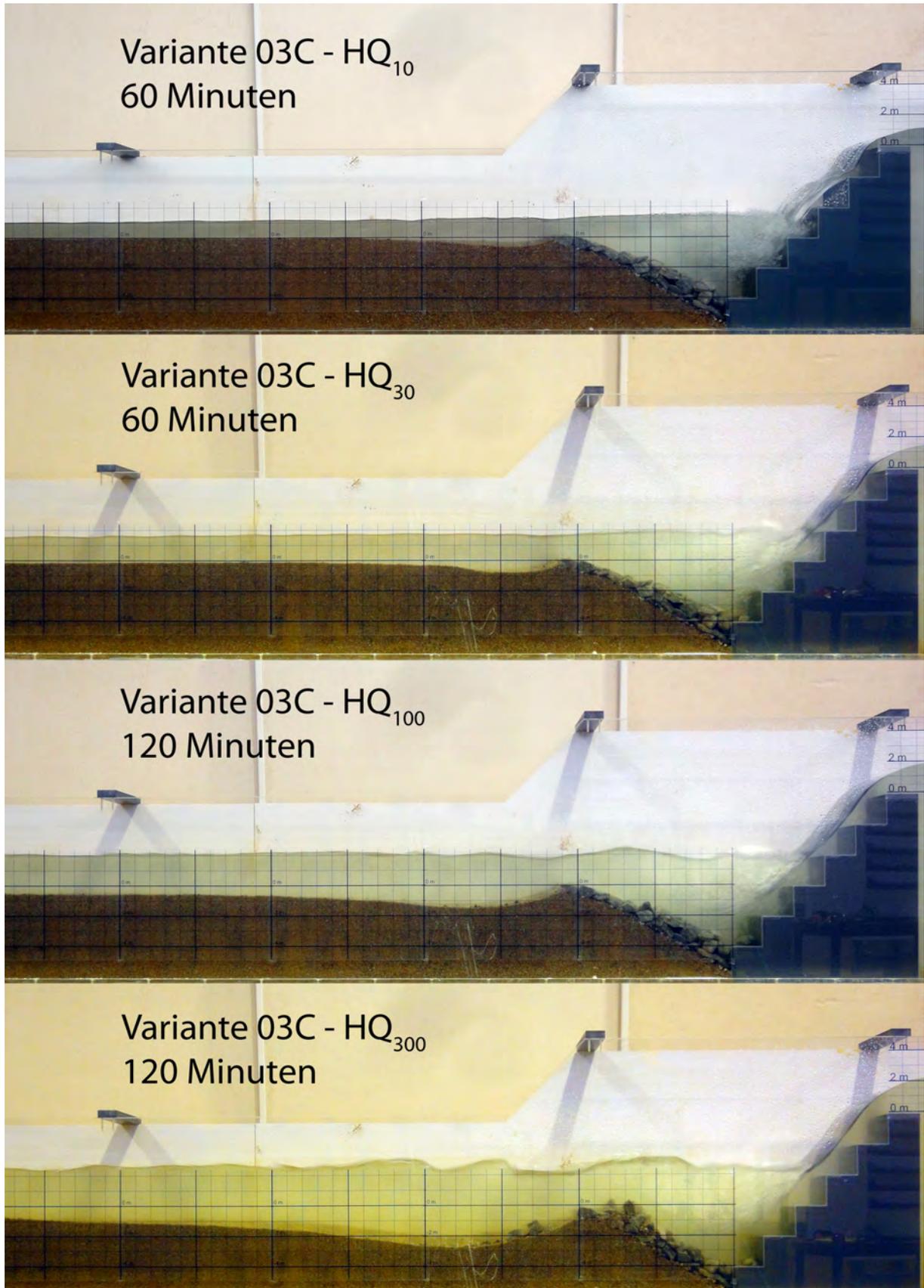


Abbildung 5.39: Fotografische Endkolkprofile der Variante 03C

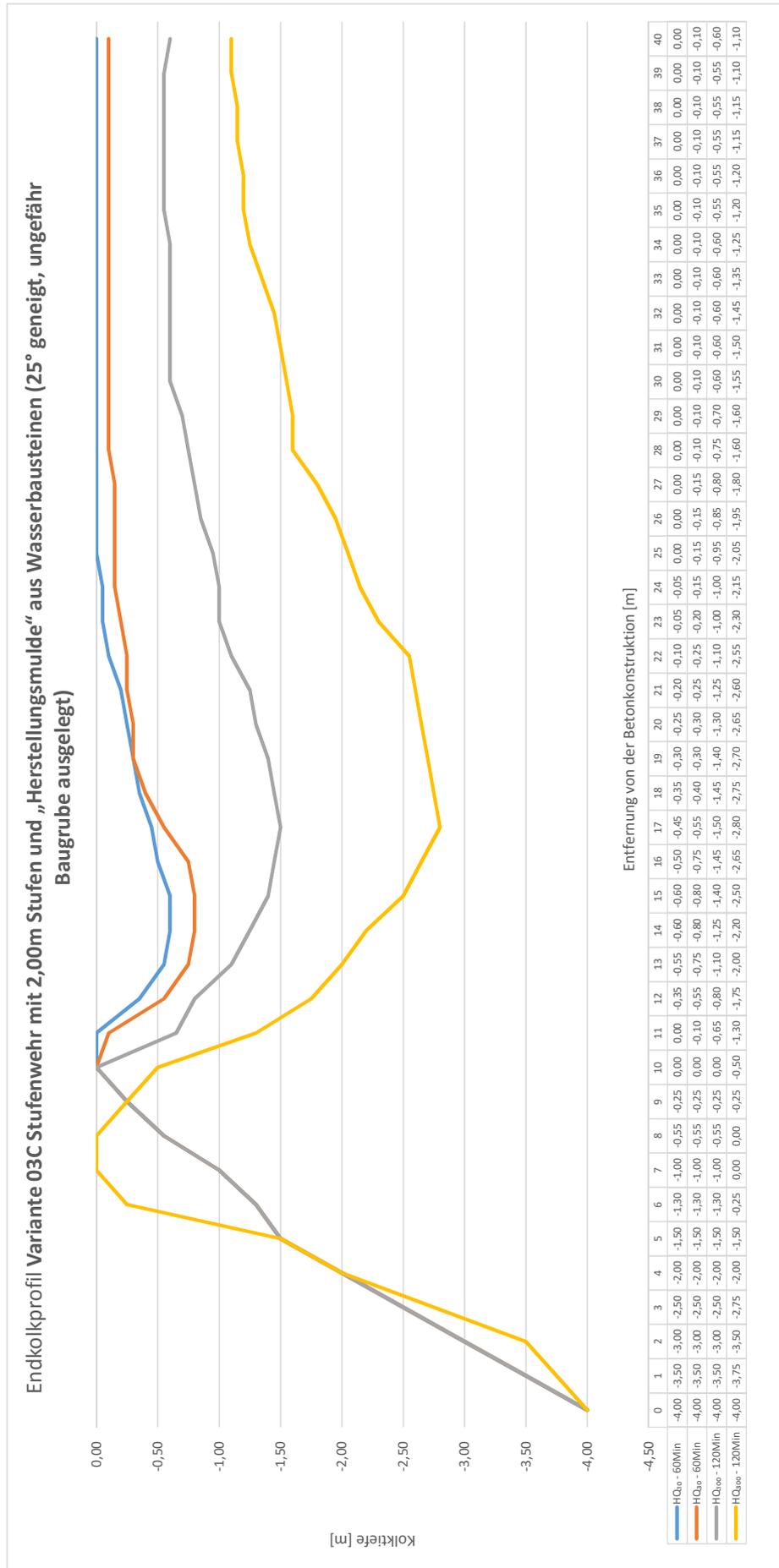


Abbildung 5.40: Endkolkprofile der Variante 03C

5.0.11 Variante 04A Schusswehr mit Störkörpertosbecken

Für die untersuchte Variante 04A wurde ein Störkörpertosbecken nach dem Tosbecken Typ 3 von *USBR* [3] entworfen. Die Abmessungen sind in Abbildung 3.10 zu sehen sowie im Anhang A.2 zu finden. Eine Anordnung der Störkörper im Modell ist auch in Abbildung 5.41 zu sehen.

Bei den Abflüssen von HQ_{10} und HQ_{30} blieb die Hauptwalze jeweils vor den mittig angeordneten Störzähnen. Es konnte eine effektive Energieumwandlung durch die Störkörper beobachtet werden und somit fiel auch die Kolkbildung sehr gering aus.

Die Hauptwalze der Energieumwandlung bei einem HQ_{100} und HQ_{300} befand sich genau über den Störzähnen, wodurch diese eine optimale Wirkung erzielten. Die Kolkentwicklung blieb dadurch gering und auch die strömungsbedingte Erosion der Flusssohle fiel geringer aus als bei den anderen Varianten. Dies ist auf die Störkörper zurückzuführen. Diese bewirken eine Vergleichmäßigung des Geschwindigkeitsprofils im Unterwasser. Dieser Effekt wird auch in der Fachliteratur [1] hervorgehoben.

Die Endkolkprofile sind in Abbildung 5.43 und 5.44 zu sehen. Abbildung 5.42 zeigt die maximalen Kolkiefen und die bewegten Kolkflächen beziehungsweise die Kolkmassen pro Wehrcbreiten-Meter.

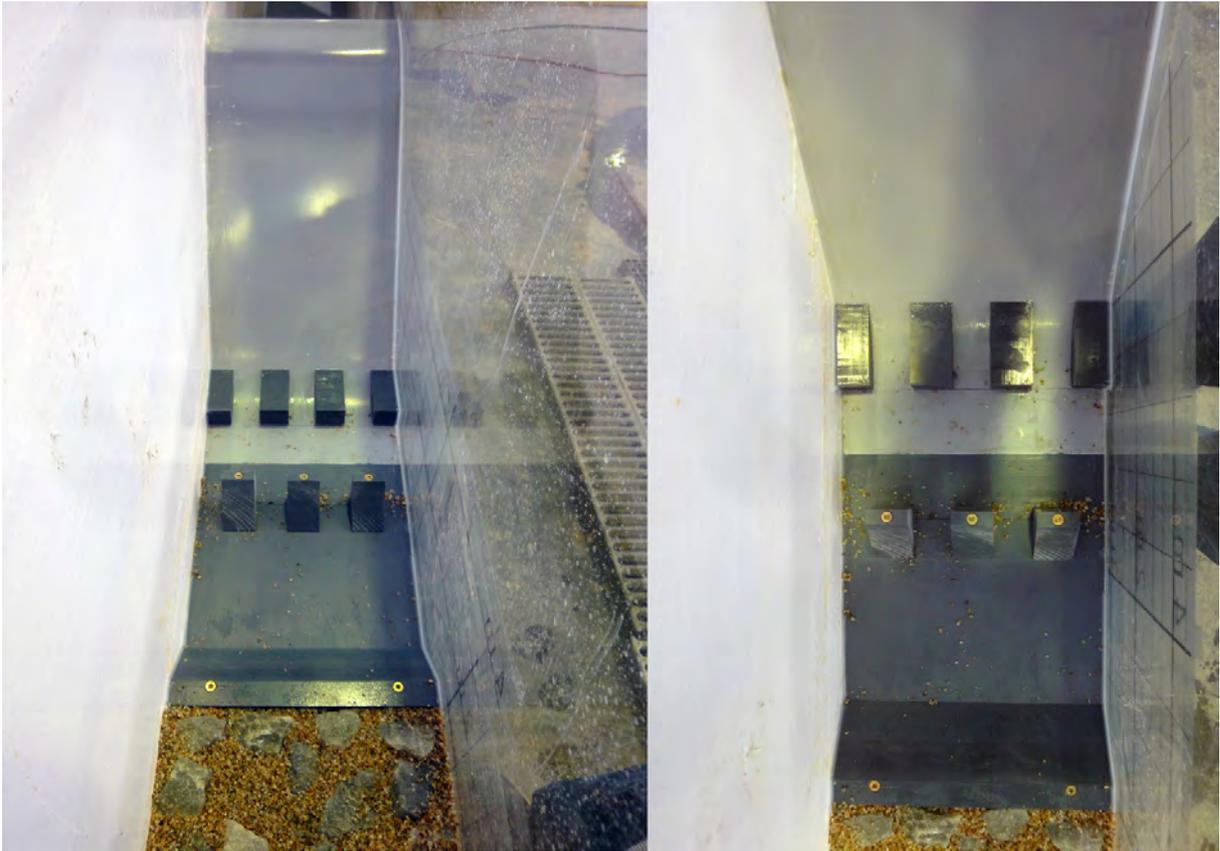


Abbildung 5.41: Modell des Störkörpertosbeckens der Variante 04A

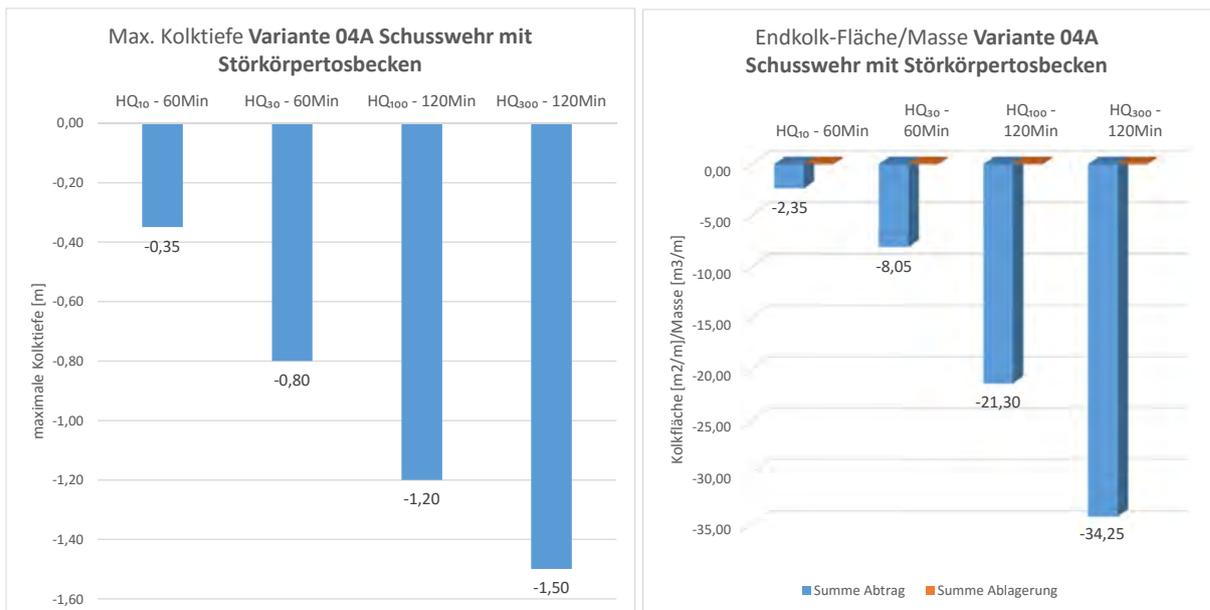


Abbildung 5.42: Maximale Kolkflächen und Kolkflächen bzw. Massen der Variante 04A

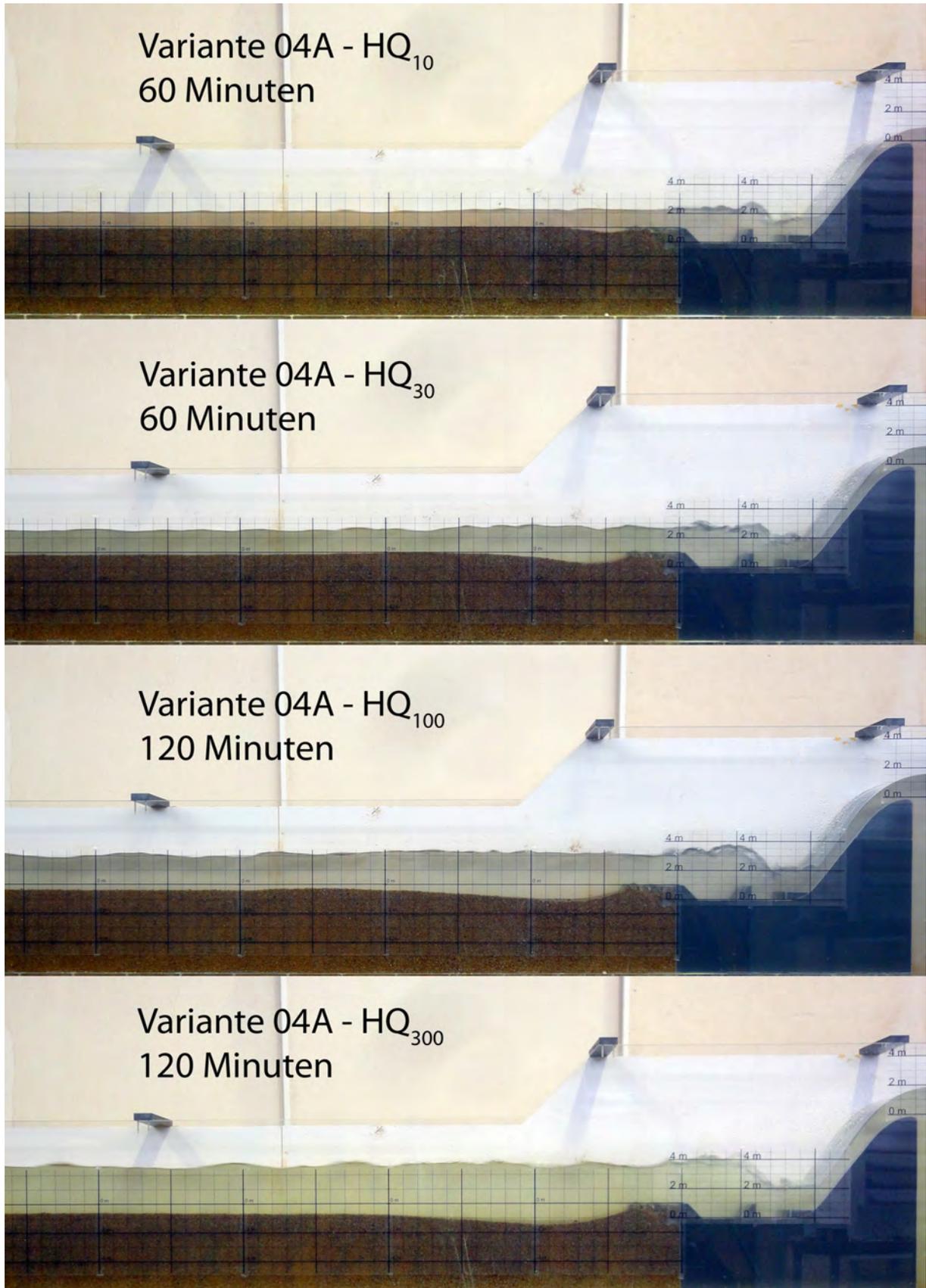


Abbildung 5.43: Fotografische Endkolkprofile der Variante 04A

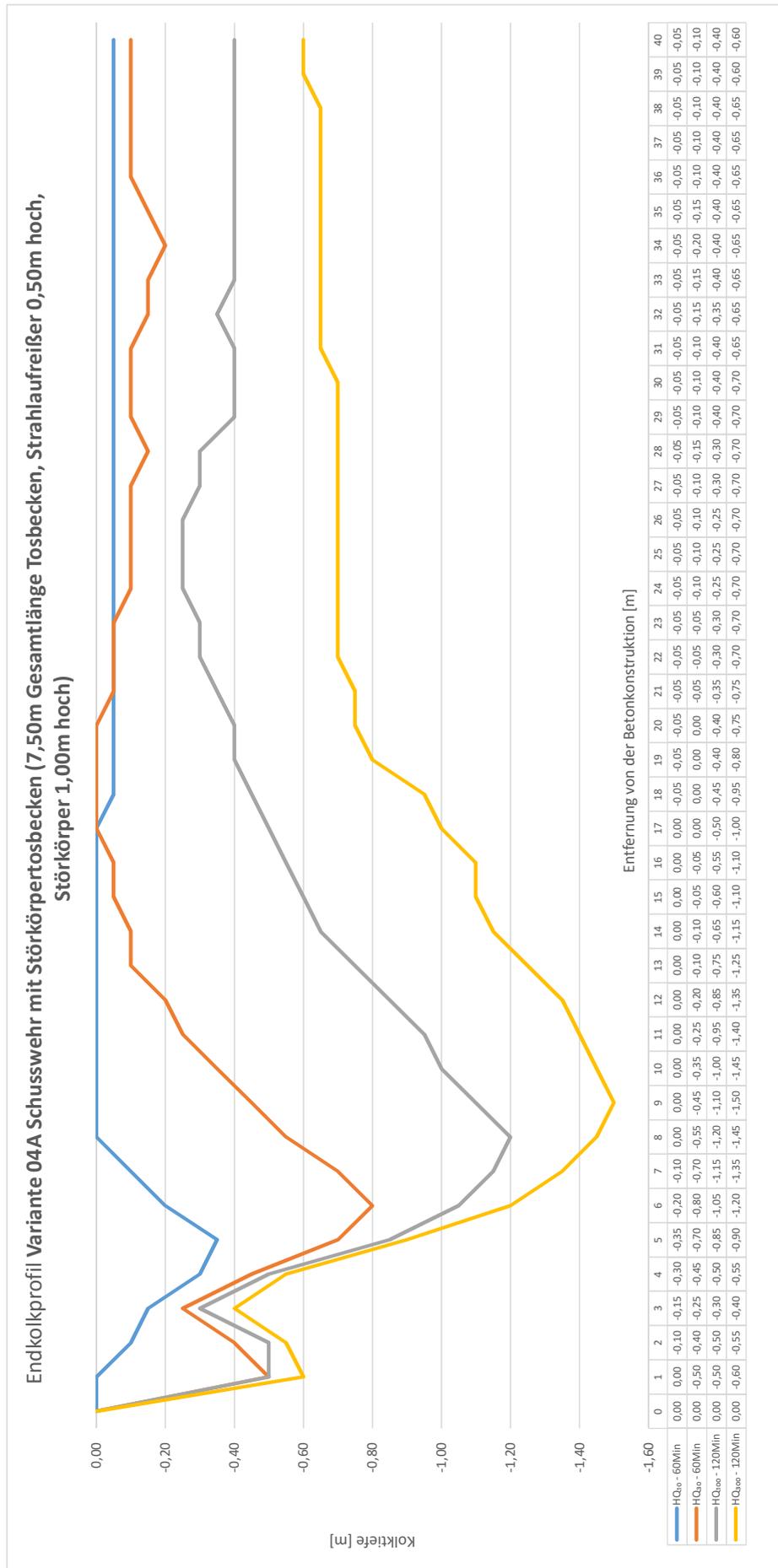


Abbildung 5.44: Endkolkprofile der Variante 04A

6 Vergleich der Ergebnisse

Im Folgenden werden die untersuchten Varianten zuerst untereinander bezüglich der Wehrtypen verglichen, um das Optimierungspotential zu bewerten. Am Ende dieses Kapitels werden alle Varianten gegenübergestellt und bewertet. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 6.1 bis 6.4 als Endkolkprofile zusammengefasst. In den Abbildungen 6.5 und 6.6 werden die Endkolkstiefen und Endkolkflächen verglichen.

6.1 Varianten 01 - Sturzwehr

Wie schon in Kapitel 5.0.1 erwähnt, führte die 1,00m hohe Gegenschwelle in Variante 01A zu einem zweiten Überfall. Vor allem bei den kleineren Abflüssen entstanden dadurch die größten überhaupt gemessenen Kolkstiefen von 2,05m bei HQ₁₀ und 3,30m bei HQ₃₀. Die Länge des Tosbeckens wurde nur bei HQ₁₀₀ und HQ₃₀₀ annähernd genutzt und es kam durch die Gegenschwelle zu einem Rückstau im Vergleich zum Unterwasser.

Die gekürzte Tosbeckenlänge und die nur 0,50m hohe Wehrschwelle aus Variante 01B führte zu einer deutlichen Verbesserung bei den Kolkstiefen und -mengen bei den Abflüssen von HQ₁₀ (1,30m) und HQ₃₀ (2,00m), wie in den Abbildungen 6.5 und 6.6 zu erkennen ist. Für die HQ₁₀₀ und HQ₃₀₀ Abflüsse hingegen bedeutete die Anpassung eine Verschlechterung, da die Länge des Tosbeckens für den Wechselsprung nicht ausreichte und sich in der unbefestigten Flusssohle ein Wechselsprung ausbildete, der zu den größten überhaupt gemessenen Kolkmassen führte (61,10m³/m beim HQ₁₀₀ und 81,60m³/m beim HQ₃₀₀).

Diese Tatsache legte das Untersuchen einer Mulde aus Wasserbausteinen nahe. Im ersten Fall, nach Variante 01C, wurde eine Mulde auf ein HQ₁₀₀ ausgelegt. Diese überstand alle Abflüsse ohne nennenswerten Schaden und brachte sogar die geringsten Kolkentwicklungen aller Varianten hervor, wie die Abbildungen 6.5 und 6.6 zeigen.

Da eine Mulde aus Wasserbausteinen nach einem HQ₁₀₀ ausgelegt aber eine sehr unwirtschaftliche Variante ist, wurde diese halbiert, um für ein HQ₃₀ optimal angepasst zu sein. Diese Variante 01D verhielt sich bei den niedrigen Abflüssen ähnlich wie die große Mulde aus Variante 01C. In beiden Fällen wurde bei einem HQ₃₀ eine Kolkstiefe von ungefähr 0,70m erreicht. Nur bei den beiden großen untersuchten Abflüssen, HQ₁₀₀ und HQ₃₀₀, nahm die Mulde Schaden, schnitt aber bei der Kolkentwicklung noch besser ab als die ursprüngliche Variante 01A mit einem langem Tosbecken (beim HQ₁₀₀ wurden nur 29,40m³/m statt 45,60m³/m erreicht).

6.2 Varianten 02 - Schusswehr

Bei den Varianten 02A und 02B stellte sich heraus, dass die verkürzte Tosbeckenvariante in 02B annähernd dieselbe Kolkentwicklung hervorbrachte wie in der ursprünglichen Variante 02A. Die Abweichungen lagen teilweise nur im 10%-Bereich. Das lässt den Schluss zu, dass die verwendeten Bemessungsformeln nach *Blind* [1] oder *Smetana* [8] eine eher großzügige Tosbeckenlänge aufweisen, die in Wirklichkeit für den Wechselsprung nicht notwendig ist.

Am besten verhielt sich aber Variante 02C mit der Mulde aus Wasserbausteinen, wie in den Abbildungen 6.5 und 6.6 zu sehen ist. Selbst bei Abflüssen von HQ_{100} und HQ_{300} , bei denen die Wasserbausteine umgelagert wurden, entwickelte sich ein geringerer Kolk und die Werte für die Kolkmassen blieben geringer als bei den Varianten 02A und 02B. Dies ist auf die Flexibilität einer Mulde aus Wasserbausteinen zurückzuführen. Diese gibt der Mulde die Möglichkeit, sich dem jeweiligen Abfluss formmäßig optimal anzupassen. Die bewegenden Wasserbausteine stabilisieren die Flusssohle und verhindern ein weiteres Vorschreiten der Kolkbildung.

6.3 Varianten 03 - Stufenwehr

Die Modellversuche mit unterschiedlichen Stufengrößen in Variante 03A und 03B ergaben keine signifikanten Unterschiede. Die Kolkturen und Kolk mengen sind in beiden Fällen annähernd gleich (in beiden Fällen beträgt die maximale Kolk tiefe beim HQ_{300} 1,65m), wie in den Abbildungen 6.5 und 6.6 erkennbar ist. Im Allgemeinen ist in der Fachliteratur, im Vergleich mit anderen Wehrformen, wenig zu Stufenwehren zu finden. Deswegen sollten, um das Verhalten besser beschreiben zu können, weitere Untersuchungen veranlasst werden.

Der Unterschied zwischen den 1,00m Stufen in Variante 03A und den 2,00m Stufen in Variante 03B liegt in den verschiedenen Abflussbildern, ob der Überfallstrahl am Wehrrücken anliegt oder sich bei Stufen ablöst. Dieses Verhalten ist stark von der Belüftung abhängig, weswegen kein einheitliches Muster erkannt werden konnte. Um das Verhalten zu beeinflussen, empfiehlt sich bei einer genaueren Betrachtung eine bessere Ausformung der Überfallkrone, zum Beispiel durch kleinere Stufen in diesem Bereich. Um eine vollständige Kaskadenwirkung zu erzielen, müssten die Stufen mindestens doppelt so breit wie hoch ausgeführt werden. Dieses Vorgehen würde jedoch die Aufstandsfläche des Wehres wesentlich vergrößern und müsste im Hinblick auf wirtschaftliche Überlegungen bewertet werden.

Das Stufenwehr in Variante 03C, mit der Herstellungsmulde aus Wasserbausteinen, verhielt sich bei niedrigen Abflüssen ähnlich wie die beiden Varianten zuvor. Das Wasserbecken in

der Mulde war groß genug, um die Energieumwandlung effektiv umzusetzen. Nur HQ₃₀₀ erzeugte Kräfte, um die Wasserbausteine zu bewegen und die Mulde umzugestalten. Das ist auch der Grund für die stärkere Kolkbildung in den Abbildungen 6.5 und 6.6.

6.4 Variante 04 - Störkörper

Von Variante 04A gab es keine weiteren Versuche, da sich die Anordnung der Störkörper nach den Bemessungunterlagen als sehr günstig herausstellte. Das bestätigt, dass diese Formen von Tosbecken von *USBR* [3] schon ausführlich untersucht worden sind und die Bemessungsformeln sehr gut zutreffen. Auch der in der Fachliteratur [1] beschriebene Effekt einer Vergleichmäßigung des Geschwindigkeitsprofils im Unterwasser konnte beobachtet werden und spiegelt sich in den geringen Kolkmengen wieder. Es wurde zum Beispiel beim HQ₃₀₀ mit 1,50m die geringste Kolkentiefe von allen Varianten gemessen.

6.5 Vergleich aller Varianten

In den Abbildungen 6.1 bis 6.4 sind alle Endkolkprofile zusammengefasst. In den Abbildungen 6.5 und 6.6 werden die Endkolkiefen und Endkolkflächen verglichen.

Man kann in diesen Grafiken erkennen, dass sich die Varianten 01 mit dem Sturzwehr im Bezug auf die Kolkentwicklung nicht so effizient wie andere Varianten verhalten. Erkennen kann man dies an den Kolkiefen, die die Maxima unter der ganzen Versuchsreihe von 3,85m erreichen. Dies ist nicht unbedingt das Resultat der Wehrform. Es lässt sich vermuten, dass die fehlende Eintiefung einen großen Beitrag dazu leistet. Die Sturzwehr-Varianten sind die einzigen ohne Eintiefung. Das Abflussbild während den Versuchen bestätigt das damit verbundene, negative Verhalten.

Die untersuchten Varianten 02 mit einem Schusswehr weisen weniger Kolkentwicklung auf als die Modelle mit Sturzwehr. Eine noch effizientere Energieumwandlung findet bei den Varianten 03 durch das Stufenwehr und einem tiefen Tosbecken statt. Im Schnitt sind bei diesen Varianten die Kolkiefen und die Kolk mengen deutlich geringer. In derselben Größenordnung bewegt sich auch Variante 04A mit dem Störkörper-tosbecken. Vor allem bei HQ₁₀₀ und HQ₃₀₀ beweisen die Störkörper ihre Effektivität gegenüber den anderen Varianten. Es wird zum Beispiel bei HQ₃₀₀ mit 1,50m die geringste Kolkentiefe von allen Varianten gemessen.

Bei allen Wehrtypen zeigt sich, dass sich die Varianten mit einer Tosbeckenausführung aus Wasserbausteinen ähnlich verhalten wie Betontosbecken und bei den niedrigen Abflüssen teilweise sogar deutlich besser. Die Rauhigkeit der Wasserbausteine hilft, die Energieum-

wandlung bei geringen Abflüssen zu verbessern. So liegen die maximalen Kolk-tiefen bei Variante 02C für ein HQ₁₀ und HQ₃₀ mit 0,10m und 0,50m deutlich unter allen anderen Betontos Becken. Bei einem HQ₁₀₀ und HQ₃₀₀ ist die Anpassungsfähigkeit der Muldenform durch Steinbewegungen von großen Vorteil. Damit stellen Tosbecken aus Wasserbausteinen eine adäquate Alternative zu Betonlösungen dar.

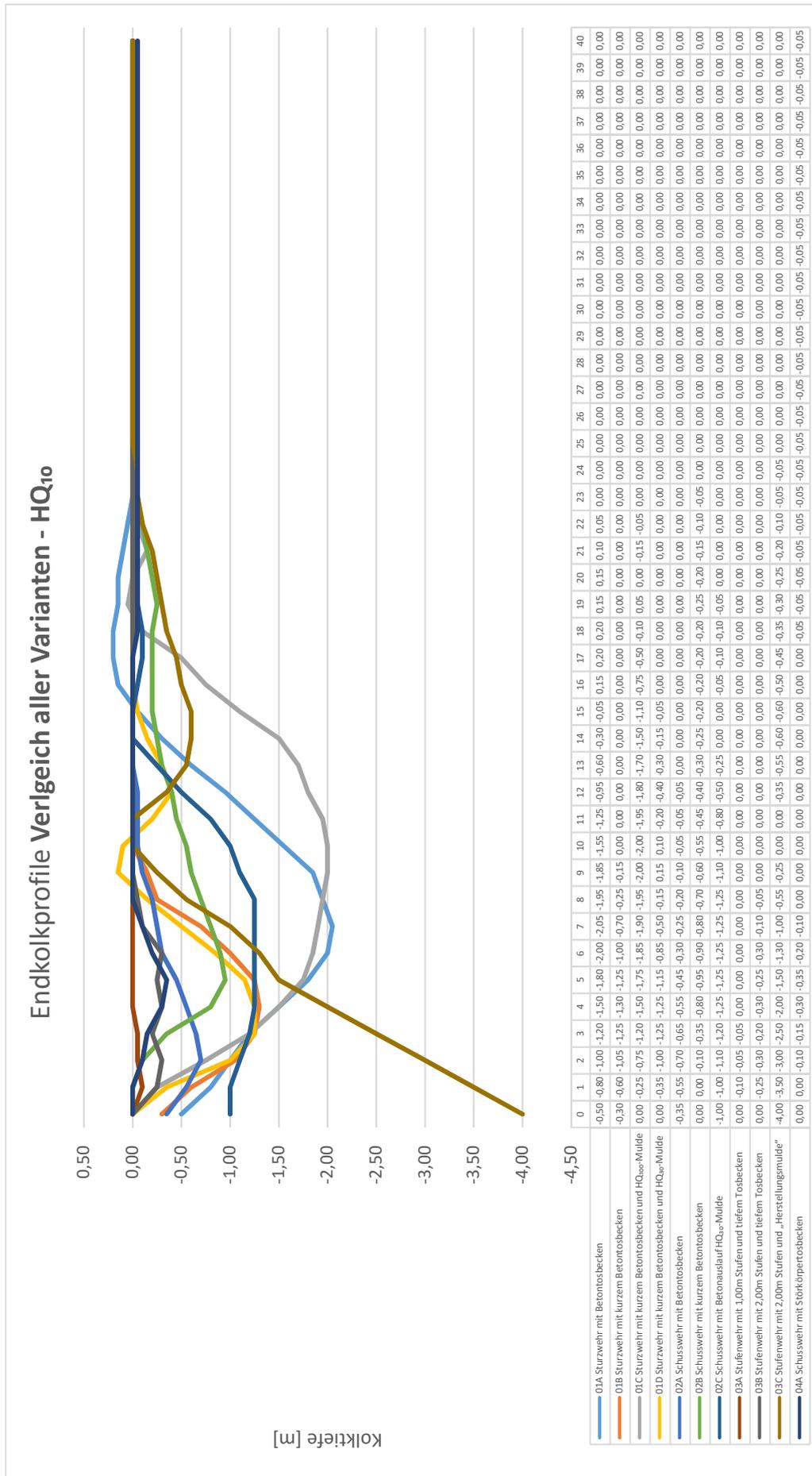


Abbildung 6.1: Endkolkprofile aller Varianten bei HQ₁₀

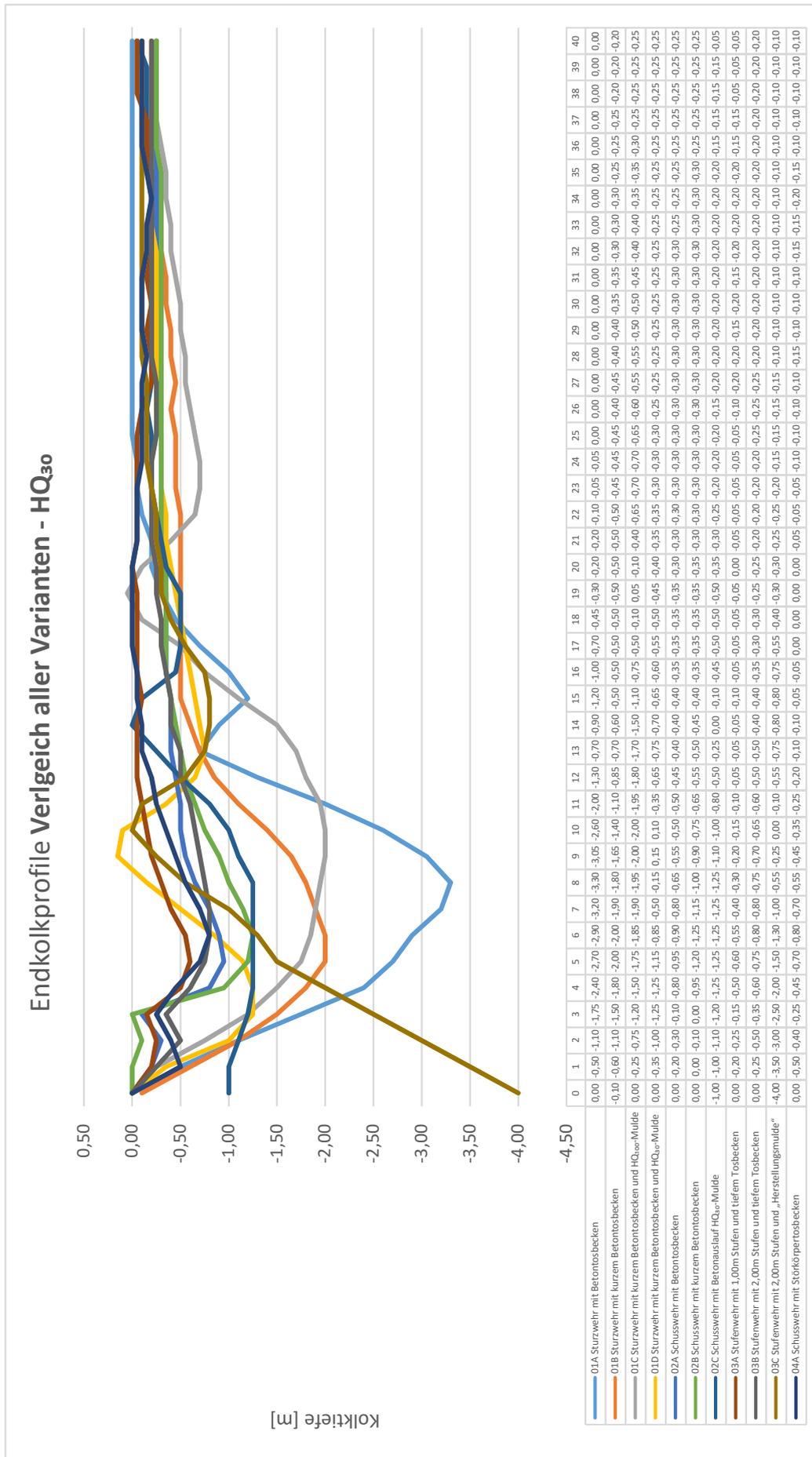


Abbildung 6.2: Endkolkprofile aller Varianten bei HQ₃₀

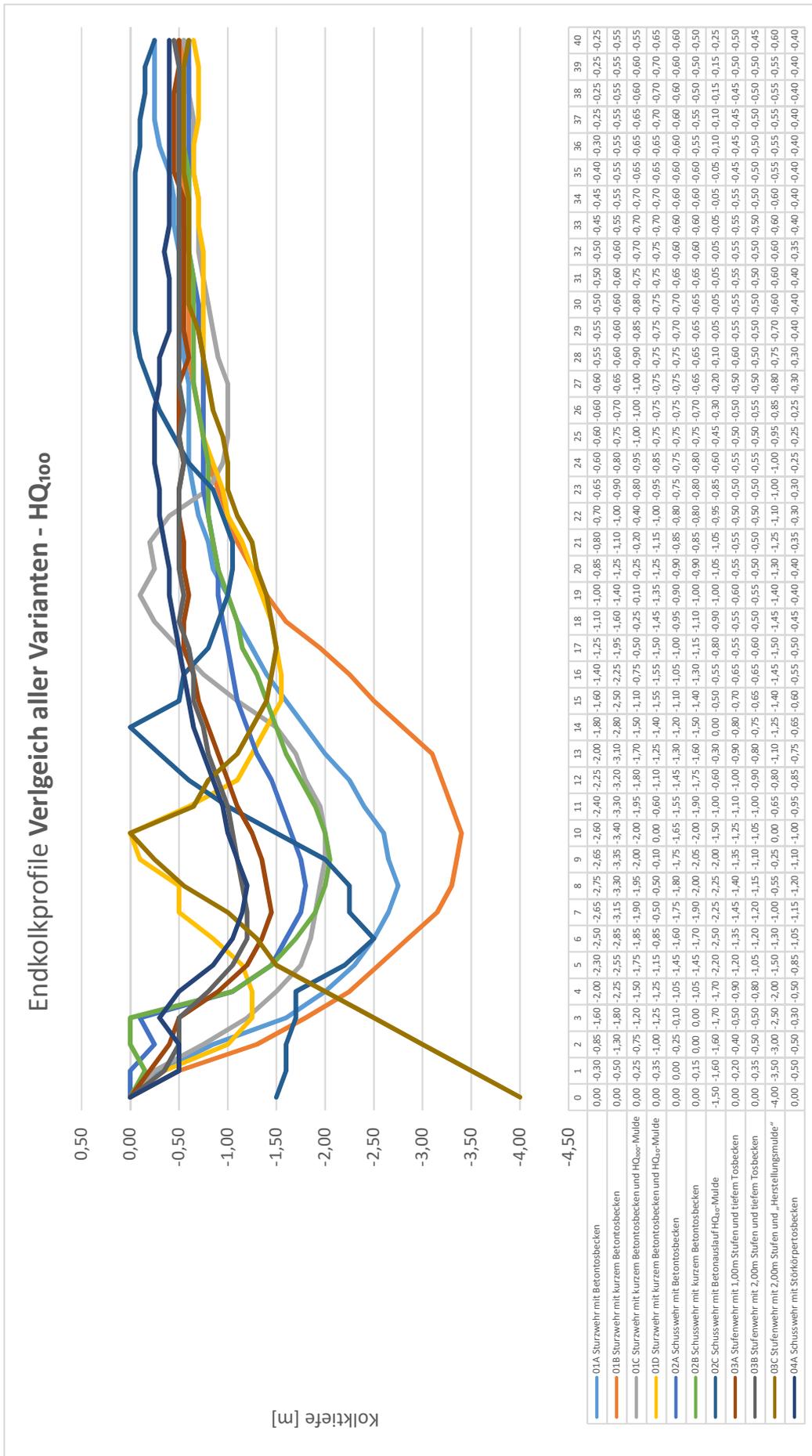


Abbildung 6.3: Endkolkprofile aller Varianten bei HQ₁₀₀

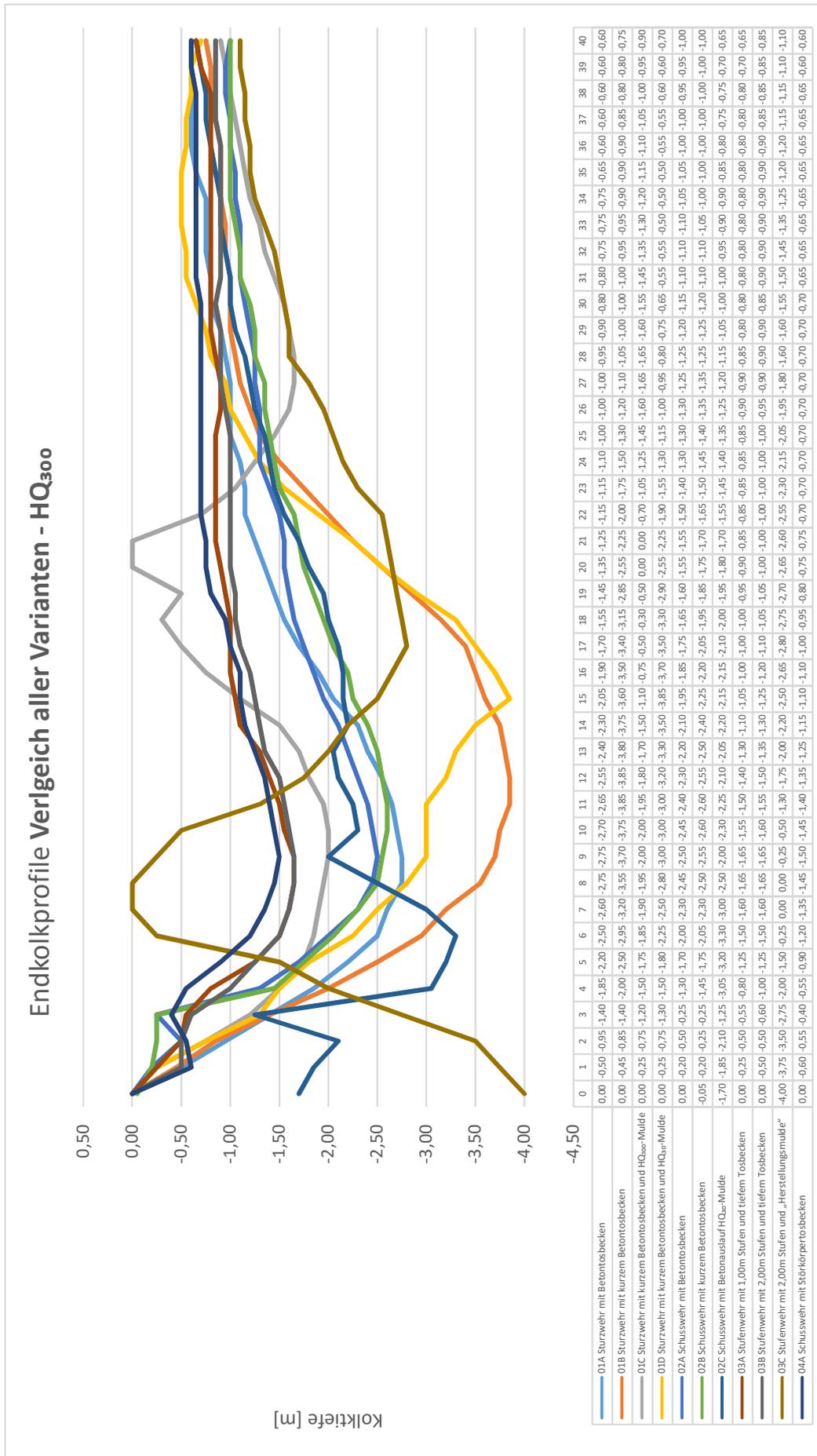


Abbildung 6.4: Endkolkprofile aller Varianten bei HQ₃₀₀

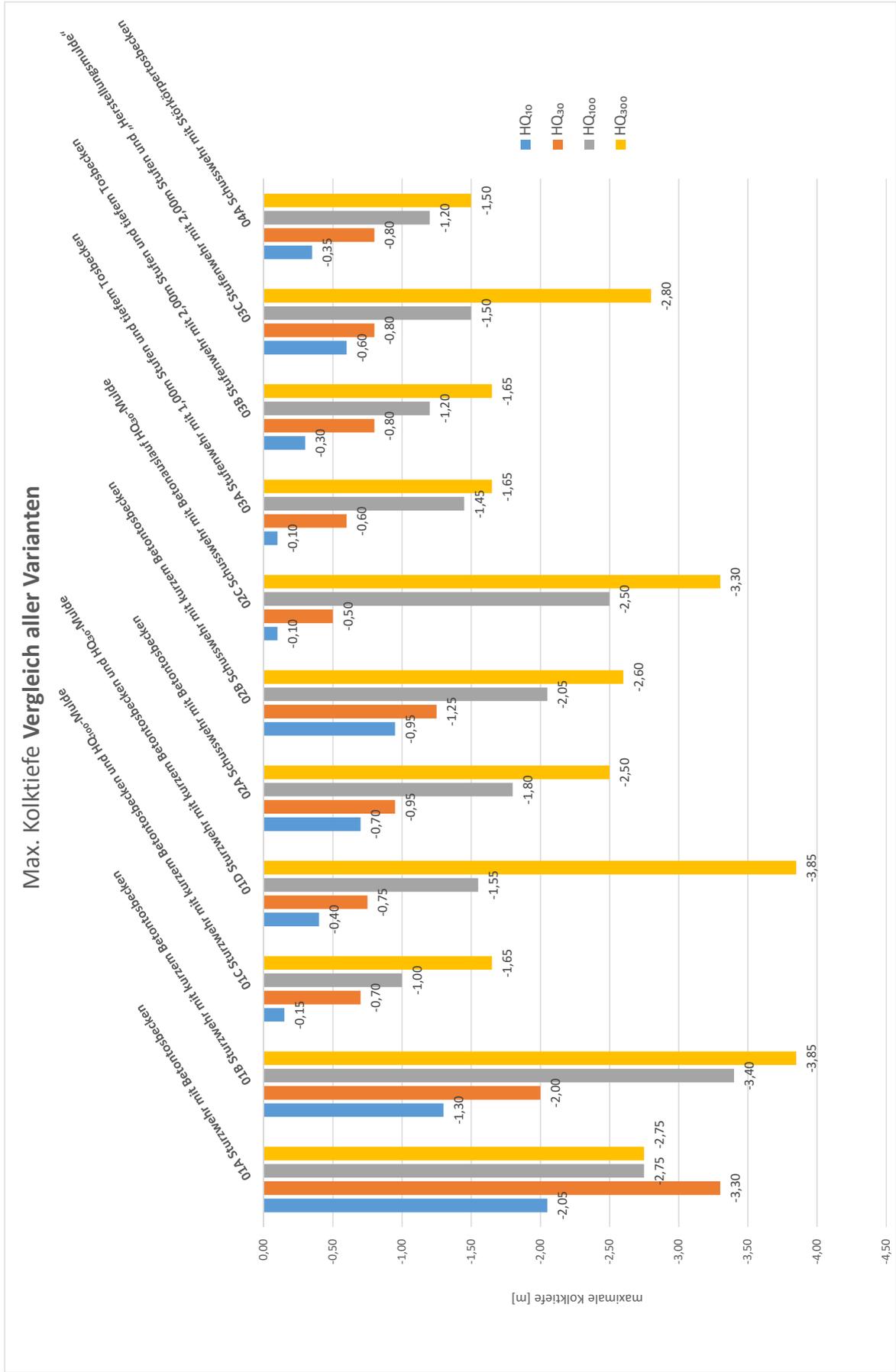


Abbildung 6.5: Maximale Endkolkiefen aller Varianten

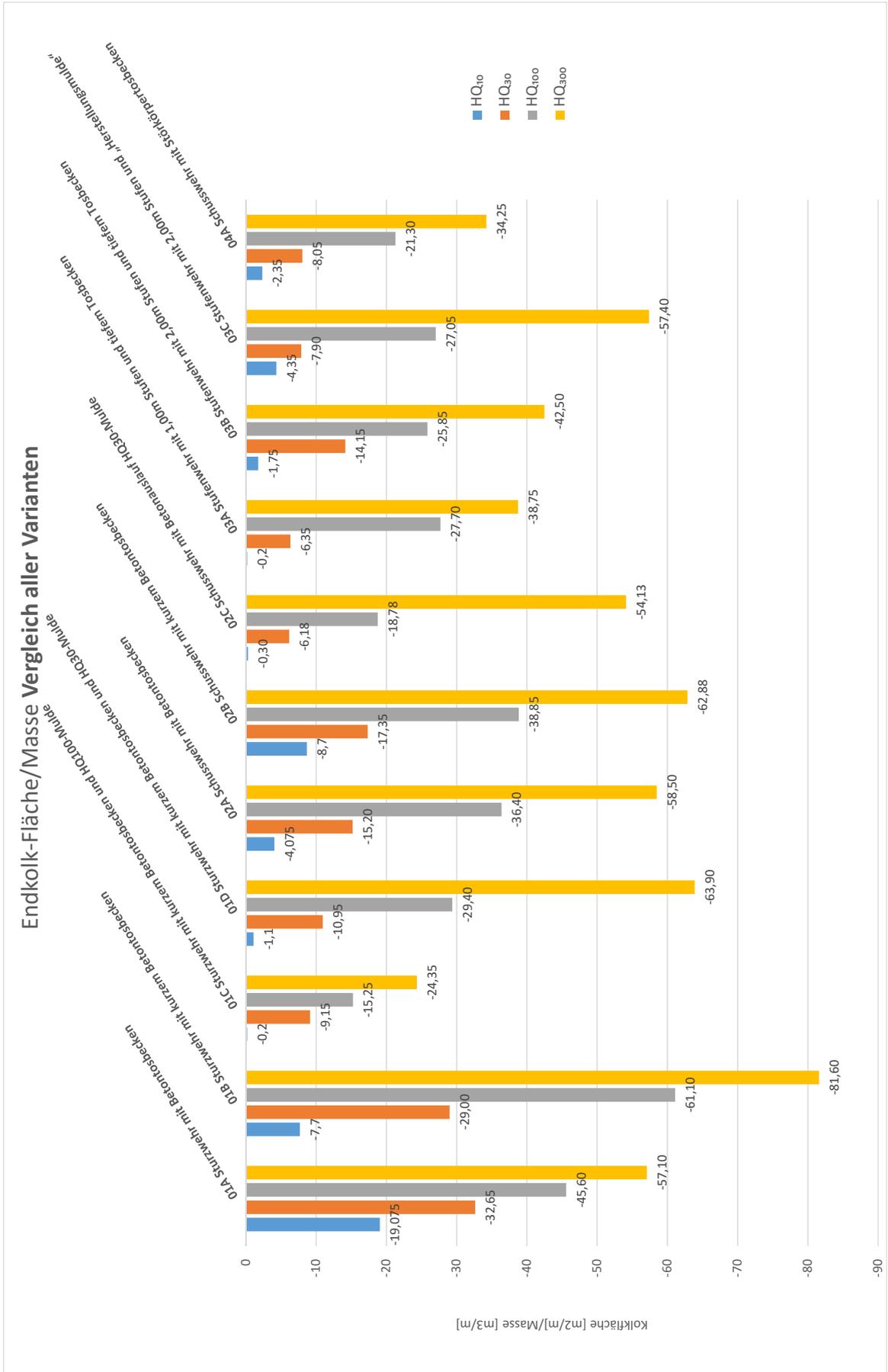


Abbildung 6.6: Endkolkflächen und -massen aller Varianten

7 Zusammenfassende Schlussfolgerungen

Ziel dieser Arbeit war es, durch einen hydraulischen Modellversuch eine optimierte Variante aus Wehrform und Tosbecken zu finden, welche die effizienteste Energieumwandlung im Hochwasserfall ermöglicht. Aus aktuellem Anlass (siehe Kapitel 3.2) wurde das Wehr des Kraftwerks Rosenberg am Kamp für die Randbedingung des Modellversuches ausgewählt, welches ein typischer Vertreter für eine feste Wehranlage ist. Die Ergebnisse können aber auch genutzt werden, um ähnliche Wehre mit abweichenden Dimensionen zu optimieren. Die Wehranlage wurde in einem 1:25 hydraulischen Schnittmodell abgebildet.

Mit den theoretischen Grundlagen aus Kapitel 2 und den Einflüssen der Entwurfspläne in Anhang A.1 wurden folgende elf Varianten entwickelt:

- Variante 01A Sturzwehr mit Betontos Becken (17,10m; 1,00m Gegenschwelle)
- Variante 01B Sturzwehr mit kurzem Betontos Becken (10,25m; 0,50m Gegenschwelle)
- Variante 01C Sturzwehr mit kurzem Betontos Becken (10,25m; 0,50m Gegenschwelle) und Mulde auf HQ₁₀₀ ausgelegt
- Variante 01D Sturzwehr mit kurzem Betontos Becken (10,25m; 0,50m Gegenschwelle) und Mulde auf HQ₃₀ ausgelegt
- Variante 02A Schusswehr mit Betontos Becken (16,50m; 1,00m Eintiefung / Gegenschwelle)
- Variante 02B Schusswehr mit kurzem Betontos Becken (12,50m; 1,00m Eintiefung / Gegenschwelle)
- Variante 02C Schusswehr mit Betonauslauf (2,50m, 1,00m Eintiefung) und Mulde auf HQ₃₀ ausgelegt
- Variante 03A Stufenwehr mit 1,00m Stufen und tiefem Tosbecken (10,25m Gesamtlänge Tosbecken, 2,05m Eintiefung/Gegenschwelle)
- Variante 03B Stufenwehr mit 2,00m Stufen und tiefem Tosbecken (10,25m Gesamtlänge Tosbecken, 2,05m Eintiefung/Gegenschwelle)
- Variante 03C Stufenwehr mit 2,00m Stufen und „Herstellungsmulde“ aus Wasserbausteinen (25° geneigt, ungefähr Baugrube ausgelegt)
- Variante 04A Schusswehr mit Störkörpertosbecken (7,50m Gesamtlänge Tosbecken, Strahlaufreißer 0,50m hoch, Störkörper 1,00m hoch)

Die genauen Erläuterungen der einzelnen untersuchten Varianten sind ab Kapitel 3.4 zu finden. Die dazugehörigen Pläne sind in Anhang A.2 abgebildet.

Im Rahmen der Modelldurchführung zur hydraulischen Optimierung einer festen Wehranlage ergaben sich nachfolgende, kurz zusammengefasste Erkenntnisse und Schlussfolgerungen, welche in Kapitel 5 und 6 genauer beschrieben sind.

Bezugnehmend auf die Bemessungsansätze für Wehrformen und Tosbecken muss festgestellt werden, dass es keine allgemein gültige Formel gibt. Im Speziellen wurden zur Abschätzung der Tosbeckenlänge im Modellversuch andere Beobachtungen gemacht als die Formeln nach zum Beispiel *Blind* [1] oder *Smetana* [8] ergeben haben. Dies liegt an der Komplexität der Strömungen und Turbulenzen in einem Tosbecken, die von den verwendeten Bemessungsansätzen nicht vollständig erfasst werden kann. Deswegen sind bei solchen Entwürfen hydraulische Modellversuche ein wesentlicher Bestandteil. Positive Erfahrungen wurden mit der Bemessung für ein Störkörpertosbecken nach *USBR* [3] gemacht, da diese Berechnungshilfen auf ausführlichen Versuchen beruhen.

Im Folgenden werden die untersuchten Varianten zuerst untereinander bezüglich der Wehrtypen verglichen, danach werden alle Varianten gegenübergestellt und bewertet.

01 - Sturzwehr Die 1,00m hohe Gegenschwelle in Variante 01A führte zu einem zweiten Überfall, vor allem bei den kleineren Abflüssen. Die gekürzte Tosbeckenlänge und die nur 0,50m hohe Wehrschwelle aus Variante 01B zeigten eine deutliche Verbesserung bei den Kolk-tiefen und -mengen bei den Abflüssen von HQ_{10} und HQ_{30} . Für die HQ_{100} und HQ_{300} Abflüsse hingegen bedeutete die Anpassung eine Verschlechterung, da die Länge des Tosbeckens für den Wechselsprung nicht ausreichte. Bei Variante 01C wurde eine Mulde auf ein HQ_{100} ausgelegt. Diese überstand alle Abflüsse ohne nennenswerten Schaden und brachte sogar die geringsten Kolkentwicklungen von allen Varianten hervor, bedeutet aber auch einen unwirtschaftlichen großen Material- und Platzverbrauch. Die Variante 01D, mit einer auf ein HQ_{30} optimal angepassten Mulde, verhielt sich bei niedrigen Abflüssen ähnlich wie die große Mulde aus Variante 01C. Die Mulde nahm nur bei den beiden großen untersuchten Abflüssen Schaden.

Varianten 02 - Schusswehr Bei den Varianten 02A und 02B stellte sich heraus, dass die verkürzte Tosbeckenvariante in 02B annähernd dieselbe Kolkentwicklung hervorbrachte wie in der ursprünglichen Variante 02A. Am Besten verhielt sich aber Variante 02C mit der Mulde aus Wasserbausteinen. Selbst bei den Abflüssen von HQ_{100} und HQ_{300} , bei denen die Wasserbausteine umgelagert wurden, entwickelte sich ein geringerer Kolk. Dies

ist auf die Flexibilität einer Mulde aus Wasserbausteinen zurückzuführen.

Varianten 03 - Stufenwehr Die Modellversuche mit unterschiedlichen Stufengrößen in Variante 03A und 03B ergaben keine signifikanten Unterschiede. Um eine vollständige Kaskadenwirkung zu erzielen, müssten die Stufen mindestens doppelt so breit wie hoch ausgeführt werden. Das Stufenwehr in Variante 03C, mit der Herstellungsmulde aus Wasserbausteinen, verhielt sich bei den niedrigen Abflüssen ähnlich wie die beiden Varianten zuvor. Nur HQ_{300} erzeugte Kräfte, um die Wasserbausteine zu bewegen und die Mulde umzugestalten.

Variante 04 - Störkörper Von Variante 04A gab es keine weiteren Versuche, da sich die Anordnung der Störkörper nach den Bemessungunterlagen von *USBR* [3] als sehr günstig herausstellte. Der in der Fachliteratur [1] beschriebene Effekt einer Vergleichmäßigung des Geschwindigkeitsprofils im Unterwasser konnte beobachtet werden und spiegelt sich in den geringen Kolkmenen wieder.

Vergleich aller Varianten Die in Abbildung 6.5 auf Seite 98 und Abbildung 6.6 auf Seite 99 gezeigten Grafiken der Endkolkiefen und Endkolkflächen machen einen anschaulichen Vergleich der untersuchten Varianten möglich.

Basierend auf den Versuchsergebnissen in diesen Grafiken kann man festhalten, dass eine Eintiefung vor allem bei niedrigen Unterwasserständen eine deutlich positive Auswirkung auf die Energieumwandlung im Tosbecken und der damit verbundenen Kolkentwicklung hat. Die Varianten 01 mit der Tosbeckensohle auf Höhe der Flusssohle bewirkten deutlich stärkere Kolkbildungen als alle anderen Varianten mit einer Eintiefung.

Die untersuchten Varianten 02 mit einem Schusswehr weisen deswegen weniger Kolkentwicklung auf als die Modelle mit Sturzwehr.

Bei den Stufenwehren konnte gezeigt werden, dass sich die teilweise Verlagerung der Energieumwandlung auf die einzelnen Stufen in einer geringeren Kolkentwicklung bemerkbar macht. Besonderer Beachtung sollte dabei der Ausformung der Wehrkrone und der einzelnen Stufen geschenkt werden, um ein ständiges Wechseln der Abflussbilder zwischen *Transition Flow* und *Skimming Flow* zu verhindern und damit die Betonbeanspruchung zu minimieren. Die unterschiedlichen Stufengrößen haben dabei nur wenig Einfluss und können nach anderen Entscheidungskriterien, wie etwa optisches Erscheinungsbild oder einfacher Herstellungsmöglichkeiten gewählt werden. Im Allgemeinen ist in der Fachliteratur, im Vergleich zu anderen Wehrformen, wenig über Stufenwehre zu finden. Deswegen sollten

weitere Untersuchungen veranlasst werden, um das Verhalten besser beschreiben zu können.

In derselben Größenordnung der Kolkentwicklung wie bei den Stufenwehren bewegt sich auch Variante 04A mit dem Störkörperptosbecken. Vor allem bei HQ_{100} und HQ_{300} beweisen die Störkörper ihre Effektivität gegenüber den anderen Varianten.

Die Tosbeckenausführungen aus Wasserbausteinen zeigten bei allen Wehrtypen ähnliches Verhalten wie Betontos Becken und bei den niedrigen Abflüssen teilweise sogar deutlich besseres. Die Rauigkeit der Wasserbausteine hilft, die Energieumwandlung bei geringen Abflüssen zu verbessern. Bei höheren Abflussmengen ist die Anpassungsfähigkeit der Muldenform durch Steinbewegungen von großen Vorteil. Bei Projekten in Gegenden mit leicht verfügbaren Wasserbausteinen stellen diese Varianten eine effiziente und wirtschaftliche Alternative zu Betontos Becken dar.

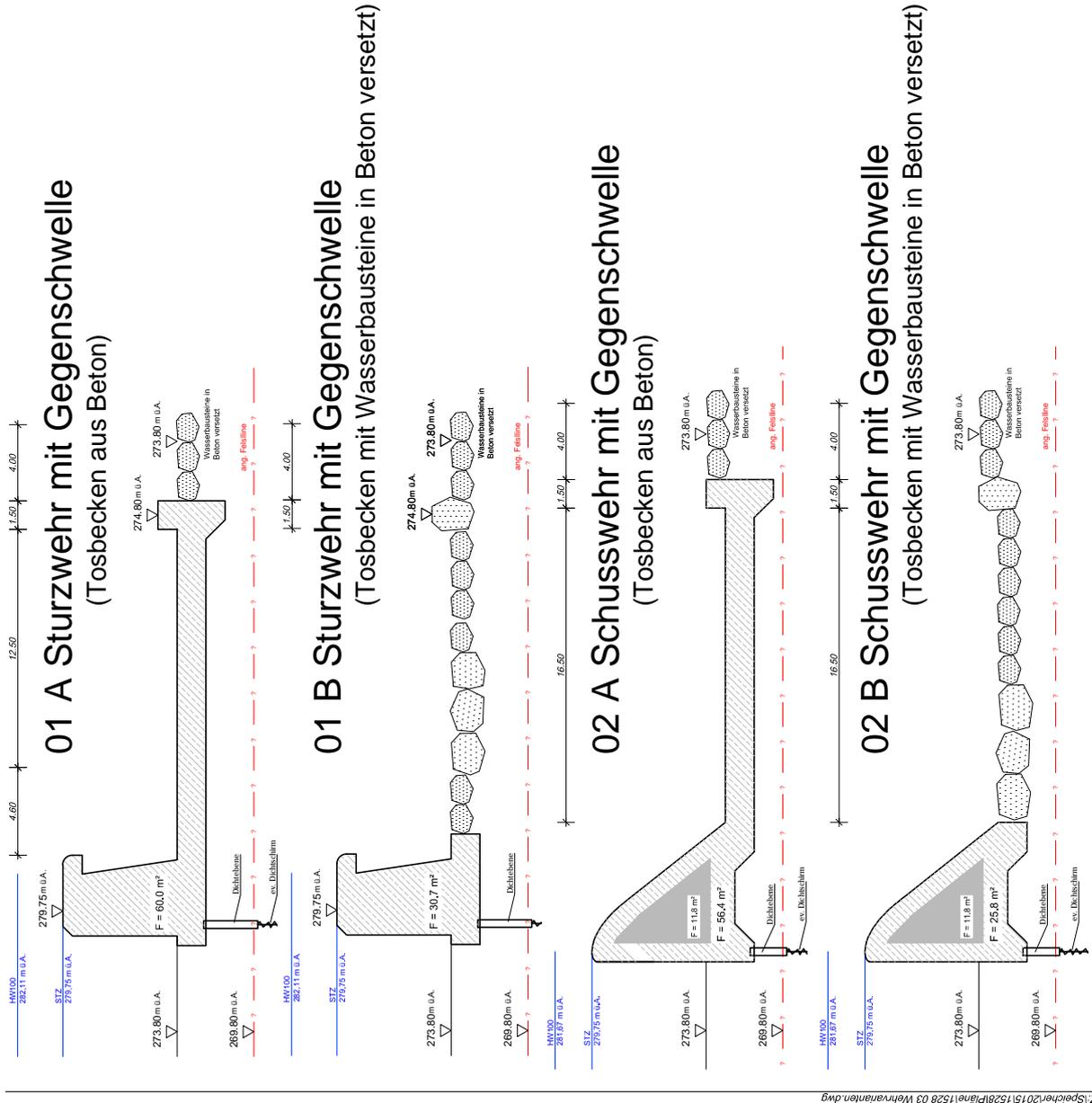
Wenn man im Speziellen eine Aussage über die Ausbaumöglichkeiten des Kraftwerks Rosenberg treffen will, müssen auch wirtschaftliche und regionale Faktoren beachtet werden. Da sich das Waldviertel für das Bauen mit Wasserbausteinen eignet, kann *Variante 02C (Schusswehr mit Betonauslauf und Mulde aus Wasserbausteinen)* empfohlen werden. Sie zeichnet sich durch eine geringe Aufstandsfläche, einen geringen Betonbedarf und eine geringe Kolkeentwicklung aus. Als Alternative kann auch noch ein Stufenwehr wie in Variante 03A in Betracht gezogen werden. Dieses weist eine ähnliche Kolkentwicklung auf, ist aber einfacher in der Herstellung und bietet bei geringen Abflüssen ein optisch ansprechenderes Erscheinungsbild durch die vielen kleinen Wasserfälle über die Stufen.

8 Literaturverzeichnis

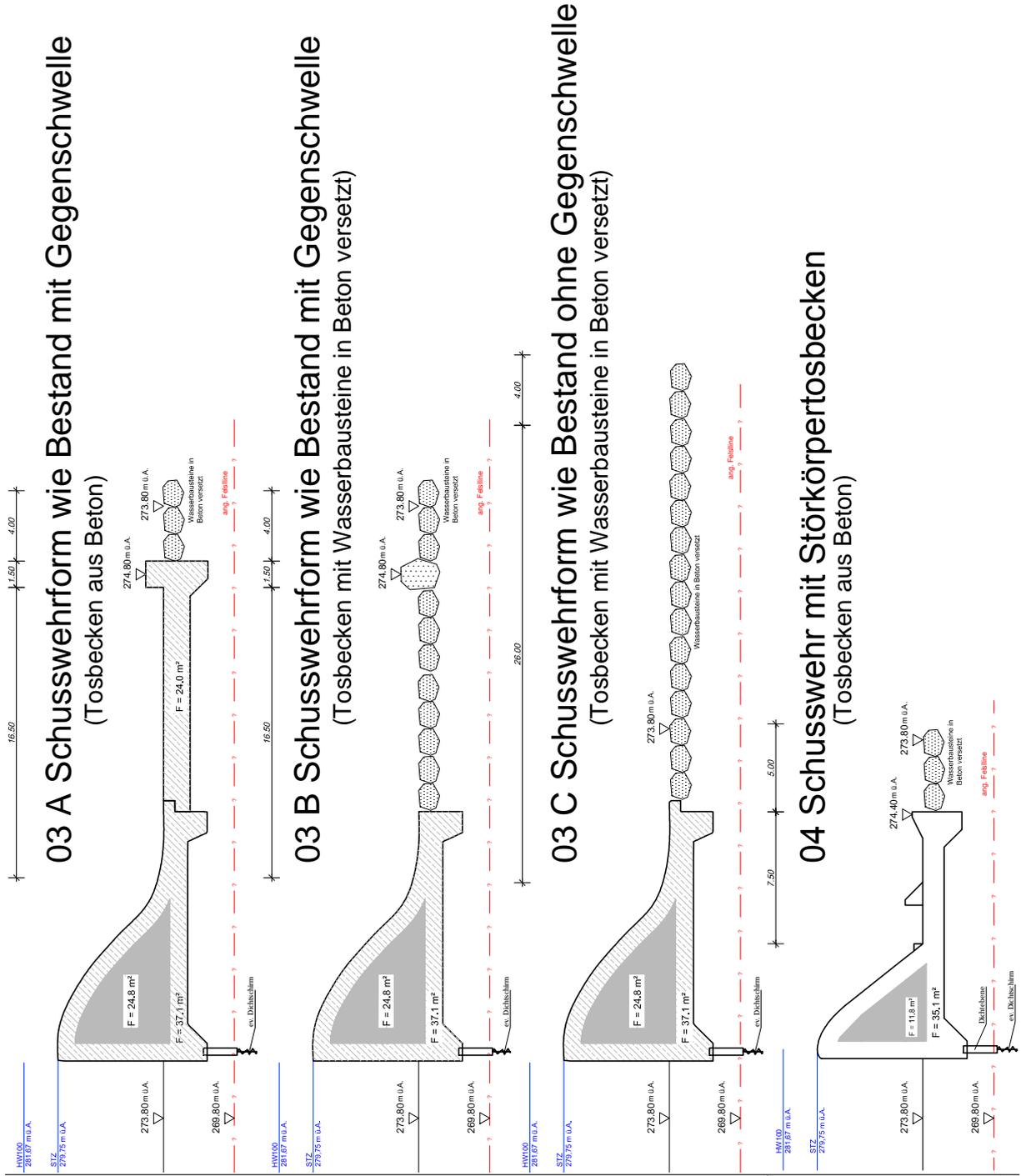
- [1] Blind, H. u. a. *Wasserbauten aus Beton*. Hrsg. von Prof. Dr.-Ing. Herbert Kupfer Institut für Bauingenieurwesen III, Technische Universität München. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 1987.
- [2] Böhm, C. „Kolkbildung nach einem Tosbecken, Hydraulische Modellversuche an einer bestehenden Wehranlage“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2004.
- [3] Bureau of Reclamation. *Design of Small Dams*. United States Department of the Interior, 1987.
- [4] Chanson, H. *The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction*. Hrsg. von Department of Civil Engineering, The University of Queensland, Australia. Second Edition. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.
- [5] Ebner, B. „Modellversuche zur Optimierung der Wehr KW Lehen“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2007.
- [6] Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie Forschungsbereich Wasserbau, Technische Universität Wien. *Projekt - Sperre Langmann Endbericht*. Techn. Ber.
- [7] Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien. *Skriptum Wasserbauliches Versuchswesen*. 2012.
- [8] Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien. *Studienblätter Konstruktiver Wasserbau 1*. 2012.
- [9] Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien. *Studienblätter Technische Hydraulik*. 2012.
- [10] Khatsuria, R. M. *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*. Marcel Dekker, 2005.
- [11] Patt, H. und Gonsowski, P. *Wasserbau: Grundlagen, Gestaltung von wasserbaulichen Bauwerken und Anlagen*. 7., aktualisierte Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [12] Rössert, R. *Hydraulik im Wasserbau*. 6. Auflage. Verlag Oldenbourg, 1984.
- [13] Schöberl, F. „Kolkbildung“. In: *Symposium Hydraulik offener Gerinne, Wiener Mitteilungen Wasser, Abwasser, Gewässer* Band 79 (1989).
- [14] Statistik Austria. „Energiedaten Österreich 2014“. 2016.
- [15] Tschernutter, Ingenieurbüro. *Entwurfsphase*. 2015.
- [16] Waha, B. „Bauliche- und konstruktive Gestaltung von Niederdruckanlagen“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2010.

A Anhang

A.1 Entwurfsplan Wehrformen [15]

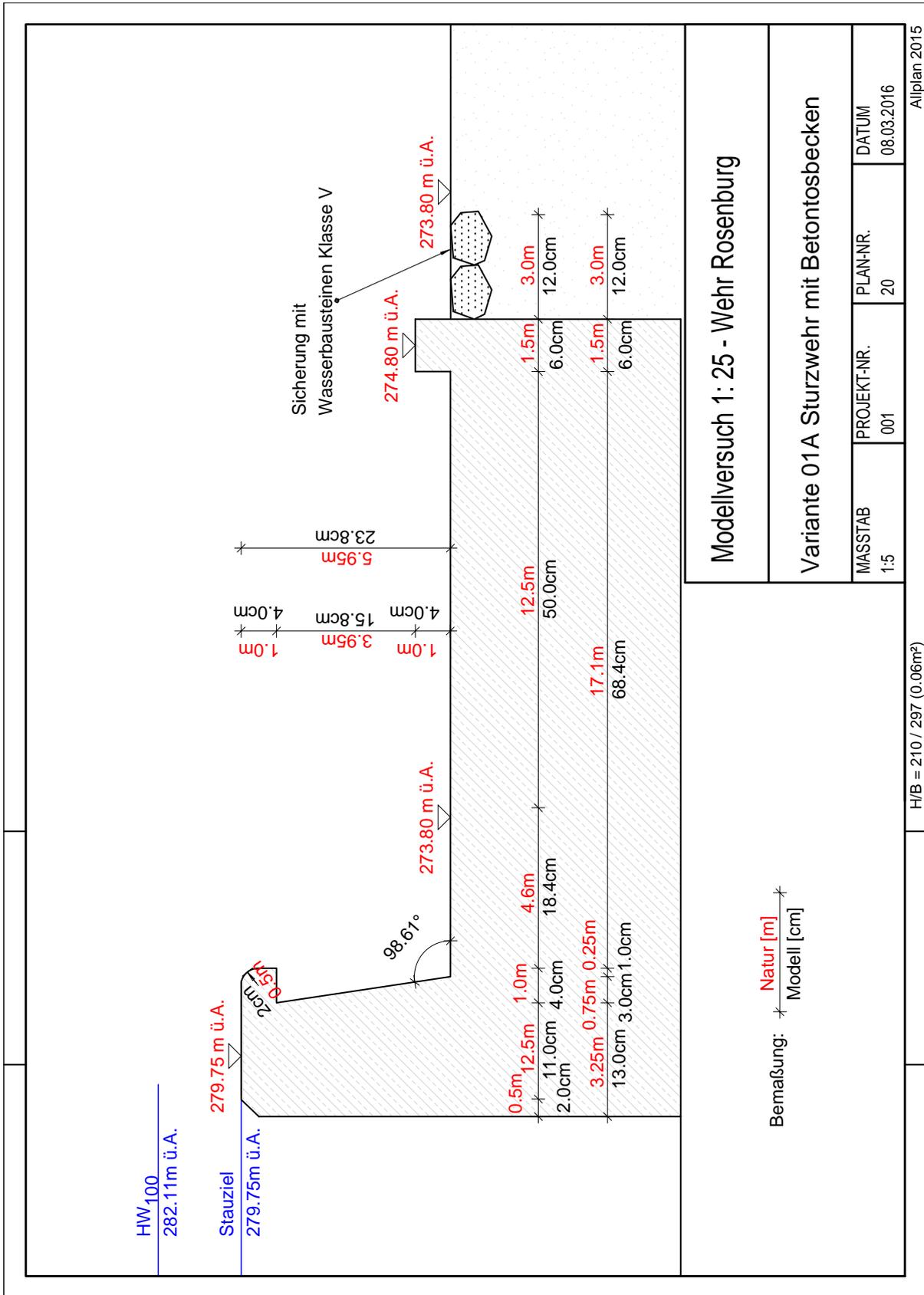


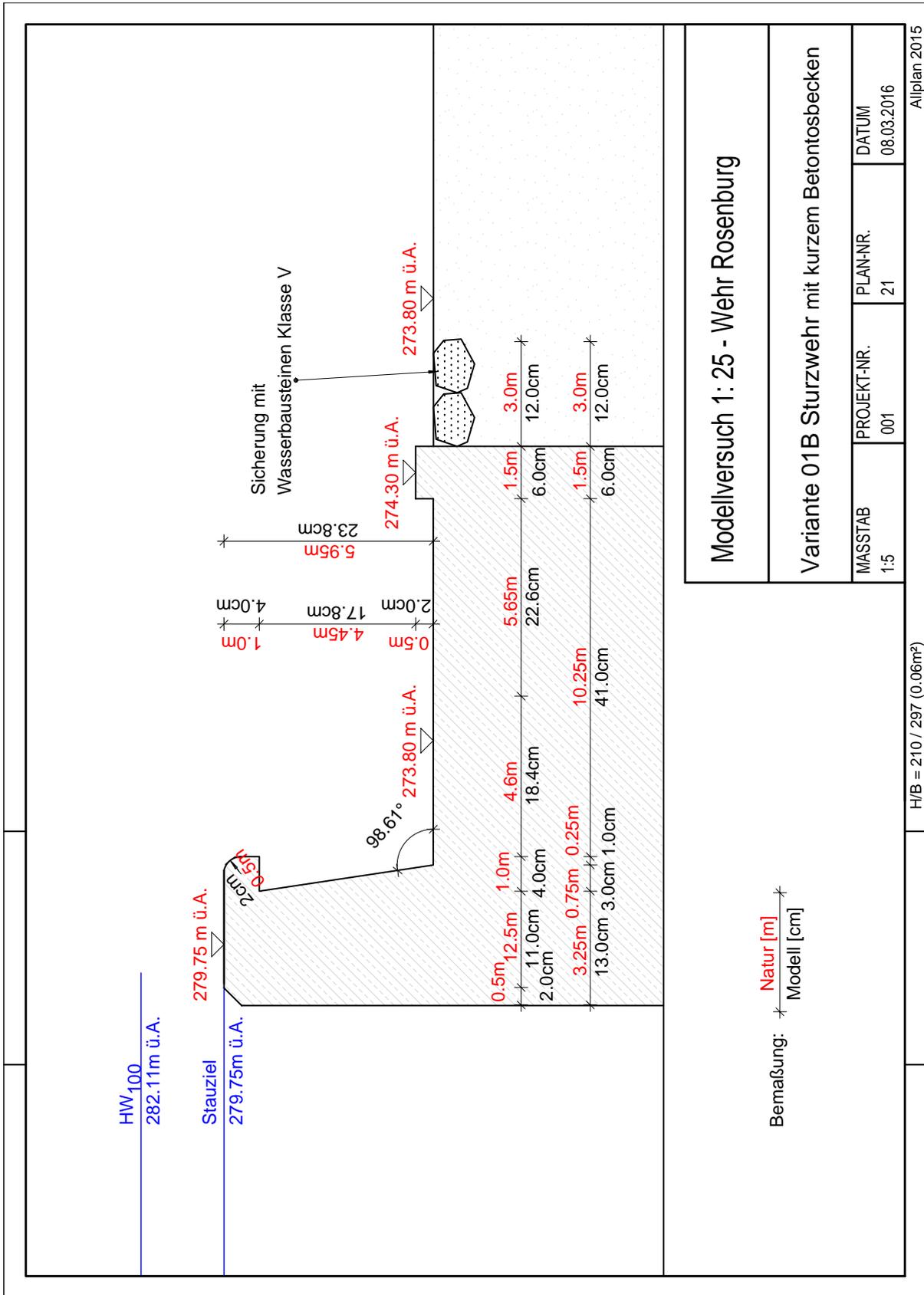
Z:\Speicher\2015\1520\Plan\1520_03 Wehrvarianten.dwg

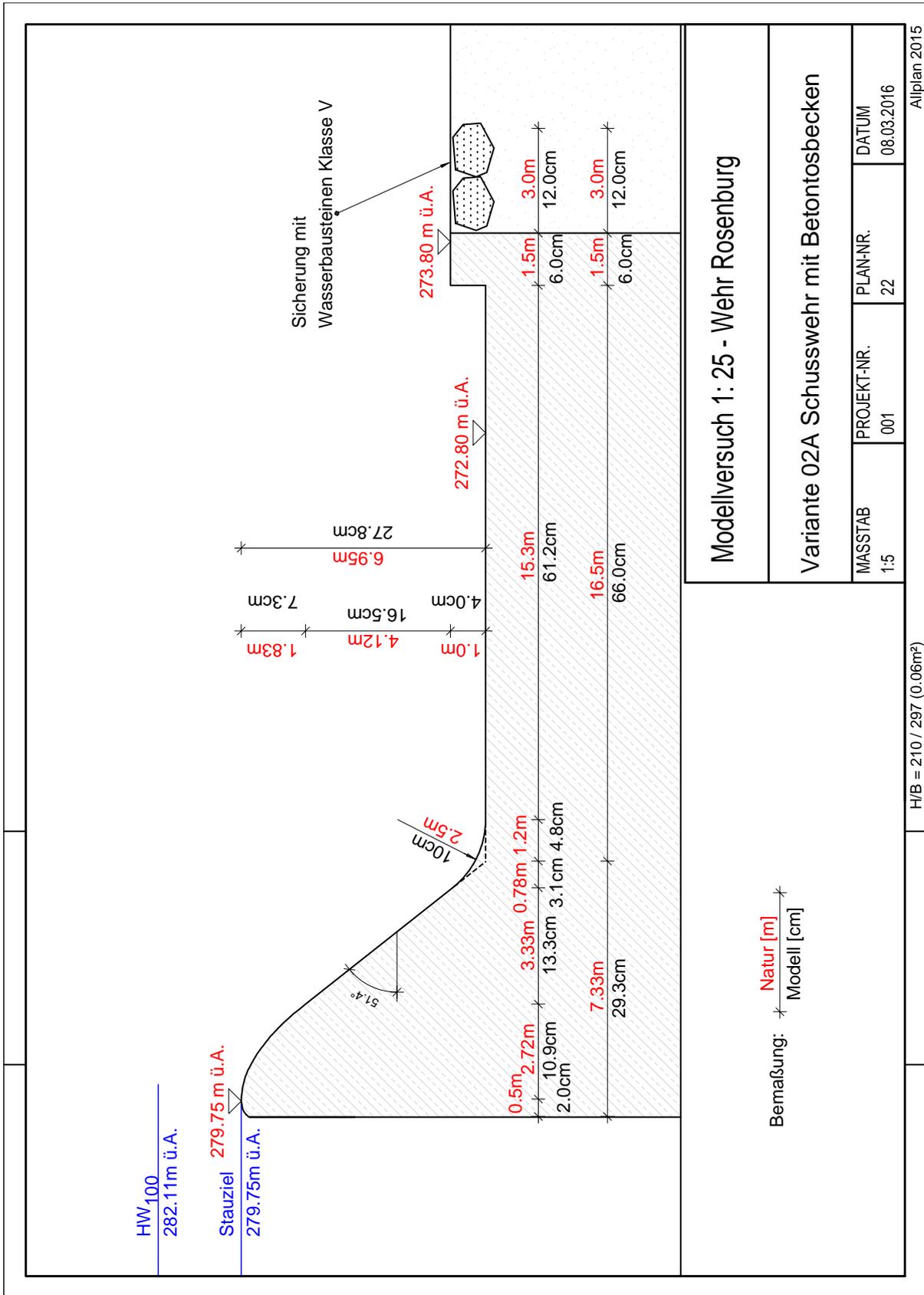


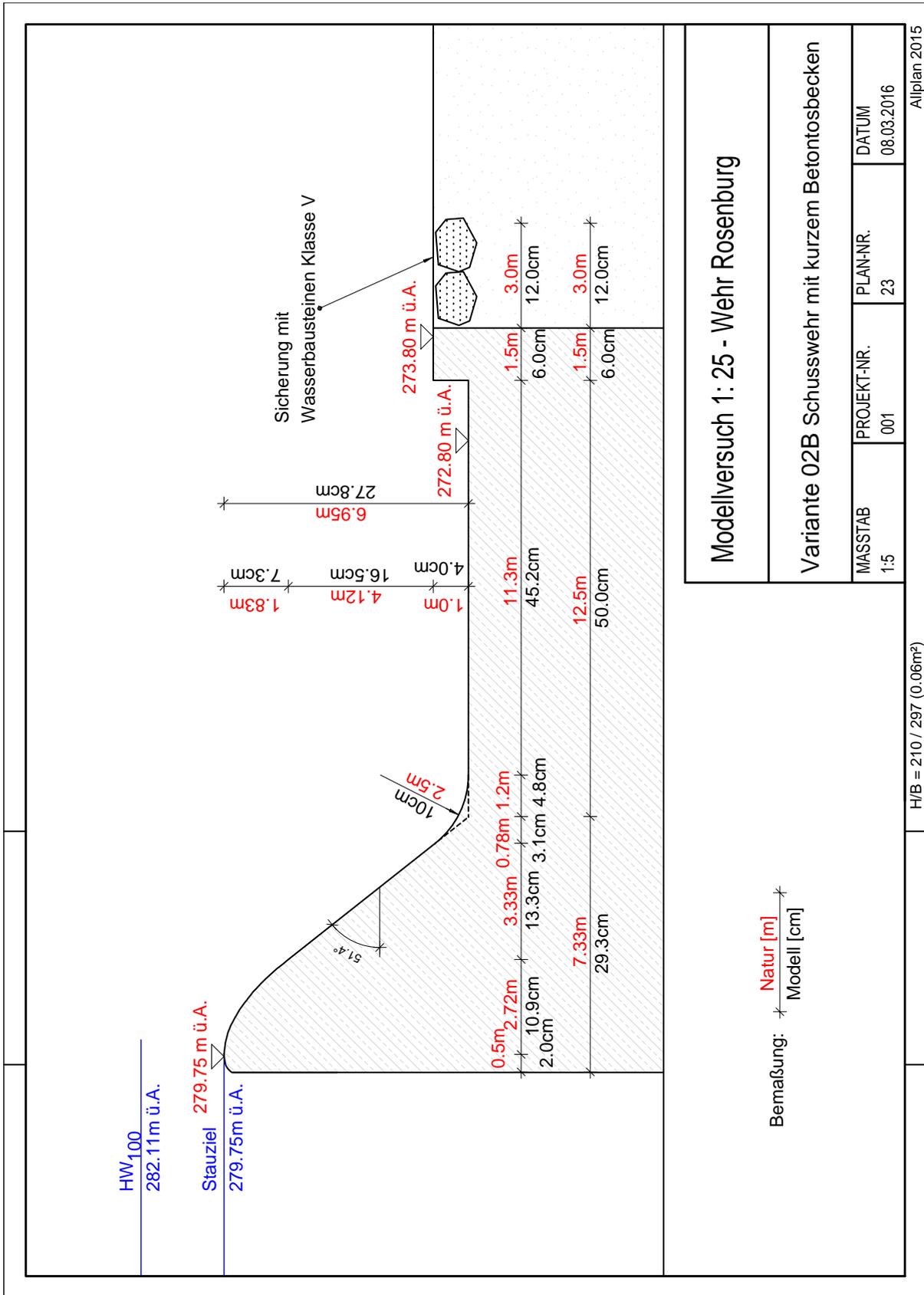
Z:\Speicher\2015\1528\Plan\1528_03 Wehrvarianten.dwg

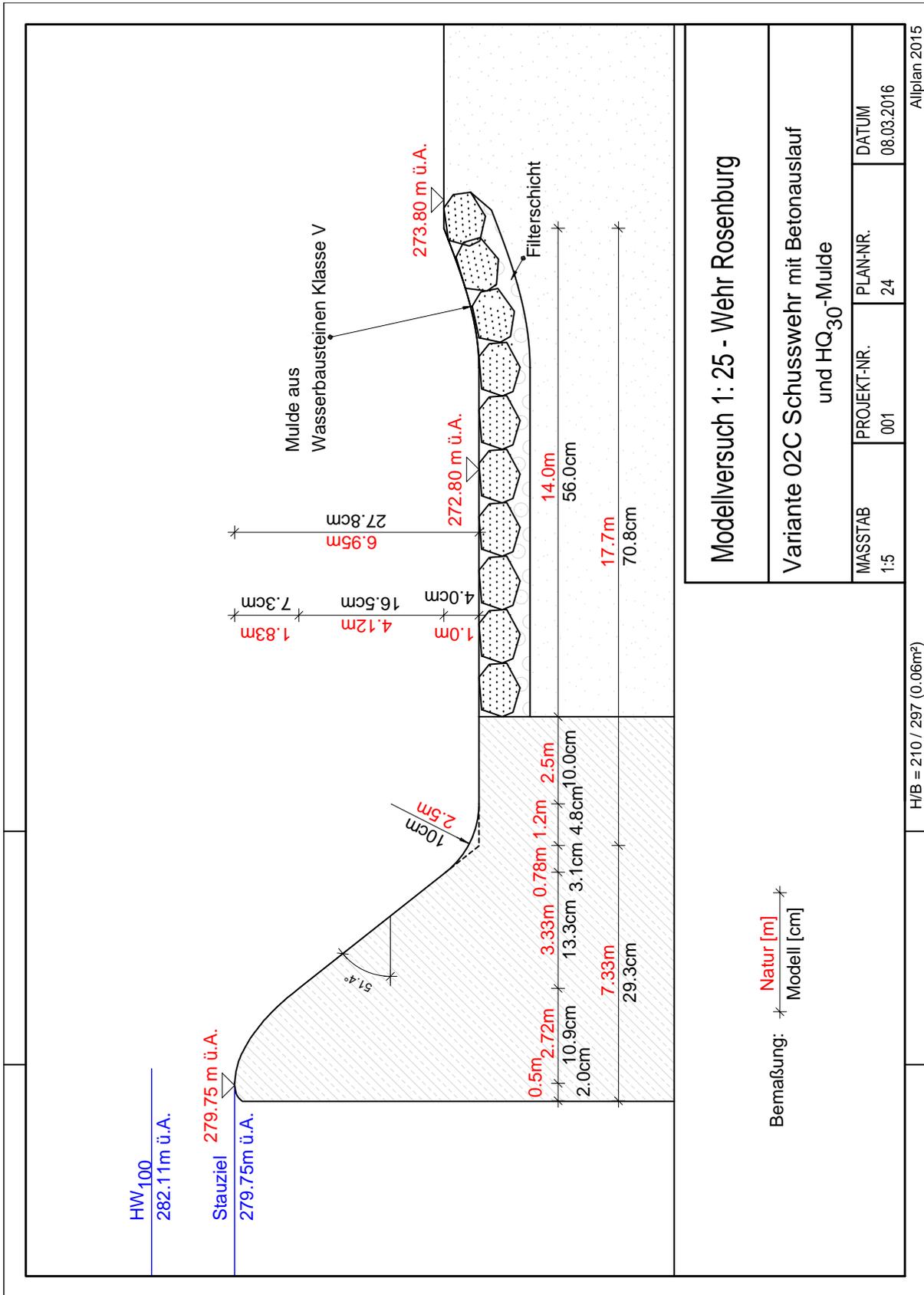
A.2 Pläne aller untersuchten Varianten

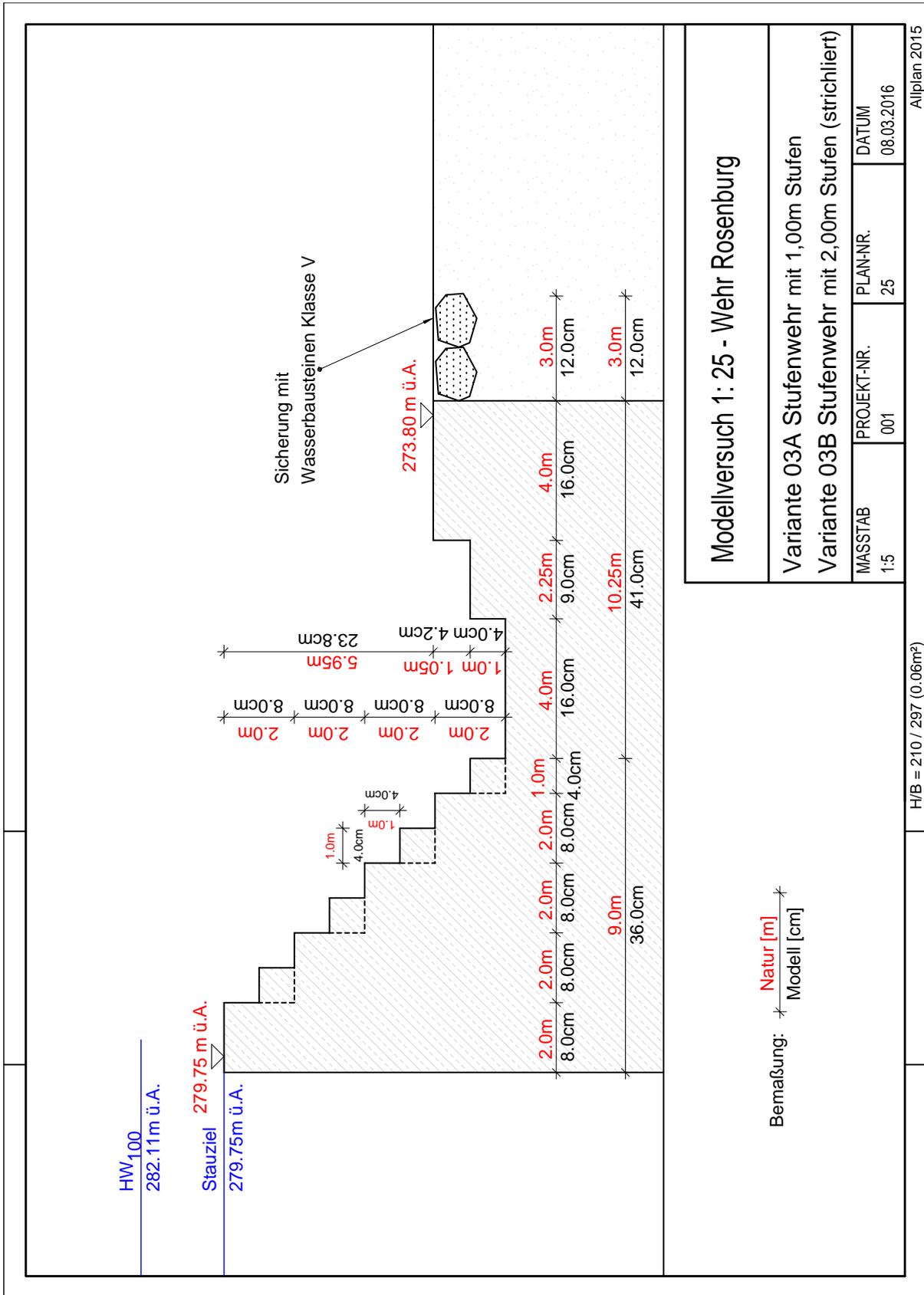


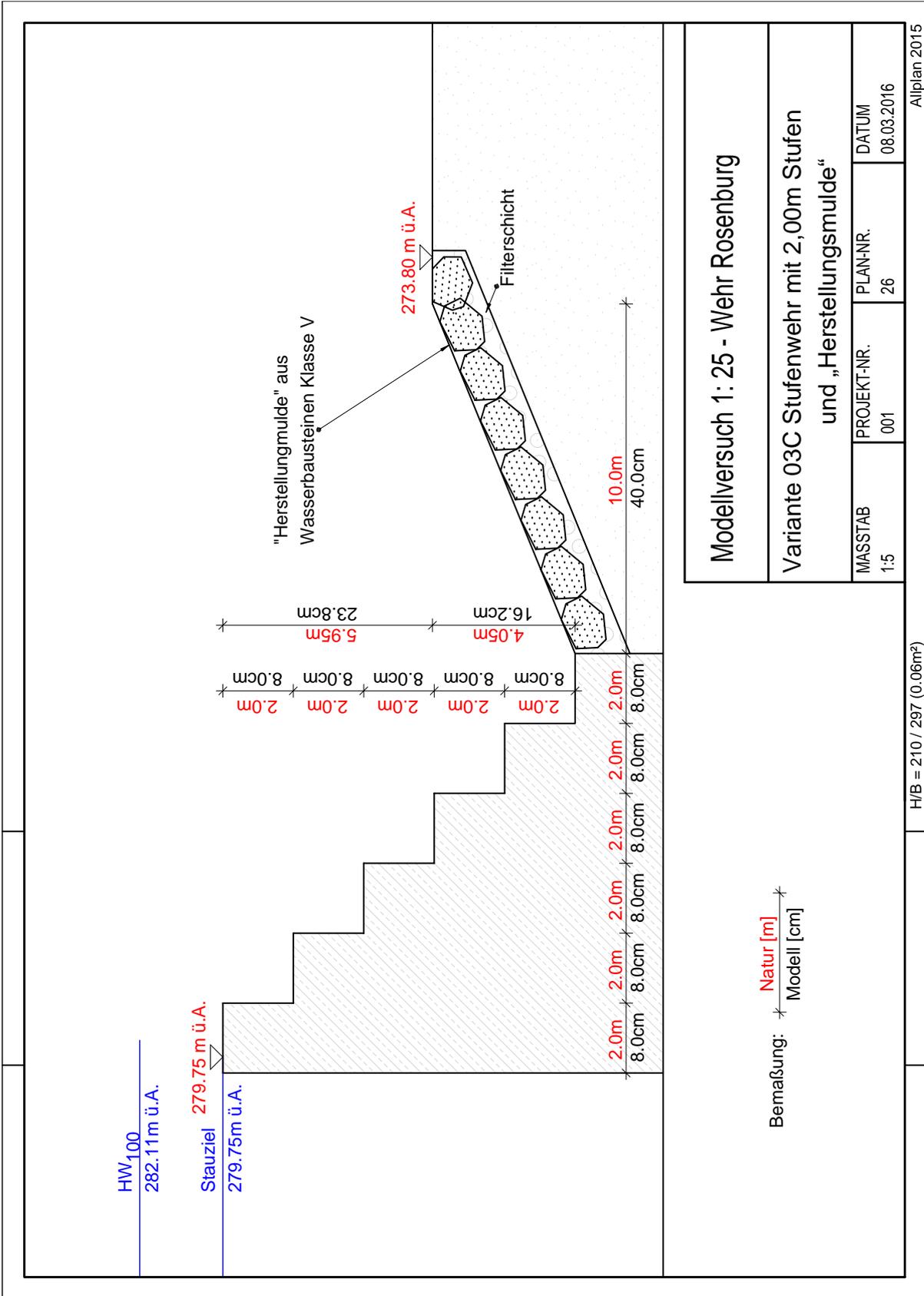












Modellversuch 1: 25 - Wehr Rosenberg

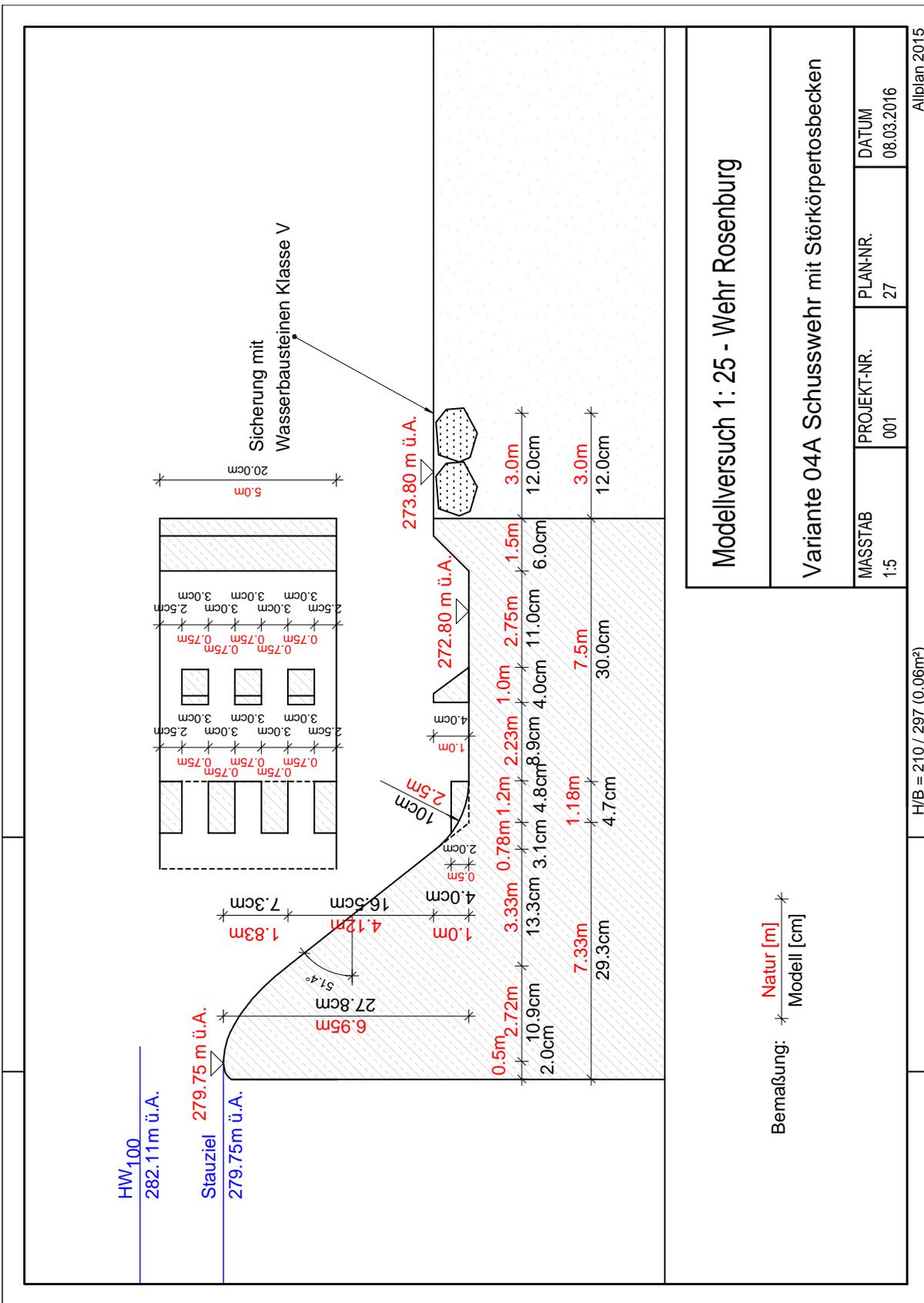
Variante 03C Stufenwehr mit 2,00m Stufen
und „Herstellungsmulde“

MASSTAB 1:5	PROJEKT-NR. 001	PLAN-NR. 26	DATUM 08.03.2016
----------------	--------------------	----------------	---------------------

Allplan 2015

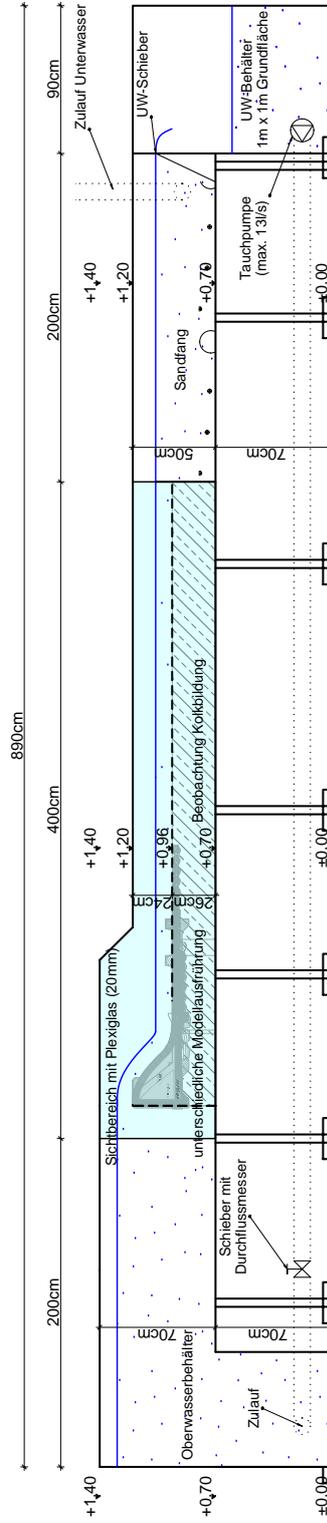
Bemaßung: * Natur [m] *
Modell [cm]

H/B = 210 / 297 (0.06m²)



A.3 Modellaufbau

1:25 Modell - Wehr Rosenberg Unterschiedliche Wehrausbildungen mit verschiedenen Tosbecken Rinnenbreite: 20cm, max. Durchfluss: 13l/s



Modellversuch 1: 25 - Wehr Rosenberg

Diplomarbeit_Wehr

Skizze Modellaufbau

Modell Übersicht

MASSTAB 1:35	PROJEKT-NR. 001	PLAN-NR. 1	DATUM 09.03.2016
-----------------	--------------------	---------------	---------------------

H/B = 210 / 297 (0.06m²) Alplan 2015