



Universität für Bodenkultur Wien
Department Bautechnik und Naturgefahren
Institut für Alpine Naturgefahren (IAN)

Peter Jordan Str. 82
A-1190 WIEN

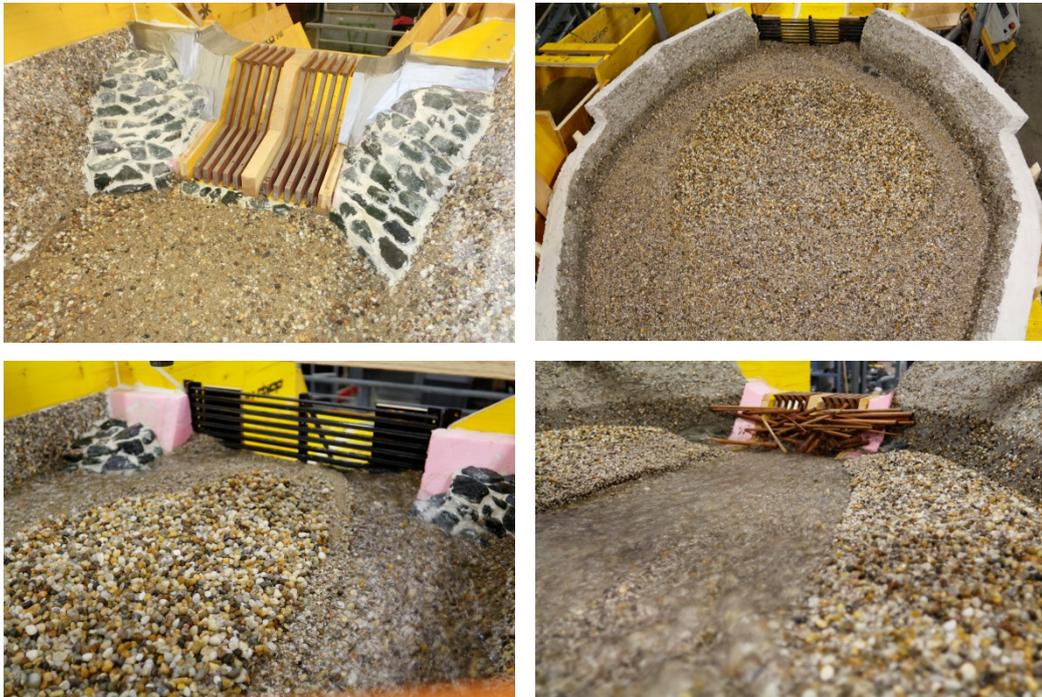
Tel.: +43-1-47654-4350
Fax: +43-1-47654-4390



IAN REPORT 148

SedAlp WP6

Physikalische hydraulische Modellversuche zur Optimierung
von Rechenkonstruktionen von Filtersperren



Im Auftrag von:

Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und
Lawinenverbauung



die.wildbach
und lawinenverbauung



lebensministerium.at

Wien, im März 2015

Report 148 SedAlp WP6:
Physikalische hydraulische Modellversuche zur Optimierung
von Rechenkonstruktionen von Filtersperren

Im Auftrag von: Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung

Projektleitung: Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Hübl Johannes

Mitarbeiter: Dipl.-Ing. Dr. Chiari Michael

Dipl.-Ing. Trojer Martin

Universität für Bodenkultur

Department Bautechnik und Naturgefahren

Institut für Alpine Naturgefahren

Peter Jordan Str. 82

Tel.: +43-1-47654-4350

A – 1190 Wien

Fax: +43-1-47654-4390

Report Nr. 148 SedAlp WP6

Referenz (Literaturzitat): Hübl J. Chiari M., Trojer M. (2015): Physikalische hydraulische Modellversuche zur Optimierung von Rechenkonstruktionen von Filtersperren, IAN Report 148 SedAlp WP6, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien (unveröffentlicht), 104 pp

Wien, im März 2015

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	Zielsetzung.....	2
2	GRUNDLAGEN	3
2.1	Klassifizierung von Rückhaltebauwerken.....	3
2.2	Gegenüberstellung der Wirkungsweise von Balken- und Rechensperren	4
2.3	Wasserbauliches Versuchswesen	7
2.1.1	Konnex von Natur und Modell.....	9
2.1.2	Modellgesetze	9
2.1.3	Umrechnungsfaktoren für hydraulische Modellversuche.....	11
2.1.4	Hydraulische Grundlagen	12
3	AUFARBEITUNG FRÜHERER MODELLVERSUCHE	18
3.1	Vorreiter für die Durchführung von Modellversuchen	18
3.2	Ergebnisse der von HAINZER 2013 durchgeführten physikalischen Modellversuche am Schöttlbach.....	26
3.3	Weiterführende physikalische Modellversuche.....	26
4	MODELLVERSUCHE	28
4.1	Erläuterung des Versuchsaufbaues	28
4.1.1	Versuchsanordnung	28
4.2	Versuchsübersicht.....	36
4.3	Hydraulik- Reinwasserversuche	37
4.4	Geschiebeversuche.....	41
4.5	Geschiebeversuche mit Wildholz	47

5	ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	51
5.1	Ablagerungsvolumina	51
5.2	Beckenform	53
5.3	Spüeffizienz durch HQ ₅	54
6	ZUSAMMENFASSUNG UND INTERPRETATION DER ERGEBNISSE	56
7	QUELLEN- UND LITERATURVERZEICHNIS	59
8	ANHANG.....	61
8.1	Scans der Ablagerungen Rechteckform mit Rechensperre.....	61
8.2	Scans der Ablagerungen Rechteckform mit Balkensperre	69
8.3	Scans der Ablagerungen Birnenform mit Rechensperre	76
8.4	Scans der Ablagerungen Birnenform mit Balkensperre.....	84
9	ENGLISH SUMMARY	92
9.1	Introduction.....	92
9.2	History of physical scale models for torrents	92
9.3	Model Setup	93
9.4	Experiments	95
9.5	Data Analysis	97
9.5.1	Deposition and erosion pattern	97
9.5.2	Deposition volumes	99
9.5.3	Sediment passing the dam and self-emptying.....	99
9.5.4	Comparison of the different experimental runs.....	100
9.5.5	Grain sorting.....	103
9.6	Conclusions and Recommendations	103
9.7	References	104

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Klassifizierung von Sperrenbauwerken nach ONR 248000	4
Abbildung 2: Kombination aus einer Schlitz- und einer Balkensperre; Quelle: (WEBER, 2006).....	5
Abbildung 3: Rechensperre mit ausgerundeten MSH Stahlträgern;	6
Abbildung 4: Gegenüberstellung des hydraulischen und des numerischen Modells; Quelle: eigene Darstellung, modifiziert nach (KROUZECKY, k.A)	8
Abbildung 5: Laminarer Strömungszustand; Farbfadenversuch nach Reynolds. Quelle: eigene Darstellung, modifiziert nach (LOISKANDL, 2009).....	14
Abbildung 6: Turbulenter Strömungszustand; Farbfadenversuch nach Reynolds. Quelle: eigene Darstellung, modifiziert nach (LOISKANDL, 2009).....	14
Abbildung 7: Fließwechsel: Strömen - Schießen - Strömen; Quelle: modifiziert nach LECHER, K. et al., 2001).....	16
Abbildung 8: Grafische Darstellung der Strömungszustände; Quelle: eigene Darstellung, modifiziert nach (LOISKANDL, 2009)	17
Abbildung 9: Begrenzung der freien Schwemmkegelausbildung durch den Einbau rückwärtiger und seitlicher Wände; Quelle: (HAMPEL, 1968).....	21
Abbildung 10: linkes Bild: Durchmischungszone; im Hintergrund Thomson Wehr mit seitlicher Sedimentzugabe; rechtes Bild: Der Übergang von der Durchmischungszone zum Einlaufbauwerk	29
Abbildung 11: Geometrie des rechteckigen Ablagerungsbeckens.....	30
Abbildung 12: Geometrie des birnenförmigen Ablagerungsbeckens.	31
Abbildung 13: Bauvorbild für die Rechensperre (Ansicht, Quelle WLV).....	33
Abbildung 14: Bauvorbild für die Rechensperre (Schnitt, Quelle WLV).	33
Abbildung 15: Bauvorbild für die Balkensperre (Ansicht, Quelle WLV).....	35
Abbildung 16: Bauvorbild für die Balkensperre (Schnitt, Quelle WLV).....	35
Abbildung 17: Fotos der Balken und Rechensperre.....	36

Abbildung 18: Abflusstiefen für den Versuch Nr. 5 (Reinwasser, Rechensperre, 15mm, im rechteckigen Ablagerungsbecken.....	38
Abbildung 19: Abflusstiefen für den Versuch Nr. 9 (Reinwasser, Balkensperre, 15mm, im rechteckigen Ablagerungsbecken.....	39
Abbildung 20: Abflusstiefen für den Versuch Nr. 13 (Reinwasser, Rechensperre, 15mm, im birnenförmigen Ablagerungsbecken.	39
Abbildung 21: Abflusstiefen für den Versuch Nr. 18 (Reinwasser, Balkensperre, 15mm, im birnenförmigen Ablagerungsbecken.	40
Abbildung 22: Vergleich der Varianten für 24,42 l/s und 15mm Stababstand.....	41
Abbildung 23: Abfluss und Geschiebeganglinie für das HQ ₁₅₀	42
Abbildung 24: Abflussganglinie für das Spülereignis HQ ₅	42
Abbildung 25: Sieblinie des verwendeten Versuchsmaterials; Quelle: HAINZER (2013).....	44
Abbildung 26: Rollwägen, gefüllt mit Sediment.....	46
Abbildung 27: linkes Bild: Vorratsbehälter für die Sedimentzugabe mit Förderband; rechtes Bild: Durchmischungsgerinne mit Förderband zur Beschickung mit Geschiebe, im Hintergrund Thomson Wehr als Einlaufbauwerk für das Wasser.....	47
Abbildung 28: Grafische Darstellung der verwendeten Wildhölzer; links: Hölzer mit 28 cm und rechts Hölzer mit 14 cm Länge	48
Abbildung 29: Wildholz während und nach dem Bemessungsereignis HQ ₁₅₀	50
Abbildung 30: Hillshade Versuchsnummer 15 nach HQ ₁₅₀ und HQ ₅	51
Abbildung 31: Boxplot für alle Versuche gegliedert nach der Beckenform und Szenario.....	54
Abbildung 32: Selbstentleerung nach der Spülung HQ ₅ für die Versuche ohne Wildholzzugabe.....	55
Abbildung 33: Selbstentleerung nach der Spülung HQ ₅ für die Versuche mit Wildholzzugabe.	55

Abbildung 34: linkes Bild: Balkensperre mit massiver Verkläusung; rechtes Bild: Rückseite der Rechensperre; die Hölzer lagern sich direkt an den vertikalen Stäben an und treten nicht hindurch.	56
Abbildung 35: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 1 nach HQ ₁₅₀	61
Abbildung 36: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 1 nach Spülung HQ ₅	62
Abbildung 37: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 2 nach HQ ₁₅₀	63
Abbildung 38: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 2 nach Spülung HQ ₅	64
Abbildung 39: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 3 nach HQ ₁₅₀	65
Abbildung 40: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 3 nach Spülung HQ ₅	66
Abbildung 41: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 4 nach HQ ₁₅₀	67
Abbildung 42: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 4 nach Spülung HQ ₅	68
Abbildung 43: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 6 nach HQ ₁₅₀	69
Abbildung 44: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 6 nach Spülung HQ ₅	70
Abbildung 45: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 7 nach HQ ₁₅₀	72
Abbildung 46: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 8 nach HQ ₁₅₀	72
Abbildung 47: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 8 nach Spülung HQ ₅	73
Abbildung 48: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 10 nach HQ ₁₅₀	74
Abbildung 49: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 10 nach Spülung HQ ₅	75
Abbildung 50: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 11 nach HQ ₁₅₀	76
Abbildung 51: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 11 nach Spülung HQ ₅	77
Abbildung 52: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 12 nach HQ ₁₅₀	78
Abbildung 53: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 12 nach Spülung HQ ₅	79
Abbildung 54: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 14 nach HQ ₁₅₀	80
Abbildung 55: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 14 nach Spülung HQ ₅	81
Abbildung 56: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 15 nach HQ ₁₅₀	82

Abbildung 57: Höhengschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 15 nach Spülung HQ ₅ .	83
Abbildung 58: Höhengschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 16 nach HQ ₁₅₀	84
Abbildung 59: Höhengschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 11 nach Spülung HQ ₅ .	85
Abbildung 60: Höhengschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 17 nach HQ ₁₅₀	86
Abbildung 61: Höhengschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 17 nach Spülung HQ ₅ .	87
Abbildung 62: Höhengschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 20 nach HQ ₁₅₀	88
Abbildung 63: Höhengschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 20 nach Spülung HQ ₅ .	89
Abbildung 64: Höhengschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 21 nach HQ ₁₅₀	90
Abbildung 65: Höhengschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 21 nach Spülung HQ ₅ .	91

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Umrechnungsfaktoren zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Modellgesetze; Quelle: eigene Darstellung, modifiziert nach (KROUZECKY, k.A).....	12
Tabelle 2: Gegenüberstellung der möglichen Strömungszustände; Quelle: eigene Darstellung, modifiziert nach (LOISKANDL, 2009)	17
Tabelle 3: Übersicht der durchgeführten Versuche für das rechteckige Ablagerungsbecken:	37
Tabelle 4: Übersicht der durchgeführten Versuche für das birnenförmige Ablagerungsbecken:	37
Tabelle 5: Linienzahlanalysen für den Schöttlbach; Quelle: eigene Darstellung, modifiziert nach (HAINZER, 2013)	43
Tabelle 6: Prozentuelle Darstellung der verwendeten Korngrößen; Quelle: eigene Darstellung, modifiziert nach (HAINZER, 2013).....	43
Tabelle 7: Kornfraktionentabelle (modifiziert nach EN ISO 14688-1, 2002).....	45
Tabelle 8: Auflistung der für die Modellversuche verwendeten Wildhölzer	48
Tabelle 9: Ablagerungsvolumina für die Versuche mit rechteckiger Beckenform.	52
Tabelle 10: Ablagerungsvolumina für die Versuche mit birnenförmigen Becke.	52
Tabelle 11: Mittelwerte und Standardabweichung der Versuche gegliedert nach der Beckenform.....	53

Formelverzeichnis

Formel 1: Reynolds Zahl für den laminaren Bereich, (LECHER, K. et al., 2001)	13
Formel 2: Reynolds Zahl für den turbulenten Bereich, (LECHER, K. et al., 2001).....	13
Formel 3: Reynolds Zahl für Fließgerinne im laminaren Bereich, (LOISKANDL, 2009)	15
Formel 4: Reynolds Zahl für Fließgerinne im turbulenten Bereich, (LOISKANDL, 2009).....	15
Formel 5: Berechnung der Froude- Zahl, (LECHER, K. et al., 2001)	17
Formel 6: Berechnung des Wirkungsgrades einer Siebsperrre, (HAMPEL, 1974).....	23

1 Einleitung

Hochwasserereignisse sind keine Phänomene vergangener Jahrhunderte, sondern sie sind vielmehr ein ständiger Begleiter unserer Zeit und damit auch in Zukunft ein brisantes Thema für die Wildbach- und Lawinenverbauung. Zwar zählt die Errichtung von Rückhaltebauwerken bei gefährdeten Siedlungsräumen im Alpenraum schon beinahe zu einem Standardprozedere, jedoch ist es oft schwierig abzuschätzen, welche Dimensionen tatsächlich gewählt werden sollen.

Während die Errichtung der ersten Rückhaltebauwerke noch zum Ziel hatte, das Geschiebe vollständig zurückzuhalten, so wurde in den letzten Jahrzehnten versucht, eine gewisse Durchgängigkeit zu erreichen. Während dem Hochwasserereignis sollte vor allem das schadhafte Grobgeschiebe zurückgehalten werden und mit dem Niederwasserabfluss eine weitgehend selbsttätige Spülung der feinen Sediment- und Kiesanteile stattfinden (HAMPEL, 1968).

Damit diese Wunschvorstellung auch greifbar wurde, haben vor allem in den letzten Jahrzehnten einige Theoretiker und Praktiker versucht, sich diesem Problem anzunehmen. HAMPEL (1974) macht Angaben über das Verhältnis Balkenabstand zu Größtkorn, bei dem eine gute Entleerung von Siebperren erzielt werden könne. SETZNAGEL (1989) hat selbst zahlreiche Modellversuche mit verschiedenen Rückhaltebauwerken durchgeführt, um so die unterschiedlichen Funktionsweisen darzulegen. Neben anderen Autoren weist vor allem ZOLLINGER (1983) auf die Wildholzproblematik hin, da der Einfluss von Verklausungen auf die Geschiebedurchgängigkeit sich oft nur schwer abschätzen lässt.

In der Literatur finden sich zwar Empfehlungen, wie die Wirkungsweise und die Funktionalität eines Rückhaltebauwerks hinsichtlich der Geschiebedurchgängigkeit verbessert werden könnte. Die Realität hat jedoch gezeigt, dass der angestrebte Effekt, nämlich während einem Hochwasserereignis schadhaftes Geschiebe zurückzuhalten und anschließend abgelagertes Geschiebe mit dem Niederwasser abzuspülen, nur unbefriedigend erreicht wird oder in manchen Fällen gar vollständig ausbleibt.

Die durch diese Arbeit neu gewonnen Erkenntnisse, sollen als eine mögliche Hilfestellung für die Planung und Dimensionierung zukünftiger Rückhaltebauwerke angesehen werden.

1.1 Zielsetzung

Die Durchführung physikalischer Modellversuche zur Optimierung von Filtersperren hat zum Ziel, die Vor- und Nachteile einer offenen Sperre mit Balken oder Rechen aufzuzeigen und gegenüberzustellen. Beide Filtersperrentypen sollen während der Dauer eines Abflussereignisses grobe Kornfraktionen, meist Steine und Felsbrocken im Ablagerungsbecken zurückhalten und anschließend mit dem Abklingen der Abflussganglinie die feinen Sedimente, wie Kiese und Sande durch das Sperrenbauwerk hindurchspülen.

Weiters soll der hydraulische Rückstauereffekt, welcher zwangsläufig durch die konstruktive Ausbildung von horizontalen und vertikalen Stäben entsteht, dokumentiert und festgehalten werden. Der Einfluss einer sich ausbildenden, in das Rückhaltebecken weiter zurück reichenden Wasserspiegellage, auf den Geschiebetransport und dabei vor allem auf den Geschiebeablagerungsprozess, ist von besonderem Interesse.

Eine entscheidende Fragestellung, welche im Zusammenhang mit der Durchführung physikalischer Modellversuche zur Optimierung von Filtersperren geklärt werden soll, bezieht sich auf die Einflussnahme der Beckenform auf den Geschieberückhalt. Hierbei sollen mögliche Unterschiede des Geschiebeeintrags, sowie Transport- und Ablagerungsprozesse in einem rechteckigen, sowie einem birnenförmigen Rückhaltebecken aufgezeigt werden.

Die Durchführung der physikalischen Modellversuche hat zum Ziel, Szenarien zu simulieren, in denen Versuchsreihen unter der Betrachtung des Reinwasserabflusses, dem Eintrag von Geschiebe, aber auch der Kombination von Geschiebe und Wildholz, durchgeführt werden.

Die Gegenüberstellung der Versuchsreihen soll Aufschluss darüber geben, welcher Sperrtyp sich am besten eignet, um einerseits grobe Kornfraktionen des Geschiebes während dem Spitzenabfluss zurückzuhalten und andererseits feine Sedimente hindurch zu schleusen. Das Verhältnis von Größtkorn zu lichter Durchflussweite, sowie der Zusammenhang zwischen der Querschnittsfläche des Sperrenbauwerkes und der tatsächlich nutzbaren Durchflussfläche, sind von entscheidender Bedeutung.

2 Grundlagen

2.1 Klassifizierung von Rückhaltebauwerken

Durch die ständige Weiterentwicklung bestehender und Konzipierung neuer Wildbachsperrren entstand der Wunsch, eine Klassifizierung für die unterschiedlichen Bautypen zu erstellen. In den letzten Jahrzehnten haben sich Autoren an diese Aufgabenstellung herangewagt und ihre teilweise sehr unterschiedlichen Konzepte und Varianten veröffentlicht. Dabei zählen KRONFELLNER- KRAUS (1970) sowie LEYS & RICCABONA (1970) wohl zu den Vorreitern, die sich eine Einteilung und bessere Übersicht der Bauwerke zum Ziel gesetzt haben (HÜBL, J. et al., 2003).

Weitere Autoren wie ÜBLAGGER (1973), HAMPEL (1974), KETTL (1984) und ZOLLINGER (1986) haben die vorliegenden Konzepte weiter verfolgt beziehungsweise ganz neue Ansätze einer Klassifizierung angestrebt (HÜBL, J. et al., 2003).

Im WLS Report 50/Band 2 (2003) wird in der Klassifikation von Wildbachsperrren zwischen Vollwandsperrren (Bauwerke ohne funktionellen Öffnungen) und offenen Sperrren (Bautypen deren Öffnungen geschiebedurchgängig sein sollen), unterschieden. Letztere werden noch hinsichtlich ihrer Form, sowie den Elementen welche zur Abdeckung der Aussparung eingesetzt werden, beschrieben.

In der ONR 24800 findet sich eine Darstellung der Klassifizierung von Sperrrenbauwerken der Wildbachverbauung. Die in Abbildung 1 dargestellten Bauwerke werden nach ihren Eigenschaften und ihrer Funktionsweise angeführt und gegenübergestellt.

Leitfunktion	Stabilisierung Konsolidierung		Retention (Rückhalt)		Dosierung		Filterung		Energieumwandlung	
	Konsolidierungssperre Grundswellen Sohlgurte Rampen	Retentionsperren Wasser- Geschiebe- retentionssperre		Dosiersperre Wasser- Geschiebe- dosiersperre		Filtersperre Grobgeschiebe- Wildholz- filtersperre		Murbrecher Absturzbauwerk Bremsbauwerk		
Konstruktionsart	Vollwandsperre (Geschlossene Sperre)		Einfache Vollwandsperre			Mehrfache Vollwandsperre (Kaskadensperre)				
	Offene Sperre		Kronengeschlossene Sperre			Kronenoffene Sperre				
			Kleindolige Sperre Großdolige Sperre			Schlitzsperre		aufgelöste Sperre	Gittersperre Netzsperr Seilsperre	
statisches System	Gewichtssperre	Gewölbesperre (Bogensperre)	Plattensperre			Aufgelöste Tragwerke				
			Einfache Platten- sperre	Pfeiler- platten- sperre	Winkel- stütz- mauer	Massenaktive Tragwerke		Vektoraktive Tragwerke		
						Grobfilter Murbrecher	Gittersperre (biegesteif)	Netzsperr (biegeweich)		
Baustoff	...in Holz ...in Stein ...in Konstruktionsbeton (bewehrt, unbewehrt) ...in Stahl									
Verschluss Öffnungen	...mit Balken (Holz, Stahl) ...mit Rechen (Schrägrechen) ...mit Rost ...mit Schütz (Stauklappe)									

Abbildung 1: Klassifizierung von Sperrenbauwerken nach ONR 248000

2.2 Gegenüberstellung der Wirkungsweise von Balken- und Rechensperren

Die Balkensperre ähnelt von der Bautype jener einer Schlitzsperre, mit dem Unterschied, dass die Öffnung mit horizontalen Stabprofilen angefertigt ist. Maßgebenden Einfluss auf die Funktionsfähigkeit nimmt die Höhe der Sperre, die Stärke der Stäbe sowie der Balkenabstand (BERGMEISTER, K. et al., Sonderdruck 2008).

In Abbildung 2 ist eine Kombination aus einer Schlitz- und einer Balkensperre dargestellt.



Abbildung 2: Kombination aus einer Schlitz- und einer Balkensperre; Quelle: (WEBER, 2006)

Der Wirkungsgrad und damit die Geschiebedurchgängigkeit hängen vom Verhältnis Balkenabstand zu Größtkorn ab, wobei ein Wert von 1,5 laut HAMPEL (1968) nicht unterschritten, beziehungsweise der Mindestabstand zwischen Balken nicht kleiner als die doppelte Balkenstärke sein sollte (HAMPEL, 1968).

ZOLLINGER (1983) sieht den Vorteil von Balkenkonstruktionen vor allem bei der möglichen Variation der Durchlassöffnungen, weist jedoch auf drei wesentliche Punkte hin:

1. Der Abstand der Balken muss ohne großen Aufwand leicht veränderbar sein
2. Die Profilstäbe sollen von der Luftseite aus befestigt und auswechselbar sein
3. Bei Erschütterungen und mechanischen Einwirkungen dürfen sich die Balken nicht lösen

Der Grobgeschiebe- und Wildholzanteil eines Hochwasserereignisses beeinflusst den Verklausungsprozess an der Sperrenöffnung und führt unter Umständen zu einer raschen Verlandung des Rückhaltebeckens. Ist eine Balkensperre verlegt, so kann eine selbsttätige

Entleerung nur in den seltensten Fällen erwartet werden und eine maschinelle Räumung wird erforderlich (BERGMEISTER, K. et al., Sonderdruck 2008).

Die Idee bei der Errichtung einer Rechensperre ist jene, dass ein Rost (Rechen) schräg von der Sohle beginnend, bis hinauf zur Oberkante des Bauwerks reicht (Abbildung 3). Im Gegensatz zu einer Balkensperre soll nun das Treibholz entlang dieses Rechens aufgleiten und so den Geschiebetrieb weiter aufrechterhalten. Durch die erhöhte Schleppkraft zwischen den vertikal eingebauten Rechenstäben wird eine selbsttätige Entleerung begünstigt und das Geschiebe kann unter dem zurückgehaltenen Holzteppich die Sperre passieren (BERGMEISTER, K. et al., Sonderdruck 2008).



Abbildung 3: Rechensperre mit ausgerundeten MSH Stahlträgern;

Komplikationen treten jedoch auf, wenn das Treibholz durch einen Rückgang der Hochwasserwelle absinkt und schließlich den Geschiebetrieb zum Erliegen bringt. Ein Rückstau in den Verlandungsraum durch Wasser, Geschiebe und Treibholz ist die Folge

und ähnlich der Verklausung einer Balkensperre, muss eine maschinelle Räumung in Erwägung gezogen werden (BERGMEISTER, K. et al., Sonderdruck 2008).

Damit der Geschiebetrieb möglichst lange aufrecht erhalten werden kann, wird bei der Konstruktion und auf die Ausbildung des Rechens großer Wert gelegt. Während bei den ersten Bauwerken der gesamte Rechen mit einer Schräglage von 45° errichtet wurde, so kommen heute mehrfach zusammengesetzte Rechenteile zum Einsatz. Der unterste Rechenabschnitt wird horizontal ausgeführt und gleicht einem Tiroler Wehr. Daran anschließend folgen weitere Rechensegmente die mit zunehmender Höhe des Bauwerks immer steiler geneigt sind (BERGMEISTER, K. et al., Sonderdruck 2008).

Zwar wird der Effekt des Aufgleitens von Treibholz entlang der Rechenstäbe angestrebt, es muss jedoch Sorge dafür getragen werden, dass eine mögliche Holztrift über die Abflussektion unter allen Umständen vermieden wird. Es empfiehlt sich die Errichtung von vertikalen I-Trägern an der Krone der Abflussektion (BERGMEISTER, K. et al., Sonderdruck 2008).

2.3 Wasserbauliches Versuchswesen

Komplexe Strömungsvorgänge lassen sich nicht immer durch numerische Modelle beschreiben und ausdrücken. Das wasserbauliche Versuchswesen stellt eine Alternative zu mathematischen Modellen dar und gibt eine Hilfestellung zur Lösung strömungstechnischer Fragestellungen durch die Überprüfung und Weiterentwicklung neuer Theorien. Durch die Gewinnung neuer Erkenntnisse und die Erstellung einheitlicher Regelwerke, sollen Bauprojekte verbessert und optimiert, sowie Fehlplanungen und Baumängel vermieden werden (KROUZECKY, k.A).

Bei der Betrachtung eines wasserbaulichen Modells unterscheidet man zwischen einem Ähnlichen, die Größen werden naturähnlich nachgebildet, es besteht ein direkter Bezug zwischen Modell und Natur und einem unähnlichen Modell, die betrachteten Größen können nicht alle unmittelbar auf die Natur in einem direkten Verhältnis umgelegt werden (KROUZECKY, k.A).

Das numerische Modell hingegen stützt sich auf Modellierungen die im 1D, 2D und dem 3D Modus berechnet werden. In Abbildung 4 findet sich eine Gegenüberstellung der beiden Modelltypen (KROUZECKY, k.A).

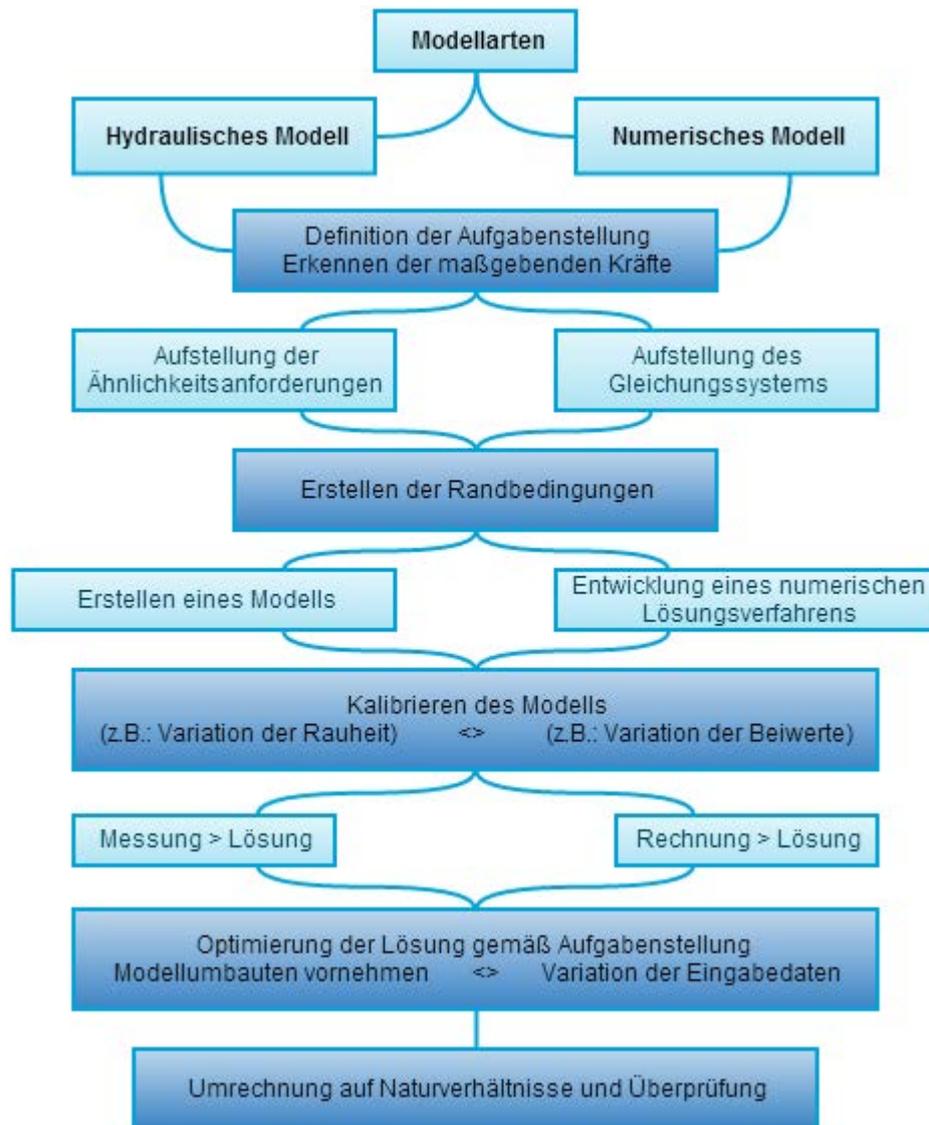


Abbildung 4: Gegenüberstellung des hydraulischen und des numerischen Modells; Quelle: eigene Darstellung, modifiziert nach (KROUZECKY, k.A)

2.1.1 Konnex von Natur und Modell

Damit im wasserbaulichen Versuchswesen Fragestellungen beantwortet werden können und ein Bezug zwischen Modell und Natur hergestellt werden kann, müssen drei Modellgesetze als Grundlage herangezogen werden (KROUZECKY, k.A).

1. Geometrische Ähnlichkeit: Dabei stehen die Längen aus dem Modell in einem bestimmten Verhältnis zu jenen aus der Natur. Der Zusammenhang lässt sich dabei über die Maßstabszahl L oder dem λ ausdrücken.
2. Kinematische Ähnlichkeit: In der Natur, sowie im Modell stehen korrespondierende Zeitintervalle in einem bestimmten Zusammenhang. Sie werden über das Verhältnis, dem Zeitmaßstab ausgedrückt.
3. Dynamische Ähnlichkeit: Durch die Kräftemaßstabszahl lassen sich Kräfte, die in der Natur und im Modell auftreten und einander entsprechen, in einem konstanten Verhältnis ausdrücken. Dabei muss als Bedingung gelten, dass in der Natur aber auch im Modell, die resultierenden Kräfte auf ein Flüssigkeitsteilchen die gleiche Richtung aufweisen.

2.1.2 Modellgesetze

Die Problematik besteht darin, dass Kräfteverhältnisse bei Modelluntersuchungen nur in jenem Fall zu einander gleich sind, wenn bei Verwendung der gleichen Flüssigkeit der Maßstab Modell : Natur 1:1 eingehalten wird (KROUZECKY, k.A).

Ein Modellgesetz leitet sich durch die Kombination zweier maßgebender Kräftearten ab. Für Strömungsuntersuchungen werden folgende Kräftearten berücksichtigt (KROUZECKY, k.A):

- Trägheitskräfte
- Druckkräfte
- Schwerkraft
- Reibungskräfte
- Kapillarkräfte

- Elastizitätskräfte

Damit ein Versuch den Modellgesetzen entspricht, ist es entscheidend, die beiden maßgebenden Kräftearten festzulegen und bei den Modelluntersuchungen zu berücksichtigen (KROUZECKY, k.A).

KROUZECKY (k.A) macht Angaben über die wichtigsten Modellgesetze:

1. Modellgesetz nach Euler: Die maßgebenden Kräfte ergeben sich aus dem Druck und der Trägheit.

$$\text{Formel: } Eu = \frac{\text{Trägheit}}{\text{Druck}} = \frac{F_T}{F_D} = \frac{v}{\sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}}$$

Formel 1: Modellgesetz nach Euler, (KROUZECKY, k.A)

Anwendung: Zur Ermittlung von Ausfluss- und Verlustbeiwerten

2. Modellgesetz nach Froude: Neben der Trägheit ist die Schwerkraft von entscheidender Bedeutung.

$$\text{Formel: } Fr = \frac{\text{Trägheit}}{\text{Schwere}} = \frac{F_T}{F_S} = \frac{v}{\sqrt{g \times h}}$$

Formel 2: Modellgesetz nach Froude, (KROUZECKY, k.A)

Anwendung: Bei Fließvorgängen mit freiem Wasserspiegel und bei Rohrströmungen im hydraulisch rauen Bereich

3. Modellgesetz nach Reynolds: Die dominierenden Kräfte sind die Trägheit und die Reibung.

$$\text{Formel: } Re = \frac{\text{Trägheit}}{\text{Zähigkeit}} = \frac{F_T}{F_Z} = \frac{v \times l}{\nu}$$

Formel 3: Modellgesetz nach Reynold, (KROUZECKY, k.A)

Anwendung: Bei Fließvorgängen im laminaren sowie im Übergangsbereich

4. Modellgesetz nach Weber: Die zu berücksichtigenden Kräfte setzen sich aus der Trägheit und der Kapillarkraft zusammen.

Formel: $We = \frac{\text{Trägheit}}{\text{Kapillarkraft}} = \frac{F_T}{F_K} = \sqrt{\frac{p \times l}{\kappa}} \times v$

Formel 4: Modellgesetz nach Weber, (KROUZECKY, k.A)

Anwendung: Bei Überfällen mit geringen Absturzhöhen, sowie Strömungen bei denen ein hohes Aufkommen von Luftblasen zu erwarten ist.

5. Modellgesetz nach Mach- Cauchy: Die maßgebenden Kräfte setzen sich aus der Trägheit und der Elastizität zusammen.

Formel: $Ma = \frac{\text{Trägheit}}{\text{Elastizität}} = \frac{F_T}{F_E} = \sqrt{\frac{p}{E}} \times v$

Formel 5: Modellgesetz nach Mach- Cauchy, (KROUZECKY, k.A)

Anwendung: Dieses Modellgesetz findet bei der Betrachtung von Druckstößen großen Zuspruch

6. Modellgesetz nach Mosonyi- Kovacs: Dieses Modellgesetz berücksichtigt die Zähigkeit und die Schwerkraft. Die Trägheitskräfte finden jedoch keine Anwendung und werden vernachlässigt.

Formel: $Mo = \frac{\text{Zähigkeit}}{\text{Schwere}} = \frac{F_Z}{F_S} = \frac{v \times v}{g \times l^2}$

Formel 6: Modellgesetz nach Mosonyi- Kovacs, (KROUZECKY, k.A)

Anwendung: Bei Fließvorgängen mit geringen Geschwindigkeiten, wie etwa bei der Modellierung von Grundwasserströmungen.

2.1.3 Umrechnungsfaktoren für hydraulische Modellversuche

Bei der Betrachtung von Modellversuchen müssen Größen wie Geschwindigkeit, Beschleunigung, Zeit, Durchfluss, etc. in Abhängigkeit vom jeweilig gewählten Modellgesetz im Maßstab umgerechnet werden. In Tabelle 1 sind sämtliche Umrechnungsfaktoren der Parameter für das jeweilige Modellgesetz aufgelistet (KROUZECKY, k.A).

Tabelle 1: Umrechnungsfaktoren zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Modellgesetze; Quelle: eigene Darstellung, modifiziert nach (KROUZECKY, k.A)

λ ... Modellmaßstab		Modellgesetze				
Parameter		Froude	Reynolds	Weber	Mach	Mosonyi
Längen	l	λ	λ	λ	λ	λ
Beschleunigung	b	λ^0	λ^{-3}	λ^{-2}	λ^{-1}	λ^3
Druck	p	λ	λ^{-2}	λ^{-1}	λ^0	λ
Geschwindigkeit	v	$\lambda^{1/2}$	λ^{-1}	$\lambda^{-1/2}$	λ^0	λ^2
Durchfluss	q	$\lambda^{5/2}$	λ^1	$\lambda^{3/2}$	λ^2	λ^4
Zeit	t	$\lambda^{1/2}$	λ^2	$\lambda^{3/2}$	λ^1	λ^{-1}

Die Wahl und die Entscheidung, welches Modellgesetz verwendet wird und welche Umrechnungsfaktoren berücksichtigt werden müssen, sind für die Durchführung von Modellversuchen unabdingbar (KROUZECKY, k.A).

Es ist zu bedenken, dass Modelle, die in einem zu kleinen Maßstab nachgebildet werden, bestimmte physikalische Einflüsse im Modellgesetz nicht mehr berücksichtigen können. Die Aussagekraft von zu klein gewählten Modellen ist nicht repräsentativ und die Ergebnisse können nicht in Zusammenhang mit der Natur gebracht werden (KROUZECKY, k.A).

Bei den physikalischen Modellversuchen zur Untersuchung der Funktionsfähigkeit von Filtersperren, wird das Modellgesetz nach Froude herangezogen.

2.1.4 Hydraulische Grundlagen

Bei der Betrachtung von Fließvorgängen von Flüssigkeiten wird zwischen dem laminaren und dem turbulenten Strömungszustand unterschieden (LECHER, K. et al., 2001).

Bei dem laminaren Strömungszustand bewegen sich die Flüssigkeitsteilchen auf parallelen Bahnen. Die turbulente Strömung zeichnet sich durch Unregelmäßigkeiten und Verwirbelungen im Abflussverhalten aus und sie tritt bei Überschreitung der Reynolds-Zahl $Re > 4000$ auf und wird mit zunehmender Entfernung von der Wandung immer instabiler. Während die Strömungsverluste bei einer laminaren Strömung mit der Geschwindigkeit v

anwachsen, so nehmen sie bei turbulenter Strömung mit der Geschwindigkeit zum Quadrat zu (LECHER, K. et al., 2001).

Die auf die Reynolds- Zahl einflussnehmenden Größen setzen sich aus der Geschwindigkeit (v_m), der charakteristischen Länge (l_{char}) beziehungsweise dem Durchmesser (d) und der kinematischen Zähigkeit (ν) einer Flüssigkeit zusammen. Die Formel zur Ermittlung der Reynolds- Zahl lautet wie folgt (LECHER, K. et al., 2001):

$$Re = \frac{v \times d}{\nu} < 2300 \quad \text{laminar}$$

Formel 1: Reynolds Zahl für den laminaren Bereich, (LECHER, K. et al., 2001)

$$Re = \frac{v \times d}{\nu} > 4000 \quad \text{turbulent}$$

Formel 2: Reynolds Zahl für den turbulenten Bereich, (LECHER, K. et al., 2001)

In den beiden Abbildungen 5 und 6 wird der Farbfadenversuch von Reynolds dargestellt. Beim laminaren Strömungszustand (Abbildung 5) bewegen sich die Farbteilchen auf nahezu parallelen Bahnen und es kommt zu keiner Durchmischung. Beim turbulenten Strömungszustand (Abbildung 6) hingegen reißt der Farbfaden bereits nach einer kurzen Fließstrecke ab und es kommt zu Verwirbelungen der Farbteilchen mit dem Fließmedium.

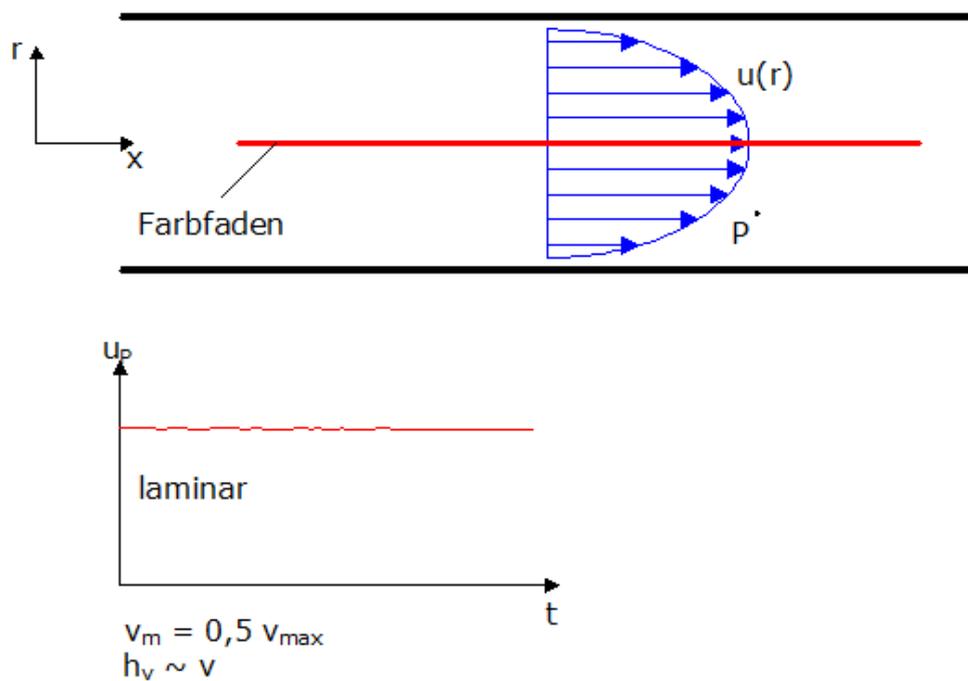


Abbildung 5: Laminarer Strömungszustand; Farbfadenversuch nach Reynolds. Quelle: eigene Darstellung, modifiziert nach (LOISKANDL, 2009)

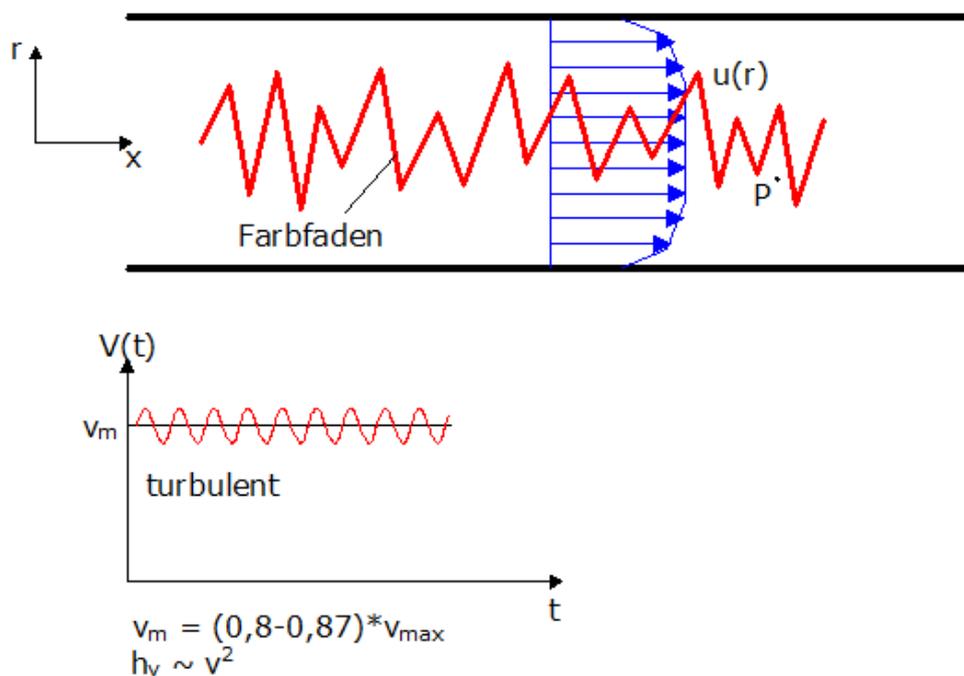


Abbildung 6: Turbulenter Strömungszustand; Farbfadenversuch nach Reynolds. Quelle: eigene Darstellung, modifiziert nach (LOISKANDL, 2009)

LOISKANDL (2009) erläutert den Zusammenhang zwischen der Rohr- und der Gerinneströmung. Die charakteristische Länge des Rohres, der Durchmesser, wird in der Gerinnehydraulik durch den hydraulischen Radius ersetzt. Daraus folgt:

$$R_{Gerinne} = \frac{v \times R}{\nu} < 600 \text{ laminar}$$

Formel 3: Reynolds Zahl für Fließgerinne im laminaren Bereich, (LOISKANDL, 2009)

$$R_{Gerinne} = \frac{v \times R}{\nu} > 2000 \quad \text{turbulent}$$

Formel 4: Reynolds Zahl für Fließgerinne im turbulenten Bereich, (LOISKANDL, 2009)

Darüber hinaus lässt sich der Strömungszustand von Flüssigkeiten in „Strömen“ dem Erreichen des „Grenzzustandes“ und in „Schießen unterteilen. Ein Grenzzustand kann immer dann erreicht werden, wenn die Bedingung $h_{E,vorh} = h_{E,min}$ erfüllt ist, etwa durch Sohlerhöhungen, Gefällewechsel und diverser anderer Einbauten (LECHER, K. et al., 2001).

Der Übergang vom Strömen zum Schießen passiert nicht schlagartig, sondern er erfolgt kontinuierlich, da der Einfluss des Fließwechsels flussauf und flussabwärts gerichtet ist (LECHER, K. et al., 2001).

Beim Übergang vom schießenden in den strömenden Abfluss hingegen reichen die Auswirkungen des strömenden Unterlaufes nicht bis in den schießenden Oberlauf zurück. Es stellt sich ein diskontinuierlicher Übergang ein. In der Hydraulik spricht man von einem sogenannten Wechselsprung, eine Ausbildung einer Deckwalze, deren Lagestabilität von oberhalb und unterhalb angreifenden Druck- und Impulskräften abhängig ist. In Abbildung 7 wird veranschaulicht, wie der Übergang vom „Strömen“ zum „Schießen“ und anschließend wieder der Wechsel auf „Strömen“ passiert (LECHER, K. et al., 2001).

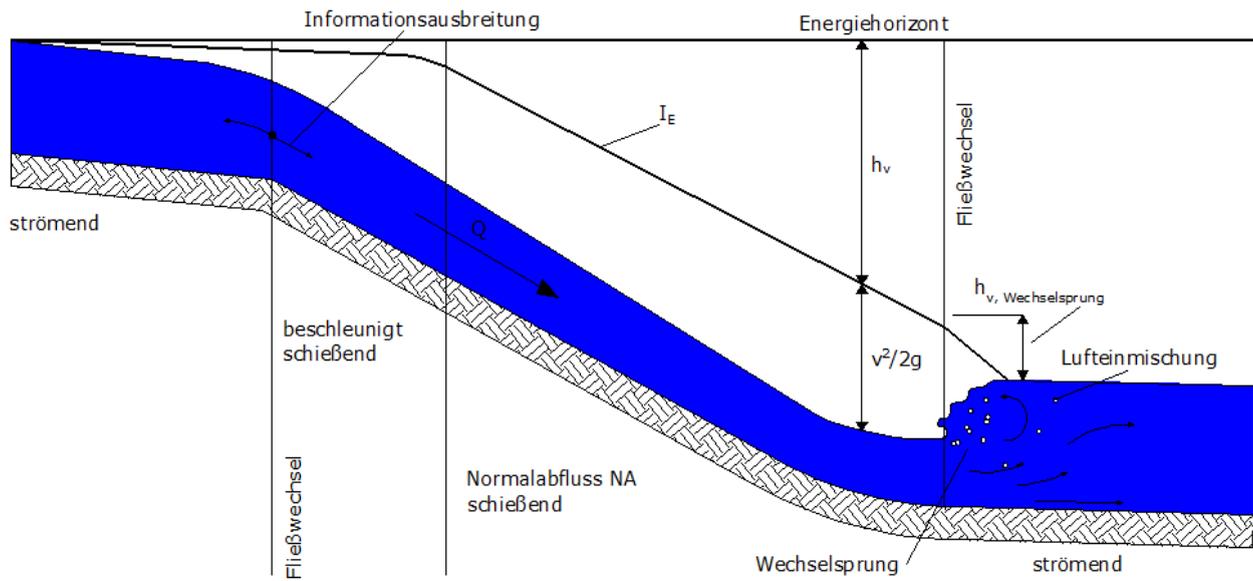


Abbildung 7: Fließwechsel: Strömen - Schießen - Strömen; Quelle: modifiziert nach LECHER, K. et al., 2001).

Durch die Ermittlung der Froude-Zahl kann der Strömungszustand einer Flüssigkeit beschrieben werden. In der Tabelle 2 findet sich eine Einteilung der möglichen Strömungszustände und in der Abbildung 8 werden diese nochmals grafisch veranschaulicht.

$$F_R = \frac{v}{\sqrt{g \times h}} = \frac{\text{Strömungsgeschwindigkeit}}{\text{Fortpflanzungsgeschwindigkeit}}$$

Formel 5: Berechnung der Froude- Zahl, (LECHER, K. et al., 2001)

Tabelle 2: Gegenüberstellung der möglichen Strömungszustände; Quelle: eigene Darstellung, modifiziert nach (LOISKANDL, 2009)

Strömen	Grenzzustand	Schießen
$v < v_{gr}$	$v = v_{gr}$	$v > v_{gr}$
$h > h_{gr}$	$h = h_{gr}$	$h < h_{gr}$
$Fr < 1$	$Fr = 1$	$Fr > 1$

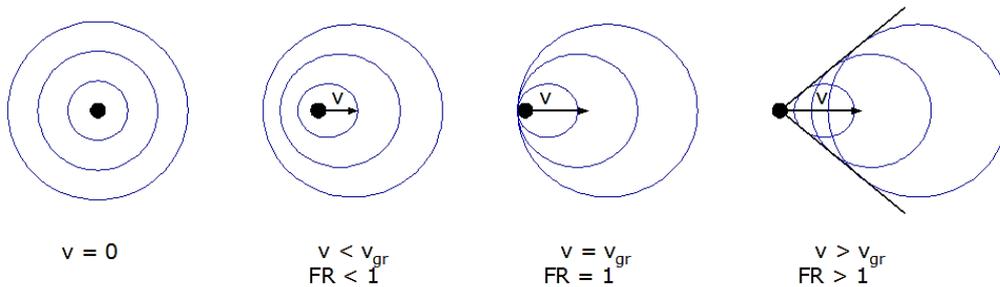


Abbildung 8: Grafische Darstellung der Strömungszustände; Quelle: eigene Darstellung, modifiziert nach (LOISKANDL, 2009)

3 Aufarbeitung früherer Modellversuche

3.1 Vorreiter für die Durchführung von Modellversuchen

Die in dem Kapitel 3 verwendeten Fachbegriffe werden von den jeweilig zitierten Autoren übernommen. Dabei handelt es sich teilweise um veraltete, aus heutiger Sicht nicht mehr gebräuchliche oder in einem anderen Zusammenhang gebrauchten Definitionen.

Die Durchführung physikalischer Modellversuche zur Dokumentation von Geschiebeprozessen in Ablagerungsplätzen ist keineswegs eine Erfindung des 21. Jahrhunderts.

Bereits im Jahre 1901 beschäftigt sich WANG (1901) mit der Entstehung von Schwemmkegeln. Um 1917 macht STINY (1917) Angaben darüber, wie der Aufbau eines Schwemmkegels von statten gehen soll.

Ein weiterer Autor, der in diesem Zusammenhang eine Rolle spielt, ist HAMPEL (1968). Er hat im Jahre 1968 zahlreiche Modellversuche hinsichtlich der Geschiebeablagerung in Wildbächen durchgeführt. HAMPEL's (1968) Interesse lag darin, Gesetzmäßigkeiten zu finden, um das Schadenspotential von transportiertem Geschiebe zu verringern und dieses an geeigneten Ablagerungsplätzen zurückzuhalten.

HAMPEL (1968) beschäftigt sich anfangs weniger mit den klassischen physikalischen Modellversuchen, wie wir sie heute kennen. Mit der Arbeit im Jahre 1968 dokumentiert er unter anderem die Ausbildung von Schwemmkegeln und gibt in diesem Zusammenhang Empfehlungen über die mögliche Errichtung von Geschiebeablagerungsplätzen.

Um den Einfluss unterschiedlicher Korngrößen zu verdeutlichen, verwendet er insgesamt sieben Sieblinien. Eine von ihm bereits durchgeführte Vorstudie zeigt, dass bei der Verwendung von feinkornarmen Geschiebe mit größerem Porenvolumen (Kalk) und feinkornreichem Urgebirgsgeschiebe mit kleinerem Porenvolumen große Unterschiede bei den Ablagerungsprozessen auftreten können (HAMPEL, 1968).

Für seinen Versuchsaufbau verwendet HAMPEL (1968) ein Holzgerinne mit vier Metern Länge, einer Sohlbreite von 10 cm und einer 1:1 geböschten Wand mit einer Höhe von 20 cm. Am oberen Ende der Versuchsrampe befindet sich die Wasserzugabe sowie die Beschickung mit Sand, welche durch ein Förderband erfolgt.

Damit HAMPEL (1968) ein grundlegendes Verständnis für die Entstehung eines Schwemmkegels bekommt, wählt er anfangs eine Sieblinie mit feinem homogenem Geschiebe aus.

Er berichtet in seiner Dokumentation, dass der mittransportierte Sand gleichmäßig in einem Kreisring zur Ablagerung gebracht wird. Anschließend verengt sich der Kreis zusehends und er nimmt nach einer fortlaufenden Versuchsdurchführung die Form eines Schwemmkegels an. Zwar kommt es mit zunehmender Kegelhöhe zur Ausbildung von Runsen und kleineren Gerinnen an der Oberfläche, diese werden jedoch durch einen Rückstau von Geschiebe wieder verfüllt und liefern damit einen regelmäßigen Aufbau des Kegels (HAMPEL, 1968).

Damit HAMPEL (1968) auch die Einflüsse und Auswirkungen anderer Parameter wie etwa dem Gefälle der Zuflussstrecke, der Wassermenge, dem Geschiebeanteil, der Mittelkorngröße und der Sieblinie berücksichtigen kann, führt er noch etwa 200 weitere Modellversuche durch.

Zusammenfassend lassen sich die Ergebnisse der Schwemmkegelversuche von HAMPEL (1968) wie folgt darstellen:

1. Die Verlandung hängt weniger von der Korngröße und dem Gefälle des Gerinnes ab, sondern sie ist vielmehr eine Funktion des Sandanteils. Steigert man den Sandanteil um etwa 7 %, so nimmt das Verlandungsprozent um etwa 1 % zu.
2. Steigert man das Gerinnegefälle um etwa 10 %, so wird das Verlandungsgefälle um etwa 1 % zunehmen.
3. Eine Durchmessersteigerung des Mittelkornes um den Faktor 10 bewirkt eine Zunahme des Verlandungsgefälles um 3 %.

ZOLLINGER (1983) hat sich in seiner Publikation „Die Vorgänge in einem Geschiebeablagerungsplatz“ ebenfalls mit der Entstehung von Schwemmkegeln beschäftigt. ZOLLINGER (1983) unterscheidet bei der Ausbildung des Kegels drei Phasen, legt jedoch als Bedingung fest, dass einerseits ein Einlaufbauwerk mit genügend großer Fallhöhe gewählt wird und andererseits die Neigung des Ablagerungsplatzes kleiner als jene des Zubringergerinnes sein muss:

1. Phase 1: Eintrag von Geschiebe in den Ablagerungsplatz und Entstehung eines Schwemmkegels

2. Phase 2: Durch Abrutschen kleinerer Teilhänge kommt es zur allmählichen Verflachung des Kegels
3. Phase 3: Einstellen des Verlandungsgefälles: Ablagerungen erreichen das Zulaufgerinne und können einen Rückstau oder einen Ausbruch des Fließgewässers bewirken.

Die Erkenntnisse, welche HAMPEL (1968) anhand der durchgeführten Schwemmkegelversuche gewinnen kann, lässt er schließlich in weitere Modellversuche einfließen und versucht so den optimalen Grundriss für einen Ablagerungsplatz zu finden.

Das Ziel besteht darin, ein Rückhaltebecken zu konzipieren, bei welchem auf möglichst kleinem Raum ein Maximum an abzulagerndem Geschiebe Platz findet. HAMPEL (1968) reduziert seine Untersuchungen auf folgende Punkte:

1. Einfluss einer rückwärtigen Begrenzung auf die Ausbildung eines Schwemmkegels
2. Auswirkung auf das Ablagerungsverhalten durch seitliche Begrenzungen
3. Errichtung eines Abschlussbauwerks zum Einstau des Ablagerungsplatzes

In der unten stehenden Abbildung 9 stellt HAMPEL (1968) schematisch die Ergebnisse der eingeschränkten Schwemmkegelausbildung dar. Die rückwärtige sowie die seitliche Einengung des Geschiebes verhindert, dass sich der Kegel frei ausbilden kann. Vielmehr wachsen entlang der Seitenwände Ablagerungszungen, deren Länge die Ausdehnung des primären mittleren Kegels sogar deutlich übersteigen kann.

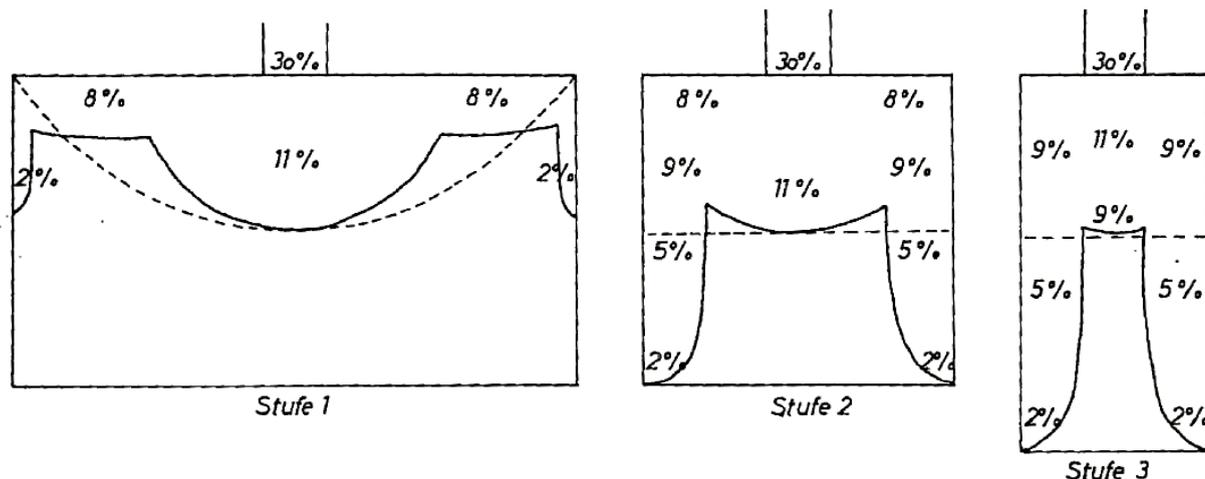


Abbildung 9: Begrenzung der freien Schwemmkegelausbildung durch den Einbau rückwärtiger und seitlicher Wände; Quelle: (HAMPEL, 1968)

HAMPEL (1974) kommt zum Schluss, dass ein Ablagerungsplatz nicht nur mit dem Grundriss eines Kegels, sondern auch mit einem Einlaufbauwerk großer Fallhöhe konzipiert werden soll. Er gibt zu bedenken, dass bei einem geringen Höhenunterschied die Problematik eines Rückstaus des Kegels in das Zulaufgerinne, meist verursacht durch Grobgeschiebe, zu einem möglichen Bachaustritt führen kann. Er schlägt daher vor, Blöcke und anderes schadhaftes Geschiebe durch konstruktive Maßnahmen im Gerinne, wie durch die Anordnung von Querbauwerken zurückzuhalten.

HAMPEL (1968) greift in seiner Publikation einen weiteren wichtigen Punkt für die Geschiebemanagement auf, nämlich die Funktionsweise von Entleerungssperren.

Bereits im Zeitraum zwischen erstem und zweitem Weltkrieg hat man erkannt, dass der vollständige Rückhalt von Geschiebe nicht zielführend sein kann, da ein Ablagerungsplatz seine mögliche Staukapazität unter Umständen vor dem Maximum der Hochwasserwelle erreichen kann und damit nur mehr unzureichend die Funktionsfähigkeit erfüllt (HAMPEL, 1968).

Für HAMPEL (1968) gilt es bei der Betrachtung von Entleerungssperren und einer möglichen Verbesserung der Geschiebedurchgängigkeit zwei Probleme zu lösen:

1. Schadhaftes Geschiebe soll zurückgehalten und feinere Komponenten sollen hindurchgeschleust werden, ohne den Unterlauf zu überlasten

2. Ausnützung der Klein- und Mittelhochwässer um abgelagertes Geschiebe weitgehend abzuspielen

Einen entscheidenden Einfluss auf das Ablagerungsverhalten von Geschiebe im Rückhaltebecken nimmt die Stauhöhe. Es hat sich gezeigt, dass das Geschiebe bei Erreichen des aufgestauten Wasserspiegels steil mit 60 % Gefälle abfällt, was bedeutet, dass bei einem Rückstau nur wenig Geschiebe die Sperre passieren kann und damit ein Großteil des Materials zurückgehalten wird (HAMPEL, 1968).

HAMPEL (1974) untersucht die Auswirkungen unterschiedlicher Sperrtypen, um eine selbsttätige Entleerung besser steuern und beeinflussen zu können.

Die Funktionsfähigkeit von Schlitzsperrn hängt weitgehend vom Verhältnis Schlitzbreite zu Größtkorn ab. Zwar spielt die Wassermenge und der Geschiebeanteil für einen möglichen Durchlass eine wichtige Rolle, letztendlich soll aber das Größtkorn nur halb so groß als die Schlitzbreite sein, um einen bedeutenden Geschiebetrieb zu erzielen (HAMPEL, 1974).

Ist das Geschiebe bereits abgelagert, so kann es meist nur mehr schwer mobilisiert werden. Das Auftreten von Klein- und Mittelhochwässern bewirkt zwar einen Spüleeffekt durch die Ausbildung von rückschreitenden Erosionsrinnen, jedoch spielt hierbei die Zusammensetzung des Geschiebes und dabei vor allem der Tonanteil eine große Rolle (HAMPEL, 1968).

Eine Siebsperre, deren Prinzip auf dem Rückhalt von Grobgeschiebe und der Durchschleusung feiner Kornfraktionen basiert, erzielt nur dann einen wesentlichen Geschiebedurchlass, wenn der Hochwasserabfluss weitgehend ohne Rückstau verläuft (HAMPEL, 1974).

HAMPEL (1974) sieht für eine gut funktionierende Siebsperre unter der Bedingung eines staulosen Abflusses folgende Voraussetzungen als wesentlich an:

1. Das Verhältnis Balkenabstand zu Größtkorn soll größer sein um eine selbsttätige Entleerung zu erreichen
2. Horizontale Balken sind gegenüber den Vertikalen vorzuziehen.
3. Der lichte Stababstand soll nicht kleiner als die eineinhalbfache Balkenstärke gewählt werden.

4. Die Errichtung von Sperrenstaffeln mit abnehmendem Balkenabstand verbessert den Wirkungsgrad von Siebsperren.

Neben den oben genannten Punkten nimmt auch das Stauprozent (Verhältnis: Kornanteil größer Balkenabstand zu Wasserabflussmenge) Einfluss auf die Funktionsfähigkeit einer Siebsperre. Daraus erfolgt nach HAMPEL (1974) die Berechnung des Wirkungsgrades einer Siebsperre wie folgt:

$$\eta = 40 * (1 - \log Stp) [\%]$$

Formel 6: Berechnung des Wirkungsgrades einer Siebsperre, (HAMPEL, 1974)

η [%] Wirkungsgrad einer Siebsperre in Prozent

Stp Stauprozent

Für ZOLLINGER (1983) sind zwei Parameter maßgebend, um Einfluss auf die Geschiebedurchgängigkeit in einem Ablagerungsplatz zu nehmen:

1. Größe und Form des Rückhalteraums
2. Errichtung und Ausführung der Rückhaltesperre betreffend der Durchlassöffnung, sowie der Höhe des Überfallbauwerks

Darüber hinaus muss gewährleistet sein, dass es im Unterlauf durch das durchgeschleuste Geschiebe nicht zu Auflandungen kommt und der Vorfluter in der Lage ist, das Material gefahrlos abzutransportieren (ZOLLINGER, 1983).

ZOLLINGER (1983) gibt zu bedenken, dass eine selbsttätige Entleerung zeitlich variabel und unkontrollierbar mit schwankendem Abfluss auftreten kann. Es ist nicht zwingend, dass das allmähliche Abklingen der Geschiebeablagerung gleichzeitig der Beginn einer selbsttätigen Entleerung sein muss. Vielmehr unterliegen Prozesse wie etwa jene einer Ablagerung sowie jene einer Spülung, dem Zufallsprinzip.

ZOLLINGER (1983) sieht für eine selbsttätige Entleerung folgende Punkte als günstig wirkend an:

1. Große Abflüsse mit geringem Geschiebeanteil

2. Hoher Anteil von inhomogenem Kleingeschiebe und das Fehlen von bindigen Komponenten.
3. Die Errichtung schmaler, langgezogener und steiler Ablagerungsplätze
4. Ein Rückstau von Wasser in den Geschiebeablagerungsplatz bewirkt bei der Spülung eine Reduktion der Geschiebespitzen
5. Das Fehlen von Treibholz beziehungsweise das Entfernen von Verklausungen am Rückhaltebauwerk
6. Aufreißen und Entfernen der Deckschicht mittels Bagger im Ablagerungsbereich

Darüber hinaus macht ZOLLINGER (1983) Angaben darüber, welche Voraussetzungen unerlässlich für eine selbsttätige Entleerung sind. Dabei müssen vier Zwangspunkte eingehalten werden:

1. Die Abflussöffnung eines Rückhaltebauwerks muss über die gesamte Höhe geöffnet sein, es können jedoch Elemente, wie Balken dazwischen angeordnet werden
2. Unterlauf und Vorfluter müssen das Geschiebe gefahrlos abtransportieren können
3. Die Zugänglichkeit von Maschinen für die Räumung im Bedarfsfall muss gewährleistet sein
4. Wartungsarbeiten und Kontrollgänge sind als eine Notwendigkeit anzusehen

Die Betrachtung der Empfehlungen und der Konzepte die hinsichtlich der Rückhaltebauwerke und der Ablagerungsplätze zur Geschiebemanagement vorliegen, könnten den Eindruck erwecken, dass die Geschiebeprozesse weitgehend regel- und steuerbar sind. Naturereignisse zeigen jedoch immer wieder eindrucksvoll auf, wie schmal der Grat letztendlich sein kann, ob ein Hochwasserereignis schadlos abgeführt werden kann, oder es aber auch zu einer Katastrophe führen kann.

Tatsache ist, dass viele Probleme oft weniger durch das Geschiebe, sondern vielmehr durch das mitgeführte Treibholz verursacht werden. Die Ausbildung einer Verklausung am Rückhaltebauwerk kann einen Wasserstau verursachen, der wiederum das Geschiebe frühzeitig zur Ablagerung zwingt und damit eine mögliche einsetzende selbsttätige Entleerung unterbindet. Um einen Spüleffekt durch ein Nieder- oder Mittelhochwasser zu

erreichen, muss die Holzablagerung aufwendig durch den Einsatz von Maschinen beseitigt werden (ZOLLINGER, 1983).

Für ZOLLINGER (1983) gibt es drei Varianten, um das Treibholz schadlos zur Ablagerung zu bringen:

1. Rückhalt von Treibholz oberhalb des Ablagerungsplatzes durch Rechen-, Gitter-, und Netzsperrern
2. Setzen von Maßnahmen im Geschiebeablagerungsplatz wie beispielsweise die Kombination von Schlitz- oder Balkensperrern mit Schrägrechen
3. Einstau des Ablagerungsbeckens um eine Holztrift über das Rückhaltebauwerk zu erreichen (eine interessante, aber laut ZOLLINGER (1983) eine noch nicht ausgereifte Idee)

Damit die Problematik einer Verklausung weitgehend entschärft werden kann, sollen laut ZOLLINGER (1983) folgende Maßnahmen durchgeführt werden:

1. Entfernen von altem Treibholz im Ablagerungsplatz und Zerkleinerung von Hölzern auf eine Länge von 50 cm
2. Regelmäßige Kontrolle von Treibholzherden und potentiellen Rutschhängen

Zusammenfassend ist laut ZOLLINGER (1983) nur dann eine Handhabung von Verklausungen gegeben, wenn eine Trennung von Holz und Geschiebe angestrebt wird.

SETZNAGEL (1989) hat sich in seiner Diplomarbeit ebenfalls ausgiebig mit der Durchführung von physikalischen Modellversuchen unter Verwendung verschiedener Wildbachsperrern beschäftigt. Seine Untersuchungen konzentrieren sich dabei auf die Funktionsfähigkeit acht unterschiedlicher Sperrertypen. Die ausgewählten Versuchsreihen beinhalten Szenarien mit Hochwasser- und Murenabflüssen, sowie Modellversuche mit Reinwasserabfluss zur Dokumentation möglicher Abspülversuche. Darüber hinaus wird der Einfluss des eingetragenen Wildholzes auf die Wirkungsweise der unterschiedlichen Wildbachsperrern beobachtet und diskutiert.

3.2 Ergebnisse der von HAINZER 2013 durchgeführten physikalischen Modellversuche am Schöttlbach

HAINZER (2013) hat für die Durchführung der physikalischen Modellversuche am Institut für Alpine Naturgefahren die Wirkungsweise einer Rechensperre während einem Hochwasserabflussereignis näher betrachtet. Dabei hat er vier Versuchsvarianten erarbeitet, die zwar das selbe Setup hinsichtlich der Abfluss- und Geschiebeganglinie beinhalten, jedoch die Sperrbauwerke unterschiedliche lichte Stabweiten aufweisen.

HAINZER (2013) hat eine Linienzahlanalyse am Schöttlbach durchgeführt und über eine Maßstabszahl von $M_L 30$ nicht nur die Sieblinie skaliert, sondern das Verhältnis auf den gesamten Modellaufbau umgelegt. Das Rückhaltebecken wurde dabei in einer schlanken Rechteckform, mit einer Längsneigung von 4 % ausgebildet.

Die von HAINZER (2013) betrachtete Rechensperre gliedert sich in drei, durch Wandscheiben voneinander getrennte Felder. Die konstruktive Ausbildung der Filtersperre ermöglicht es, einzelne Rechenstäbe zu entnehmen beziehungsweise hinzuzufügen. Dadurch kann der Stababstand variabel verändert und maßgebend Einfluss auf den Geschiebeablagerungsprozess im Rückhaltebecken genommen werden.

Das Ablagerungsvolumen der einzelnen Modellversuche bestimmte HAINZER (2013) mit Hilfe von Laserscanaufnahmen. Die Veränderung der lichten Stabweite spiegelt sich dabei in den unterschiedlichen Rückhaltevolumina der Versuchsreihen wieder. Bei der Durchführung der physikalischen Modellversuche vergleicht HAINZER (2013) neben Versuchen mit Geschiebezugabe auch die Auswirkung eines Reinwasserabflusses und in diesem Zusammenhang einen möglichen hydraulischen Rückstauereffekt in das Rückhaltebecken.

3.3 Weiterführende physikalische Modellversuche

TROJER (2013) hat sich ebenfalls mit der Durchführung von physikalischen Modellversuchen beschäftigt. Das Hauptaugenmerk wurde dabei auf Filtersperren gelegt und es erfolgte eine Gegenüberstellung der unterschiedlichen Wirkungsweisen einer Rechen- und einer Balkensperre.

In einer Vorstudie zeigte er anhand von Trockenversuchen, welche durch eine reine Beschickung von Sediment auf das Rückhaltebauwerk durchgeführt wurden, wie sich mögliche Ablagerungs- und Verklausungsmechanismen ausbilden können. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse waren wesentlicher Bestandteil für die weiterführenden Modellversuche. TROJER (2013) hat bei der Durchführung der physikalischen Modellversuche zwischen folgenden Versuchsreihen unterschieden:

- Rechensperre: Zugabe von Sediment
- Rechensperre: Zugabe von Sediment und Wildholz
- Balkensperre: Zugabe von Sediment
- Balkensperre: Zugabe von Sediment und Wildholz

Neben der Dokumentation des Einflusses von Geschiebe und Wildholz auf den Ablagerungsprozess im Rückhaltebecken, sowie der möglichen Ausbildung von Verklausungen an der Filtersperre, wurden weitere Erhebungen zum Einsetzen selbsttätiger Entleerungen durchgeführt. Darüber hinaus wurden Untersuchungen angestellt, welche Aufschluss darüber geben sollten, welche Auswirkungen durch das Auftreten hydraulischer Rückstaueffekte zu erwarten sind. TROJER (2013) weist in der Zusammenfassung und Interpretation der Versuchsergebnisse darauf hin, dass ein hydraulischer Rückstaueffekt und damit ein Ansteigen der Wasserspiegellage im Rückhaltebecken, eine vorzeitige Ablagerung des Geschiebes zur Folge hat.

TROJER (2013) kommt zu dem Schluss, dass sich die Filterwirkung einer Rechen- und einer Balkensperre ohne der Zugabe von Wildholz weitgehend durch die Veränderung des lichten Stababstandes beeinflussen und regulieren lässt.

Die von TROJER (2013) durchgeführten physikalischen Modellversuche zeigen, dass bereits ein Wildholzanteil von 0,15 % bezogen auf das verwendete Geschiebevolumen von 1,05 m³, eine große Streuung der Ablagerungsvolumina bei beiden Sperrenbauwerken zur Folge hat. Er weist aber darauf hin, dass die Rechensperre auf Grund ihrer konstruktiv ausgebildeten abgetreppten Form, das Aufschwimmen und das Ausbilden von Holzteppichen fördert und damit im Gegensatz zu der Balkensperre, welche zu massiven und widerstandsfähigen Verklausungen neigt, zu bevorzugen ist.

4 Modellversuche

Aufbauend auf die von HAINZER (2013) und TROJER (2013) durchgeführten physikalischen Modellversuche, werden weitere Versuchsreihen zur Untersuchung und Dokumentation der Wirkungsweise von Filtersperren unternommen.

Die Versuchsreihen unterliegen ebenfalls dem Modellgesetz der geometrischen Ähnlichkeit und Größen wie etwa die Länge, die Breite und die Höhe können direkt aus der Natur durch einen Maßstab in das Modell übertragen werden. Dabei wurde die Maßstabszahl M_L 30 gewählt.

4.1 Erläuterung des Versuchsaufbaues

4.1.1 Versuchsanordnung

Der Versuchsaufbau für das Fließgerinne gliedert sich in vier wesentliche Abschnitte:

- Durchmischungszone
- Einlaufgerinne
- Rückhaltebecken
- Sperrenbauwerk

In der U- förmigen glatten Durchmischungszone werden die beiden Hauptkomponenten Wasser und Sediment miteinander vermengt, sowie das Wildholz optional dazugegeben. Dieser Abschnitt ist dafür verantwortlich, dass alle Komponenten ausreichend miteinander vermischt und anschließend in das Einlaufbauwerk weitergeleitet werden (siehe Abbildung 10).



Abbildung 10: linkes Bild: Durchmischungszone; im Hintergrund Thomson Wehr mit seitlicher Sedimentzugabe; rechtes Bild: Der Übergang von der Durchmischungszone zum Einlaufbauwerk

Beim Übergang vom Einlaufbauwerk in das Rückhaltebecken kommt es zu einer abrupten Aufweitung des Fließquerschnittes. Die geometrischen Abmessungen des trapezförmigen Rückhaltebeckens erreichen in der Länge 4 m und in der Breite 1 m. In der Höhe sind Ablagerungen von bis zu 0,4 m möglich. Bei der Versuchsreihe mit birnenförmigen Ablagerungsbecken wird die Versuchsrinne auf einer Länge von 2 m auf bis zu 2 m aufgeweitet. Die Geometrie des länglichen Ablagerungsbeckens ist in Abbildung 11 dargestellt, während Abbildung 12 das birnenförmige Becken zeigt.

Während das Längsgefälle des Einlaufbauwerks 8 % beträgt, so wird die Neigung des Rückhaltebeckens auf 4 % reduziert.

Damit der Versuchsaufbau möglichst realitätsnahe umgesetzt werden kann, wird die Sohle, sowie weite Teile der Böschungen im Rückhaltebecken mit einer Rauigkeit versehen. Dafür wird die Oberfläche von Kunststoffplatten aufgeraut und es werden Sedimentanteile mittels Zweikomponentenkleber fixiert.

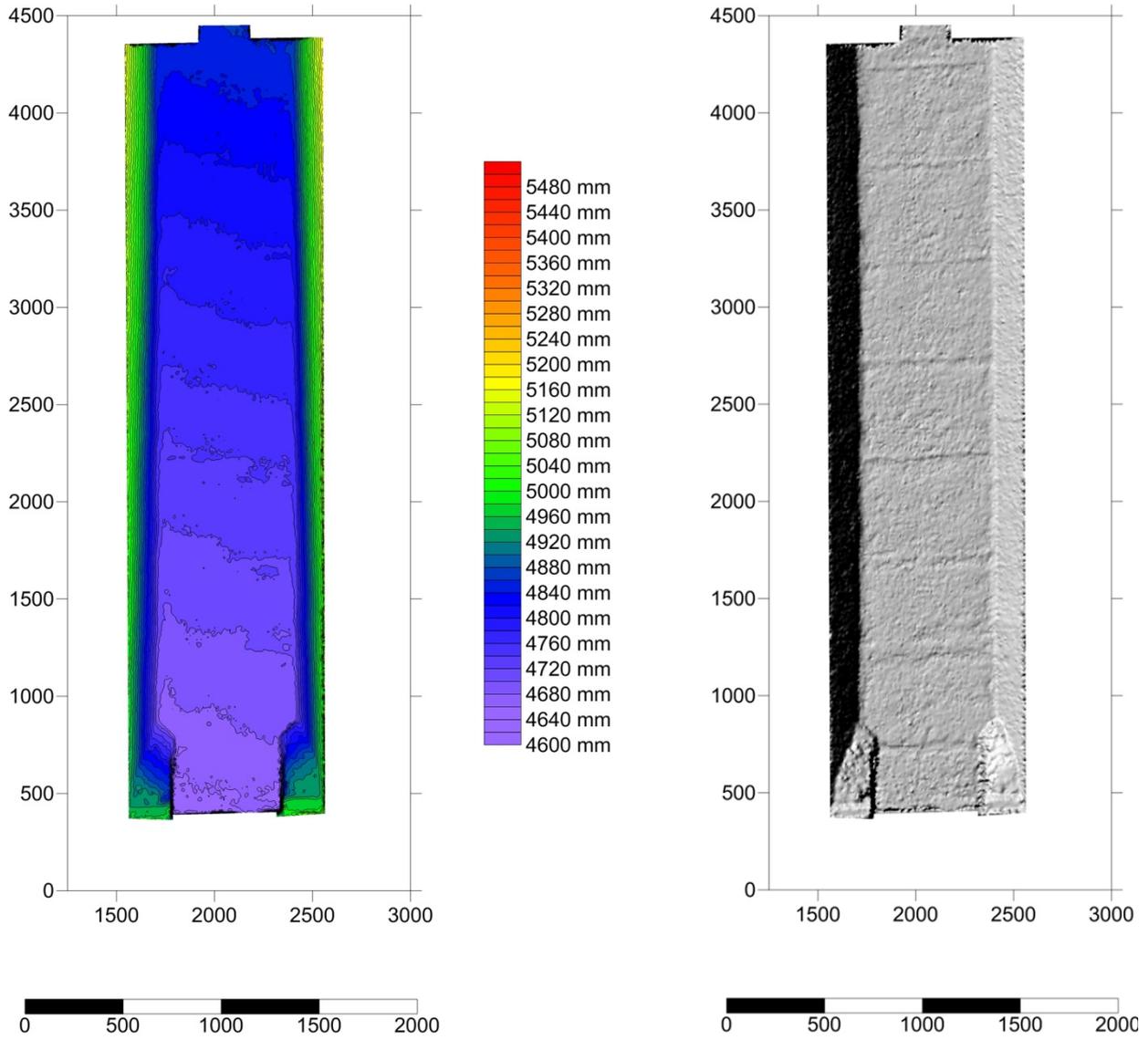


Abbildung 11: Geometrie des rechteckigen Ablagerungsbeckens.

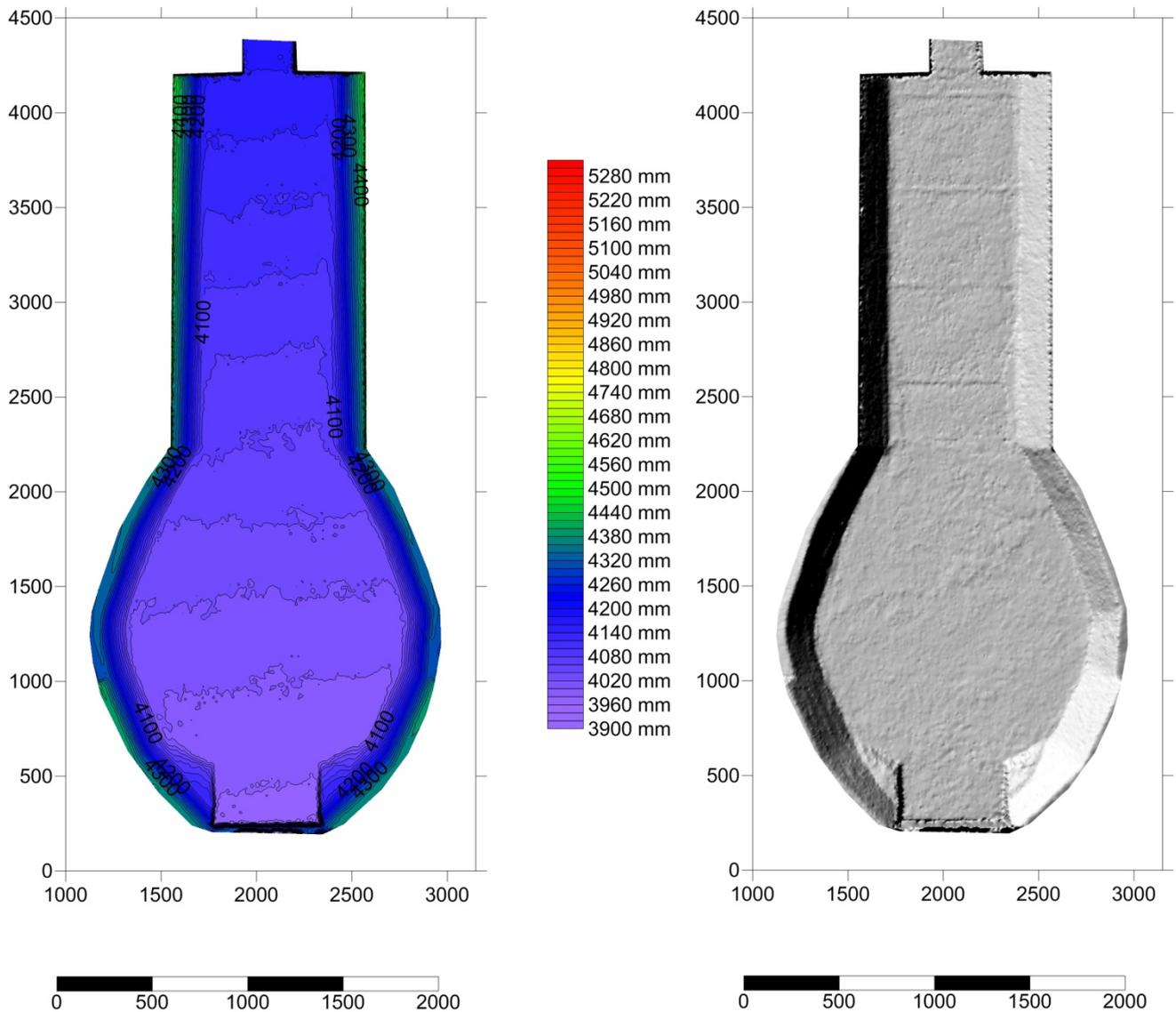


Abbildung 12: Geometrie des birnenförmigen Ablagerungsbeckens.

Für die Durchführung der physikalischen Modellversuche wurden zwei unterschiedliche Sperrtypen, eine Rechen,- sowie eine Balkensperre untersucht. Das Bauvorbild der Rechensperre ist in Abbildung 13 (Ansicht) und Abbildung 14 (Schnitt) dargestellt. Das Rechensperrenmodell besteht aus Siebdruckplatten. Die Sperre lässt sich in zwei Felder unterteilen, wobei jeweils drei unterschiedlich geneigte Segmentabschnitte zu finden sind. Die vertikalen Rechenstäbe werden auf Querbalken, welche mit einem eingefrästen Langloch versehen sind, montiert und können nach Belieben in horizontaler Ebene verschoben werden. Durch die Umsetzung der flexiblen Konstruktionsweise können

unterschiedlich große Stababstände eingestellt werden. Der untere Teil des Rechens ist als Scheibe ausgeführt. Ein Sporn am oberen Ende soll Wildholz daran hindern über das Bauwerk transportiert zu werden.

Das Bauvorbild der Balkensperre ist in Abbildung 15 (Ansicht) und Abbildung 16 (Schnitt) dargestellt. Die Balkensperre besteht aus rechteckigen Stahlprofilstäben (S 235 JR), wobei jeder der Metallstäbe mit insgesamt drei Bohrungen versehen wird. Durch das Eindrehen eines Gewindes wird über eine Schraubverbindung ein fester Verbund mit drei Flacheisen als vertikale Trägerprofile hergestellt. Das Konzept der Balkensperre beruht auf jenem der Rechensperre und es soll durch einfaches Verstellen der horizontalen Metallstäbe die Variation der Abstände vereinfacht werden.

Fotos beider Sperrenmodelle sind in Abbildung 17 ersichtlich.

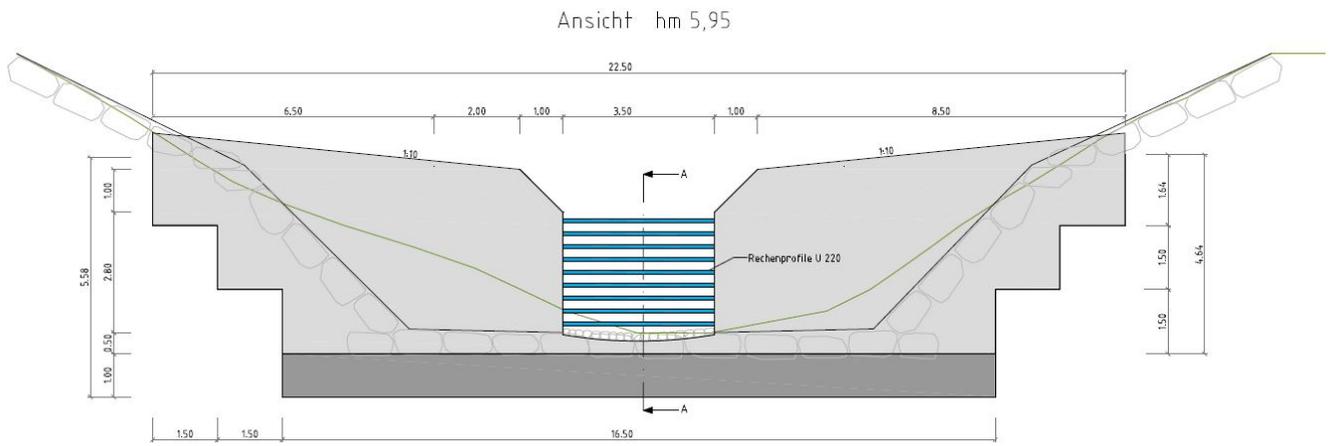


Abbildung 15: Bauvorbild für die Balkensperre (Ansicht, Quelle WLIV).

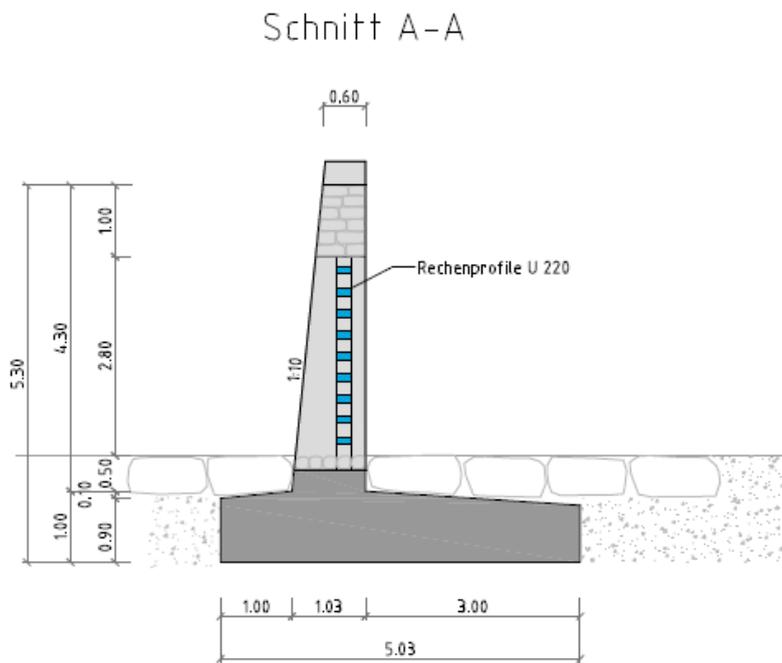


Abbildung 16: Bauvorbild für die Balkensperre (Schnitt, Quelle WLIV).



Abbildung 17: Fotos der Balken und Rechensperre.

4.2 Versuchsübersicht

Insgesamt wurden 21 Versuche durchgeführt. Dabei wurden im rechteckigen Versuchsgerinne 2 Reinwasserversuche, 8 Geschiebeversuche und 4 Geschiebeversuche mit Wildholz durchgeführt. Tabelle 3 zeigt die Versuchsübersicht für das rechteckige Ablagerungsbecken. Im Birnenförmigen Ablagerungsbecken wurden 2 Reinwasserversuche, 8 Geschiebeversuche und 4 Geschiebeversuche mit Wildholz durchgeführt. Die Versuchsübersicht für das birnenförmige Ablagerungsbecken ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 3: Übersicht der durchgeführten Versuche für das rechteckige Ablagerungsbecken:

Nr.	Bautype	Stababstand	Reinwasser	Geschiebe	Wildholz
1	Rechensperre	10,5 mm			
2	Rechensperre	10,5 mm			
3	Rechensperre	15 mm			
4	Rechensperre	15 mm			
5	Rechensperre	15 mm			
6	Balkensperre	10,5 mm			
7	Balkensperre	10,5 mm			
8	Balkensperre	15 mm			
9	Balkensperre	15 mm			
10	Balkensperre	15 mm			

Tabelle 4: Übersicht der durchgeführten Versuche für das birnenförmige Ablagerungsbecken:

Nr.	Bautype	Stababstand	Reinwasser	Geschiebe	Wildholz
11	Rechensperre	15 mm			
12	Rechensperre	15 mm			
13	Rechensperre	15 mm			
14	Rechensperre	10,5 mm			
15	Rechensperre	10,5 mm			
16	Balkensperre	15 mm			
17	Balkensperre	15 mm			
18	Balkensperre	15 mm			
19	Balkensperre	10,5 mm			
20	Balkensperre	10,5 mm			
21	Balkensperre	10,5 mm			

4.3 Hydraulik- Reinwasserversuche

Zur Analyse des Rückstaueffekts der Sperrenbauwerke wurden die Versuche 5,9,13,18 und 19 mit Reinwasser durchgeführt. Die durch Ultraschallsensoren ermittelten Abflusstiefen wurden über einen Zeitraum von 10 Sekunden gemittelt und sind für die stationären Abflüsse von 2,9 – 24,42 l/s ausgewertet. Die untenstehenden Abbildungen zeigen die Abflusstiefen unter den Ultraschallsensoren US1-US4, wobei der US1 (=Distanz 47cm)

direkt hinter dem Sperrenbauwerk liegt. Zum Vergleich wurde der Stababstand auf 15 mm eingestellt. Die Versuche 5, 9, sind in

Abbildung 18 und Abbildung 19 für das Rechteckige Becken dargestellt, wohingegen die Versuche 13 und 18 im birnenförmigen Becken in Abbildung 20 und Abbildung 21 dargestellt sind.

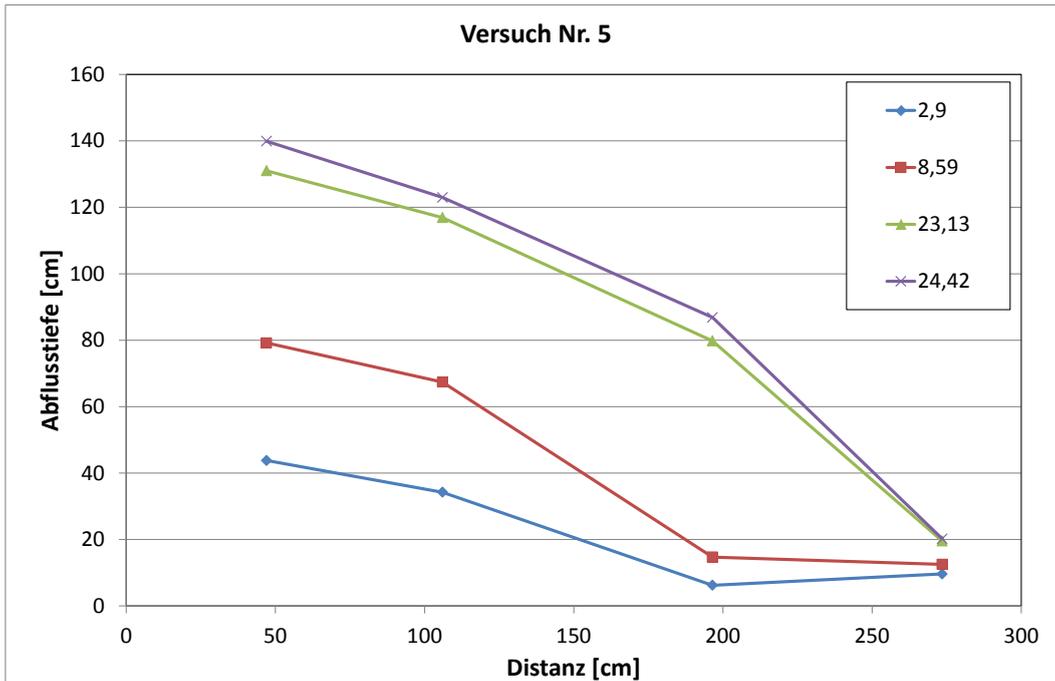


Abbildung 18: Abflusstiefen für den Versuch Nr. 5 (Reinwasser, Rechensperre, 15mm, im rechteckigen Ablagerungsbecken).

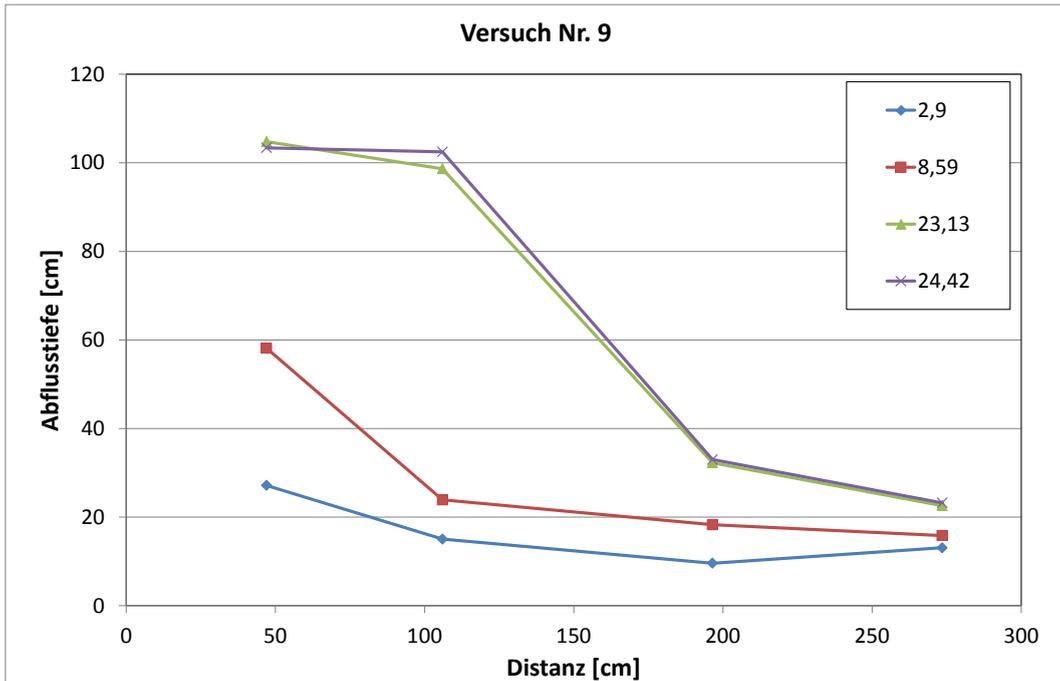


Abbildung 19: Abflusstiefen für den Versuch Nr. 9 (Reinwasser, Balkensperre, 15mm, im rechteckigen Ablagerungsbecken).

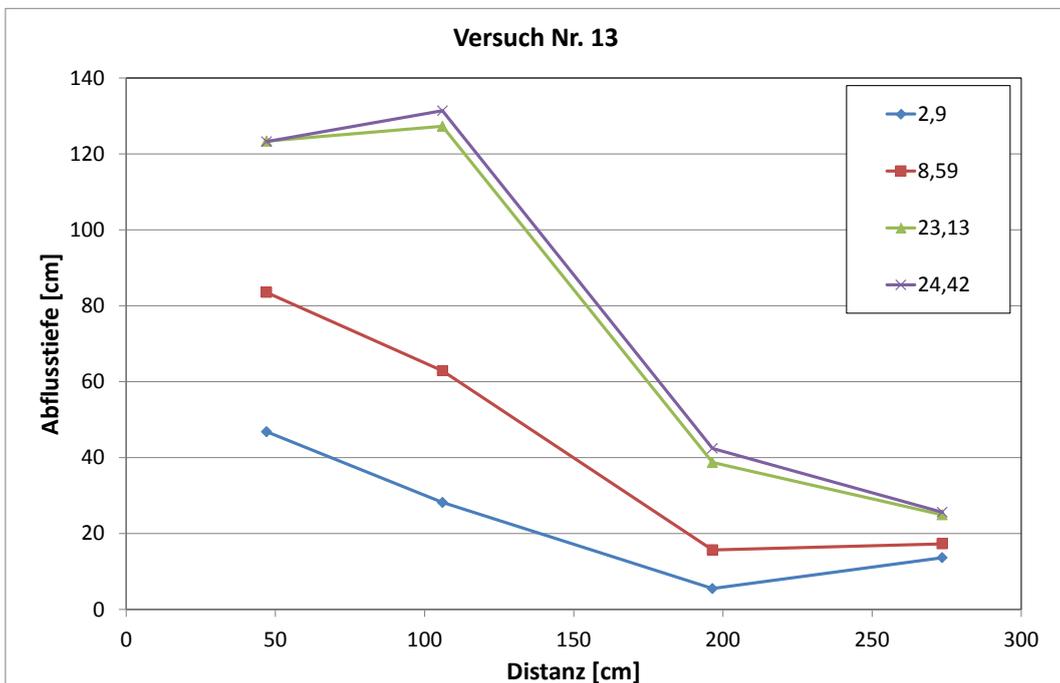


Abbildung 20: Abflusstiefen für den Versuch Nr. 13 (Reinwasser, Rechensperre, 15mm, im birnenförmigen Ablagerungsbecken).

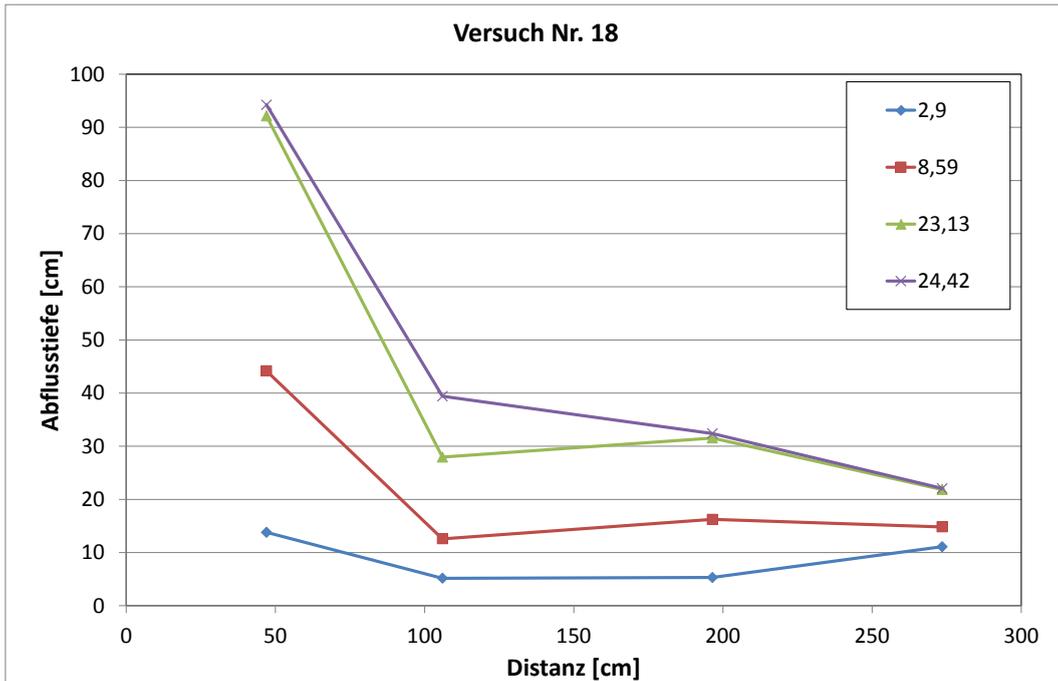


Abbildung 21: Abflusstiefen für den Versuch Nr. 18 (Reinwasser, Balkensperre, 15mm, im birnenförmigen Ablagerungsbecken).

Zum Vergleich der Stauwirkung der Varianten sind die Abflusstiefen des Maximalabflusses (24,42 l/s) für die Versuche mit einer lichten Stabweite von 15 mm in Abbildung 22 dargestellt. Die Rechensperre sorgt für einen höheren Aufstau des Wassers und einen weiteren Rückstau als die Balkensperre. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass die Rechensperre auch konstruktiv weiter in den Stauraum reicht.

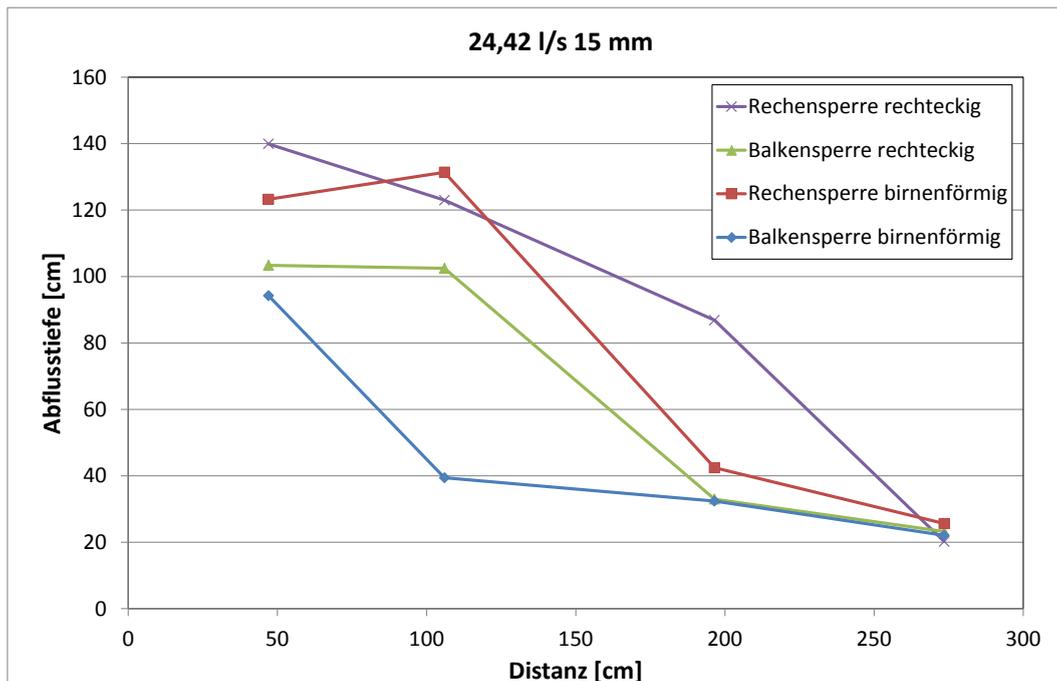


Abbildung 22: Vergleich der Varianten für 24,42 l/s und 15mm Stababstand.

4.4 Geschiebeversuche

Für die Durchführung der Geschiebeversuche wurde eine diskretisierte Ganglinie für das Reinwasser und das Geschiebe verwendet. Die Eingangsganglinien für das Bemessungsereignis HQ_{150} ist in Abbildung 23 dargestellt. Für das Spülhochwasser wurde eine diskretisierte Ganglinie für das dazugehörige HQ_5 verwendet (Abbildung 24).

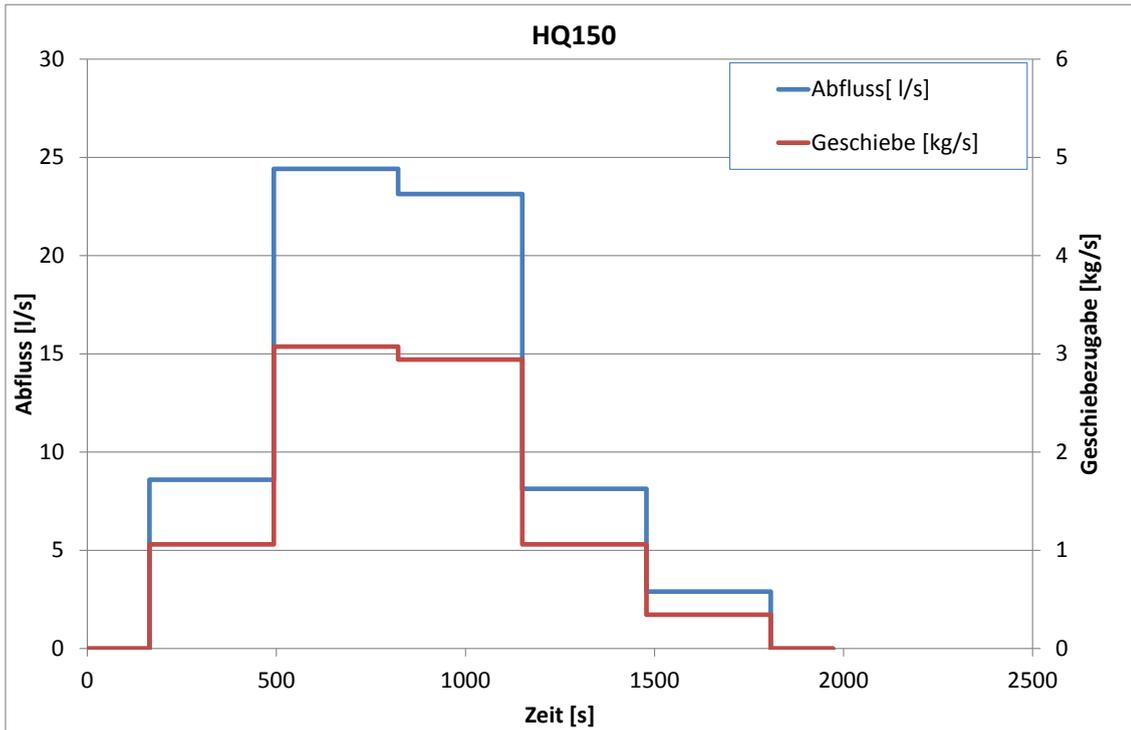


Abbildung 23: Abfluss und Geschiebeganglinie für das HQ₁₅₀.

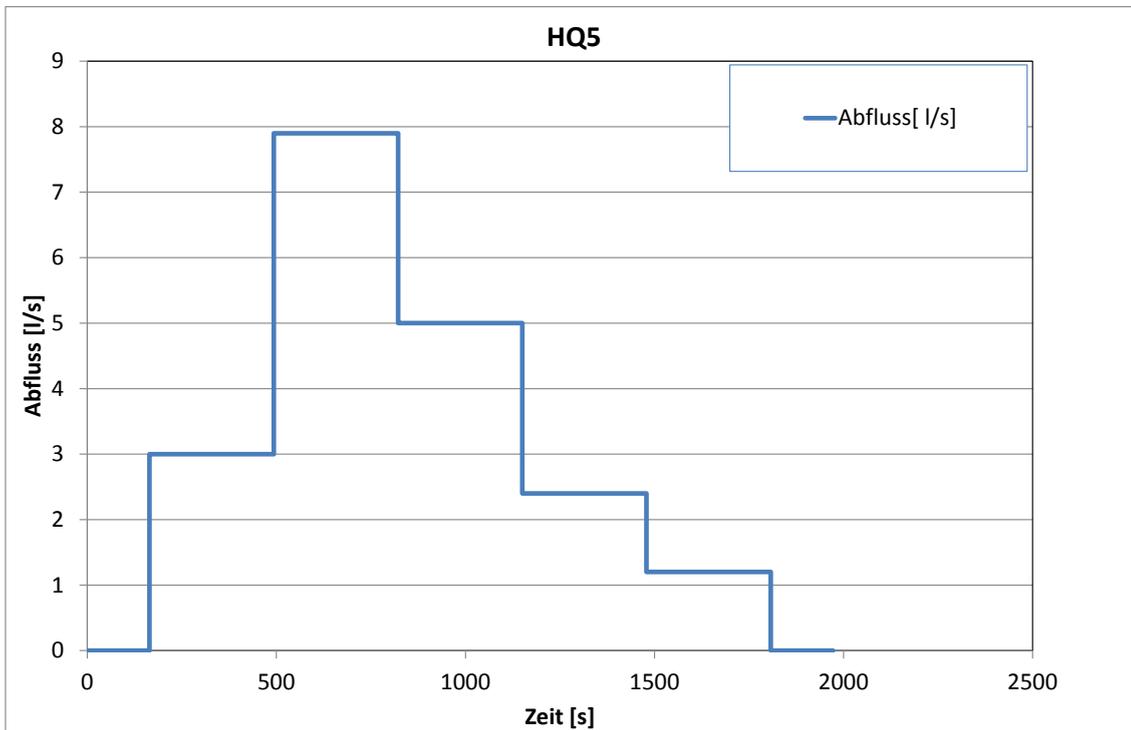


Abbildung 24: Abflussganglinie für das Spülereignis HQ₅.

Für die Durchführung der physikalischen Modellversuche zur Optimierung von Filtersperren wurde die Kornmischung von HAINZER (2013) herangezogen.

HAINZER (2013) hat für den Schöttlbach zwei voneinander unabhängige Linienzahlanalysen durchgeführt und deren charakteristische Korngrößen in Tabelle 5 gegenübergestellt.

Tabelle 5: Linienzahlanalysen für den Schöttlbach; Quelle: eigene Darstellung, modifiziert nach (HAINZER, 2013)

Linienzahlanalyse	d ₃₀ [cm]	d ₅₀ [cm]	d ₉₀ [cm]	d _m [cm]
1	2,81	8,09	31,27	13,22
2	4,53	12,50	41,58	20,00

Aufgrund der Tatsache, dass die Ergebnisse der ersten Erhebung gut mit den Werten vorangegangener Aufnahmen am Schöttlbach zusammenpassen, wird die Linienzahlanalyse 1 herangezogen und für die Durchführung der physikalischen Modellversuche weiter verwendet (HAINZER, 2013).

Die Zugabe von Feinkies erfolgt dabei als Brechkorn und der Anteil des Mittelkieses in Form eines Rundkornes. Die Kornfraktionen mit einem Durchmesser zwischen vier und acht Millimetern machen 50 %, jene Komponenten zwischen zwei und vier Millimetern 40 % und der Anteil des Sandes 10 %, gemessen an der Gesamtgeschiebemenge, aus (siehe Tabelle 6) (HAINZER, 2013).

Tabelle 6: Prozentuelle Darstellung der verwendeten Korngrößen; Quelle: eigene Darstellung, modifiziert nach (HAINZER, 2013)

Korngrößen		Prozentueller Anteil der Kornfraktionen [%]
Mittel-, Feinkies	4-8 mm	50
Feinkies	2-4 mm	40
Grobsand	0,8-1,5 mm	10

In Abbildung 25 erfolgt eine Darstellung der von HAINZER (2013) skalierten Sieblinie, passierend auf der Erhebung der Linienzahlanalyse 1 des Schöttlbaches. In blau dargestellt findet sich die von HAINZER (2013) erstellte Kornverteilung, welche repräsentativ für die Mischung des verwendeten Geschiebes steht.

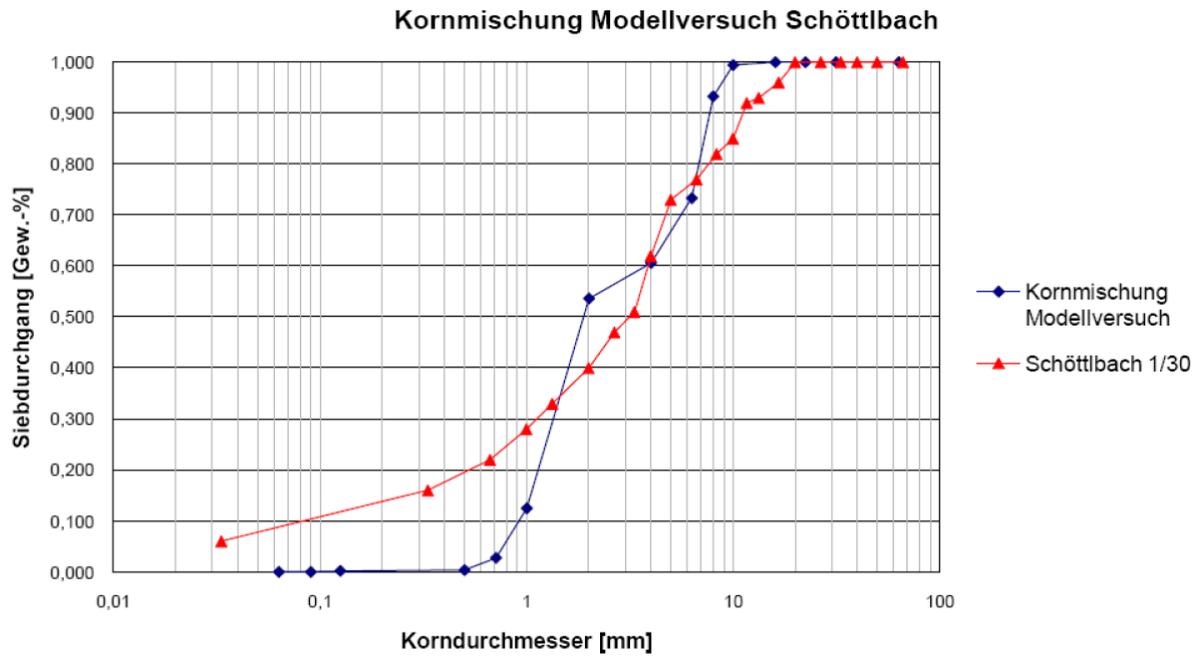


Abbildung 25: Sieblinie des verwendeten Versuchsmaterials; Quelle: HAINZER (2013)

Für die Klassifizierung der Korngrößen wurde die Kornfraktionentabelle aus dem Skript der Geotechnik herangezogen und abgeglichen (siehe Tabelle 7) (EN ISO 14688-1, 2002).

Tabelle 7: Kornfraktionentabelle (modifiziert nach EN ISO 14688-1, 2002).

Grobkorn:	
Steine	> 63 mm - 200 mm
Kies	> 2 mm - 63 mm
Grobkies	> 20 mm - 63 mm
Mittelkies	> 6,3 mm - 20 mm
Feinkies	> 2 mm - 6,3 mm
Sand	> 0,063 mm - 2mm
Grobsand	> 0,63 mm - 2 mm
Mittelsand	> 0,2 mm - 0,63 mm
Feinsand	> 0,063 mm - 0,2 mm
Feinkorn:	
Schlufffraktion	> 0,002 mm - 0,063 mm
Grobschluff	> 0,02 mm - 0,063 mm
Mittelschluff	> 0,0063 mm - 0,02 mm
Feinschluff	> 0,002 mm - 0,0063 mm
Ton	< 0,002 mm

Insgesamt wird für jeden Versuch ein Volumen von 1,05 Kubikmeter Sediment im oben genannten Verhältnis bestmöglich miteinander vermischt und in vier Rollwägen aufgeteilt und für den Versuchsbeginn bereitgehalten (siehe Abbildung 26).



Abbildung 26: Rollwägen, gefüllt mit Sediment

Durch eine an der Decke montierten elektrischen Seilwinde, können die einzelnen Rollwägen angehoben und über einen Vorratsbehälter entleert werden. Über ein Förderband (Abbildung 27) gelangt schließlich das Sediment in die Durchmischungszone und damit in das Einlaufgerinne des Versuchsaufbaues. Die Menge der Sedimentzugabe kann einerseits durch eine händisch verstellbare Austrittsöffnung am Vorratsbehälter und andererseits durch den Geschwindigkeitsregler des Förderbandes bestimmt werden. In der Durchmischungszone trifft der Geschiebe- mit dem Wasserkreislauf zusammen.



Abbildung 27: linkes Bild: Vorratsbehälter für die Sedimentzugabe mit Förderband; rechtes Bild: Durchmischungsgerinne mit Förderband zur Beschickung mit Geschiebe, im Hintergrund Thomson Wehr als Einlaufbauwerk für das Wasser

4.5 Geschiebeversuche mit Wildholz

In der Natur weisen die für das Sägewerk bestimmten Bloche eine Länge von 4,2 m und Mehrfachlängen Abmessungen von 8,4 m und mehr auf.

Bei einem Hochwasserabfluss in der Natur treten jedoch Ereignisse auf, die nicht nur abgelagerte Holzblöcke, sondern oft ganze Bäume, Wurzelstöcke, Äste und Laub in das Fließgerinne eintragen, dieses weitertransportieren und es unter bestimmten Voraussetzungen in Form von Verklausungen zur Ablagerung bringen.

Für den Modellversuch werden schließlich drei unterschiedliche Durchmesser von Blochhölzern verwendet und mit der Maßstabszahl $M_L 30$ von der Natur auf das Modell umgerechnet. Es werden Durchmessergrößen von 0,6 cm 1,0 cm und 1,4 cm, sowie in Längen von 14 cm und 28 cm verwendet. Der Anteil des Wildholzes beträgt im Vergleich zu den $1,05 \text{ m}^3$ Geschiebe nur 0,15 %. Eine Gegenüberstellung findet sich in untenstehender Tabelle 8.

Tabelle 8: Auflistung der für die Modellversuche verwendeten Wildhölzer

Ø Modell	Ø Natur	Länge Modell	Länge Natur	Stückzahl	Länge Modell	Länge Natur	Stückzahl
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[n] v. (14cm)	[cm]	[cm]	[n] v. (28cm)
0,6	18	14	420	21	28	840	12
1	30	14	420	21	28	840	9
1,4	42	14	420	27	28	840	9
Gesamtvolumen Holz:		0,0015767	m³	0,15 %			
Gesamtv. Geschiebe:		1,05	m³				

Bei den für die Modellversuche verwendeten Wildhölzern handelt es sich um glatte, aus Buchenholz hergestellten Rundhölzern. In Abbildung 28 sind die einzelnen verwendeten Wildholztypen nochmals grafisch dargestellt.



Abbildung 28: Grafische Darstellung der verwendeten Wildhölzer; links: Hölzer mit 28 cm und rechts Hölzer mit 14 cm Länge

Laut ZOLLINGER (1983) liegen die Unterschiede hinsichtlich der Reindichte verschiedener Holzarten etwa zwischen 1,47 und 1,55 g/cm³. Als Empfehlung für weitere Berechnungen gibt ZOLLINGER (1983) den Durchschnittswert von 1,52 g/cm³ an.

Auf die Berücksichtigung von weiteren Wildholzkomponenten wie Wurzelstöcken, Ästen und Laub wurde im Modell gänzlich verzichtet. Dadurch lässt sich die Beschreibung des Fließverhaltens stark vereinfachen, jedoch fehlen mögliche Auswirkungen und Effekte

hinsichtlich einer Verklausung an der Rückhaltesperre. Darüber hinaus darf nicht außer Acht gelassen werden, dass zwar die Blochhölzer in ihrer Länge und ihrem Durchmesser mit der Maßstabszahl berücksichtigt werden, die Steifigkeit im Modell jedoch keine Anwendung findet und damit reale Verklausungen, wie sie in der Natur auftreten, nicht vollständig nachgebildet werden können.

Die Wildholzzugabe erfolgt händisch in der Durchmischungszone. In bestimmten vorher definierten Zeitintervallen werden die Blochhölzer in das Fließgerinne gegeben. Die Zugabe startet zum Zeitpunkt $t = 600$ Sekunden und die Hölzer werden im Zeitintervall von zwölf Sekunden einzeln ins Gerinne eingebracht. Durch die anfangs noch hohe Fließgeschwindigkeit des Wassers, werden sie rasch schwimmend abtransportiert und gelangen so in das Rückhaltebecken, wo sie in weiterer Folge auf das Sperrenbauwerk treffen. Einzelne Hölzer, deren Durchmesser es erlaubt zwischen dem lichten Stababstand hindurchzutreten, werden im nachstehenden Auffangbehälter entnommen und anschließend zur Trocknung aufgelegt. Blochhölzer, welche am Sperrenbauwerk zurückgehalten werden, türmen sich auf, verkeilen sich ineinander und bewirken in weiterer Folge Verklausungen. Die Auswirkungen solcher Holzbarrikaden üben einen Einfluss auf eine mögliche selbsttätige Entleerung aus. Nach Beenden des Versuchsablaufes wird das Versuchsgerinne gescannt und in weiterer Folge die Verklausung händisch entnommen.

Das Aufschwimmen des Holzes und der Rückhalt durch den Sporn sind in Abbildung 29 für die Rechensperre dargestellt.



Abbildung 29: Wildholz während und nach dem Bemessungsereignis HQ_{150} .

5 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

5.1 Ablagerungsvolumina

Nach jedem Versuch wurde sowohl nach dem HQ150 als auch nach dem Spülhochwasser HQ5 ein Laserscan erstellt. Exemplarisch ist eine grafische Auswertung für den Versuch 15 dargestellt (Abbildung 30).

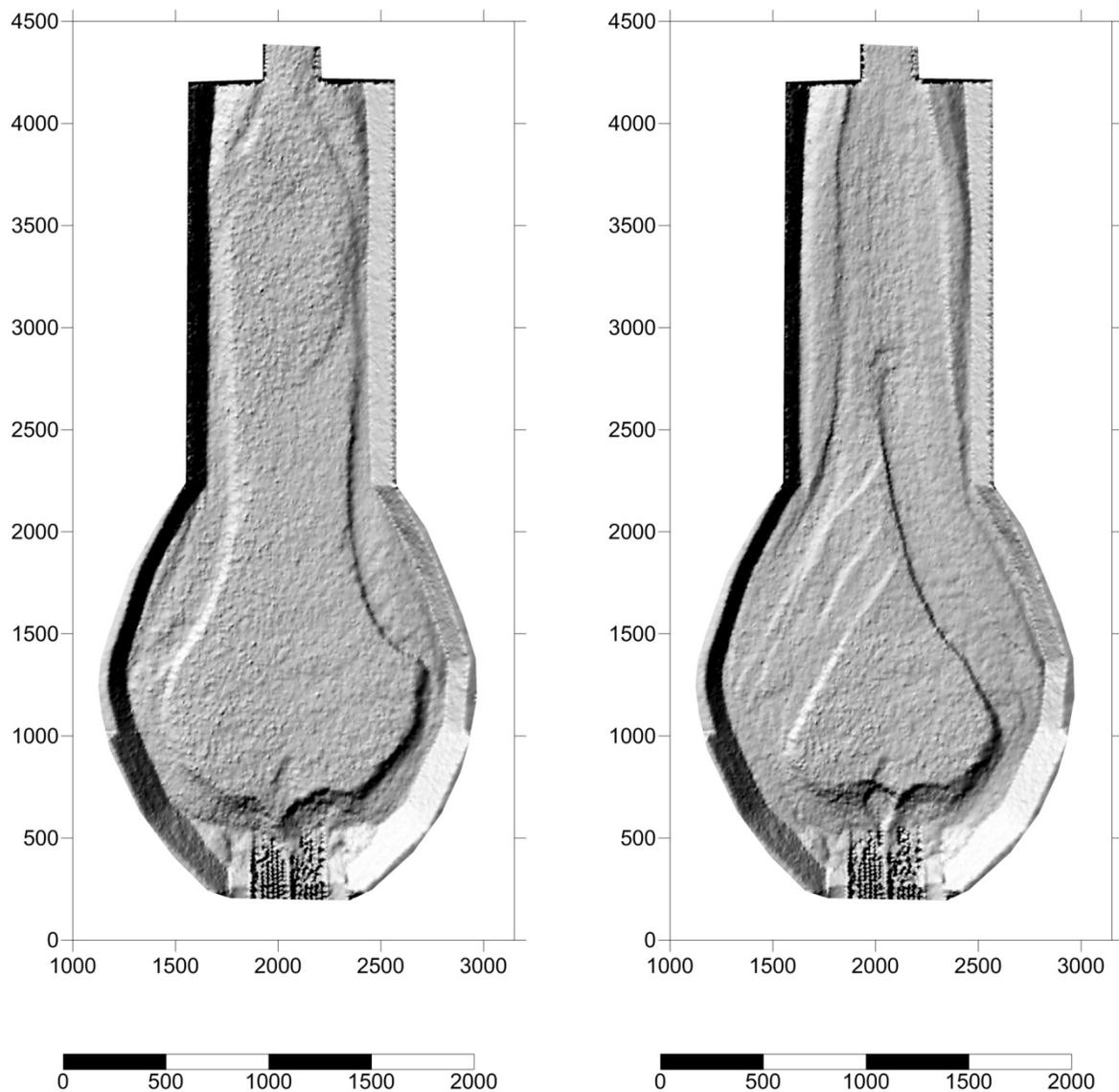


Abbildung 30: Hillshade Versuchsnummer 15 nach HQ₁₅₀ und HQ₅.

Eine Übersicht der Ablagerungsvolumina ist in für das rechteckige Becken ist in Tabelle 9 dargestellt. Die Volumina beziehen sich auf den gescannten Ablagerungsraum. Im

Zubringergerinne kam es durch Rückstaueffekte ebenfalls zu Ablagerungen. Diese wurden durch den Scanner nicht erfasst, jedoch über die Geometrie des Zubringergerinnes und der Ablagerungshöhe für weitere Auswertungen (z.B. Spüeffizienz) berücksichtigt. Durch das Spülereignis (HQ₅) wurde die Ablagerung im Zubringergerinne teilweise mobilisiert. Daher ist in einzelnen Versuchen das Ablagerungsvolumen nach dem Spülereignis größer als nach dem Bemessungsereignis (HQ₁₅₀).

Tabelle 9: Ablagerungsvolumina für die Versuche mit rechteckiger Beckenform.

Nr.	Bautype	Stababstand	Reinwasser	Geschiebe	Wildholz	Ablagerung [m ³]	
						HQ 150	HQ 5
1	Rechensperre	10,5 mm				0,5213	0,5524
2	Rechensperre	10,5 mm				0,6018	0,7125
3	Rechensperre	15 mm				0,3398	0,2917
4	Rechensperre	15 mm				0,2421	0,2476
5	Rechensperre	15 mm				-	-
6	Balkensperre	10,5 mm				0,5879	0,6375
7	Balkensperre	10,5 mm				0,6203	0,7216
8	Balkensperre	15 mm				0,5417	0,4138
9	Balkensperre	15 mm				-	-
10	Balkensperre	15 mm				0,1879	0,1789

Tabelle 10: Ablagerungsvolumina für die Versuche mit birnenförmigen Becke.

Nr.	Bautype	Stababstand	Reinwasser	Geschiebe	Wildholz	Ablagerung [m ³]	
						HQ 150	HQ 5
11	Rechensperre	15 mm				0,3716	0,3536
12	Rechensperre	15 mm				0,4962	0,4023
13	Rechensperre	15 mm				-	-
14	Rechensperre	10,5 mm				0,6295	0,6278
15	Rechensperre	10,5 mm				0,5641	0,5852
16	Balkensperre	15 mm				0,2486	0,2023
17	Balkensperre	15 mm				0,4054	0,2773
18	Balkensperre	15 mm				-	-
19	Balkensperre	10,5 mm				-	-
20	Balkensperre	10,5 mm				0,6337	0,705
21	Balkensperre	10,5 mm				0,6379	0,7353

5.2 Beckenform

Ein besonderes Augenmerk lag bei den durchgeführten Versuchen auf der Beckenform. Zur Analyse der Ergebnisse wurden die Versuche nach der Beckenform (Rechteck und Birne) und dem Ereignis (HQ₁₅₀ und Spülung HQ₅). Die mittleren Ablagerungsvolumina und deren Standardabweichung sind in Tabelle 11 dargestellt. Die Beckenformen unterscheiden sich hinsichtlich der abgelagerten Volumina nur geringfügig. Im birnenförmigen Becken gelangen für das HQ150 Ereignis durchschnittlich 9 % mehr Geschiebe zur Ablagerung. Für die Spülereignisse (HQ5) ist der Unterschied geringer. Durch die Mobilisierung aus dem Zubringergerinne hat sich die Ablagerung in einzelnen Fällen sogar vergrößert. Dies wurde aber bei der Analyse der Spülfizienz (Kapitel 5.3) berücksichtigt. Boxplots für alle Versuche gegliedert nach der Beckenform und Szenario sind in Abbildung 31 dargestellt.

Tabelle 11: Mittelwerte und Standardabweichung der Versuche gegliedert nach der Beckenform.

Ablagerung [m ³]	HQ 150		HQ 5	
	Rechteck	Birne	Rechteck	Birne
Mittelwert	0,4554	0,4984	0,4695	0,4861
Standardabweichung	0,1725	0,1446	0,2158	0,2031

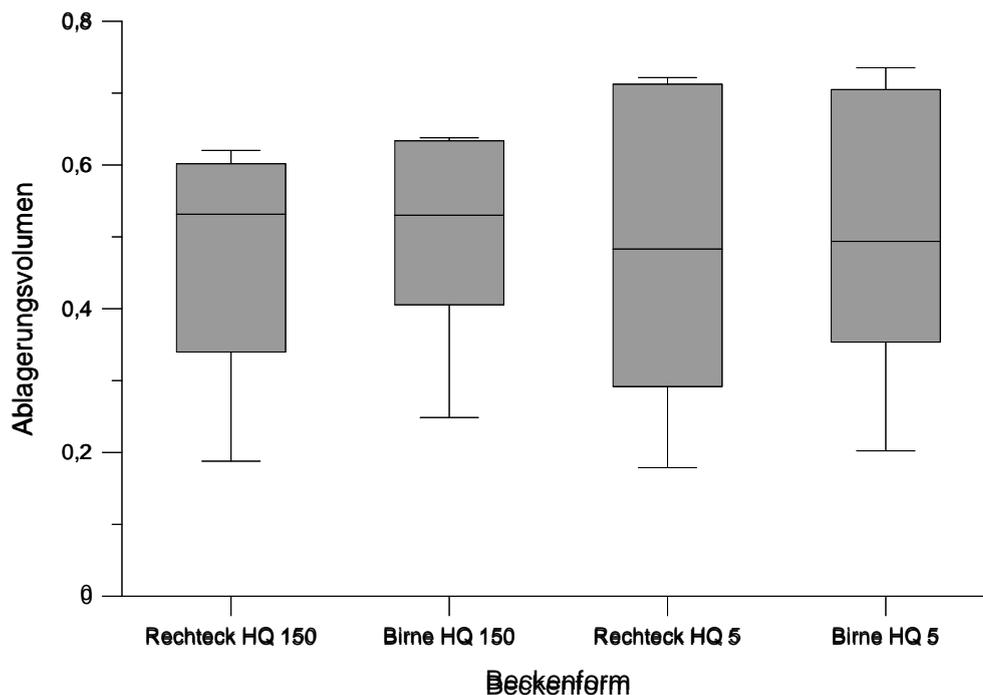


Abbildung 31: Boxplot für alle Versuche gegliedert nach der Beckenform und Szenario.

5.3 Spülfizienz durch HQ_5

Die Fähigkeit zur Selbstentleerung wurde im Rahmen des Projekts genauer betrachtet. Für die Versuche ohne Wildholz zeigt sich ein recht homogenes Bild in Abhängigkeit von der lichten Weite der Rechen- bzw. Balkenelemente. Abbildung 32 zeigt die Selbstentleerung durch das Spülhochwasser HQ_5 in Relation zum Gesamtvolumen. Beim HQ_5 wurde kein Geschiebe zugegeben, aber ein gewisser Geschiebeanteil aus dem Zulaufgerinne wurde mobilisiert. Da dieser Anteil außerhalb des Scanbereiches liegt, wurde er über die Geometrie des Einlaufgerinne berücksichtigt. Für den engeren Stababstand (10,5mm) liegt die Selbstentleerung bei 5-11%. Für den weiteren Stababstand (15mm) bei 12-17%.

Bei den Versuchen mit Wildholz ist anzumerken, dass die „Verkläusung“ gelöst wurde. Das heißt, das Wildholz wurde vor der Spülung händisch entfernt. Dennoch zeigen die Auswertungen (Abbildung 33) mehr Streuung. Für den engeren Stababstand (10,5mm) liegt die Selbstentleerung bei 2-13%. Für den weiteren Stababstand (15mm) bei 17-25%. Die höhere Selbstentleerungsrate liegt auch daran, dass bei den Versuchen mit Wildholz und engerem Stababstand auch die größten Ablagerungen vorhanden waren.

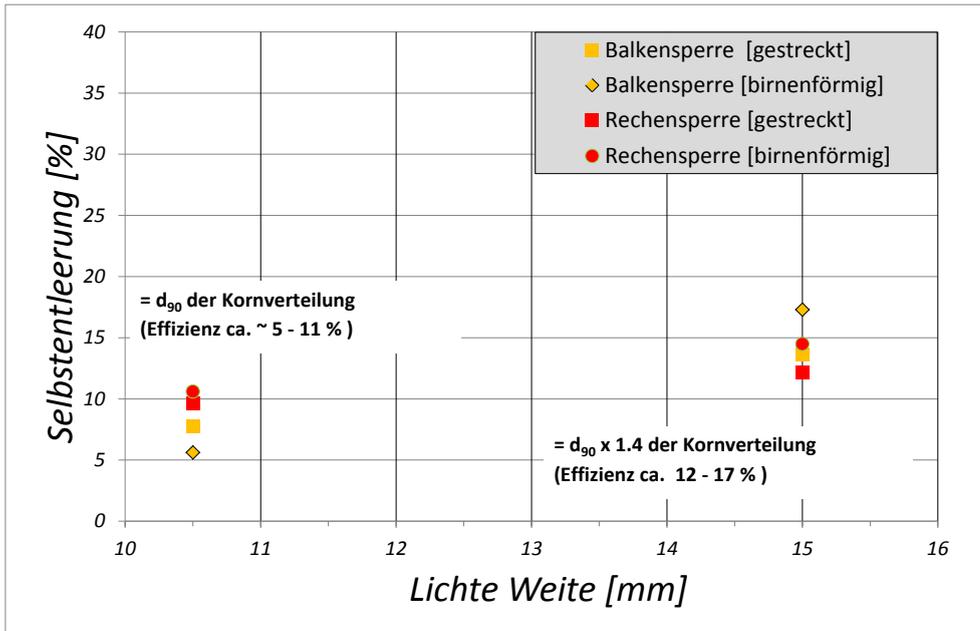


Abbildung 32: Selbstentleerung nach der Spülung HQ₅ für die Versuche ohne Wildholzzugabe.

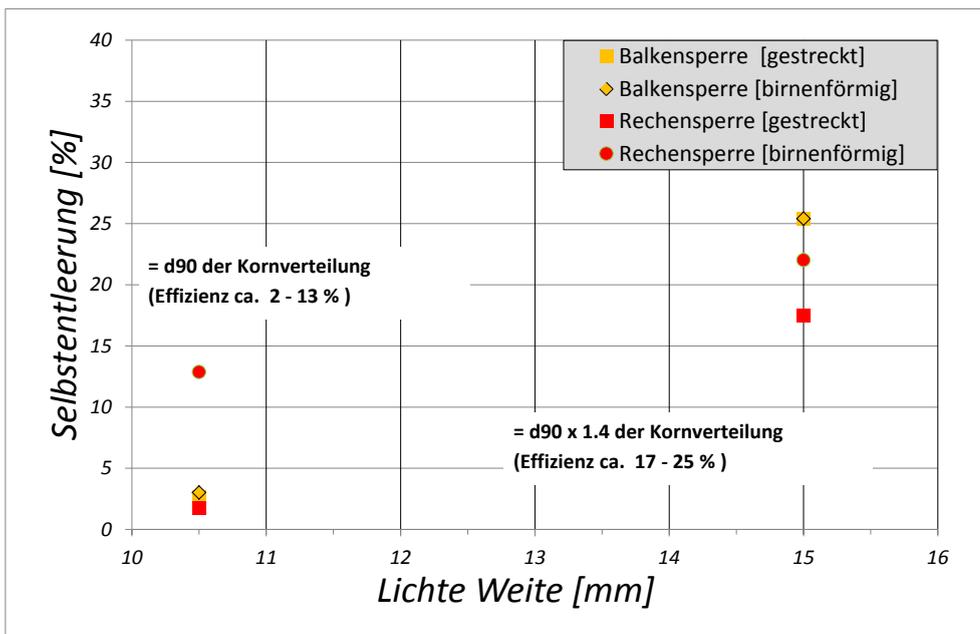


Abbildung 33: Selbstentleerung nach der Spülung HQ₅ für die Versuche mit Wildholzzugabe.

6 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

Die Durchführung physikalischer Modellversuche zur Optimierung von Filtersperren und in diesem Zusammenhang vor allem die Gegenüberstellung von einer Rechen- mit einer Balkensperre in verschiedenen Beckenformen, haben die unterschiedlichen Wirkungsweisen der beiden Rückhaltebauwerke aufgezeigt.

Bedenkt man allerdings, dass bei einem tatsächlichen Abflussereignis neben dem Geschiebeanteil, Hölzer, Wurzelstöcke Äste und Laub zu erwarten sind, so kann man sich leicht vorstellen, dass diese Mischung einen entscheidenden Einfluss auf das Ablagerungsverhalten und damit auf den Verlandungsprozess einer Sperre nimmt. Nicht zuletzt hat die Durchführung der physikalischen Modellversuche eindrucksvoll aufgezeigt, dass bereits ein Holzanteil von 0,15 % bezogen auf das Geschiebegesamt volumen von 1,05 m³, eine beachtliche Streuung der Ablagerungsvolumina bei beiden Filtersperren zur Folge hat.

Die Modellversuche unter Zugabe von Wildholz haben jedoch auch gezeigt, dass die Verklausungsmechanismen bei der Balken- und der Rechensperre unterschiedlich ablaufen. Während bei der Balkensperre die konstruktive Ausbildung der horizontalen Stäbe äußerst anfällig für widerstandsfähige Verklausungen ist, so kommt der Rechensperre der Umstand zu Gute, dass die Stäbe in einer abgetrepten Form ausgebildet werden. In der Abbildung 34 ist dargestellt, welchen Einfluss die Neigung und der lagemäßige Einbau der Metallstäbe auf das Wildholz hat (TROJER 2013).



Abbildung 34: linkes Bild: Balkensperre mit massiver Verklausung; rechtes Bild: Rückseite der Rechensperre; die Hölzer lagern sich direkt an den vertikalen Stäben an und treten nicht hindurch.

In der Abbildung 34 ist noch ein weiterer Nachteil der Balkensperre gegenüber der Rechensperre zu nennen. Lange Wildholzblöcke, welche durch den lichten Stababstand der Balkensperre hindurchtreten können, sacken ab dem Überschreiten der halben Eigenlänge mit dem vorderen Teil des Blockes schlagartig nach unten und klemmen sich somit zwischen zwei Metallstäben ein. Die dadurch gefangenen Wildhölzer können weder durch nacheilende Holzblöcke noch durch eine Restwassermenge in Form einer Spülung befreit werden. In der Realität bedeutet dies schließlich, dass unter gefährlichsten Bedingungen und unter Einsatz von Maschinen die Verklausung aufwendig gelöst werden muss.

Bei der Rechensperre konnte dieses Phänomen nicht beobachtet werden, da einerseits die Hölzer durch den größeren hydraulischen Rückstau in Form eines Holzteppichs aufschwimmen und andererseits durch die Ausbildung der vertikalen Stäbe kaum zwischen zwei Stabprofilen eingeklemmt werden können.

Zusammenfassend lassen sich die Ergebnisse hinsichtlich der Durchführung von physikalischen Modellversuchen wie folgt darstellen:

- Die Filterwirkung einer Rechen- und einer Balkensperre lässt sich ohne Zugabe von Wildholz weitgehend durch die Veränderung des lichten Stababstandes beeinflussen. Dabei wirken die Sperren vorwiegend durch hydraulischen Rückstau.
- Das birnenförmige Ablagerungsbecken bewirkte geringfügig höhere Ablagerungsvolumina.
- Ein Wildholzanteil von 0,15 % bezogen auf das verwendete Geschiebevolumen von 1,05 m³ verursacht eine große Streuung der Ablagerungsvolumina bei beiden Sperrenbauwerken.
- Während bei einer Balkensperre unter Zugabe von Wildholz widerstandsfähige Verklausungen zu erwarten sind, so bildet sich bei einer Rechensperre ein schwimmender Holzteppich aus, der sich mit zunehmendem Abfluss am Sperrenbauwerk ablagert und eine selbsttätige Entleerung weniger behindert.

- Auch bei Entfernung der Verklausungen nach dem Ereignis ist die Spüeffizienz gering. Das gilt in besonderem für die Versuche mit der engen lichten Weite von 10,5°mm.

7 Quellen- und Literaturverzeichnis

- AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE. (2009). *ONR 24800; Schutzbauwerke der Wildbachverbauung - Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung*. Wien.
- BERGMEISTER, K. et al. (Sonderdruck 2008). *Betonkalender, Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren*. Ernst & Sohn.
- EN ISO 14688-1. (2002). *EN ISO 14688-1:2002; Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden*.
- GEGENHUBER, M. (2001). *Wildbachsperrren - Grundlagen, Typisierung und ihr Verhalten bei Beanspruchung anhand von ausgewählten Beispielen*. Wien: Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur Wien.
- HAINZER, D. (2013). *Geschiebemanagement Schöttelbach*. Wien: Diplomarbeit, Institut für alpine Naturgefahren.
- HAMPEL, R. (Mai 1968). *Geschiebealagerung in Wildbächen dargestellt in Modellversuchen. Zeitschrift des Vereins der Diplomingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung Österreichs*.
- HAMPEL, R. (Juli 1974). *Die Wirkungsweise von Wildbachsperrren. Zeitschrift des Vereins der Diplomingenieure der Wildbach - und Lawinenverbauung Österreichs*.
- HÜBL, J. et al. (Oktober 2003). *Klassifikation von Wildbachsperrren, WLS Report 50 / Band 2*. Abgerufen am 17. Oktober 2013 von Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Alpine Naturgefahren:
http://www.baunat.boku.ac.at/fileadmin/_/H87/H871/IAN_Reports/REP0050_Band2.pdf
- KETTL, W. (1984). *Vom Verbauungsziel zur Bautypenentwicklung- Wildbachverbauung im Umbruch*. Wildbach- und Lawinenverbauung, Jg. 48 Sonderheft.
- KRONFELLNER-KRAUS, G. (1970). *Über offene Wildbachsperrren*. Wien: Mitteilungen der forstlichen Bundesversuchsanstalt, Heft 88.
- KROUZECKY, N. (k.A). *Studienblätter Wasserbauliches Versuchswesen*. Wien; Technische Universität Wien, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie.
- LECHER, K. et al. (2001). *Taschenbuch der Wasserwirtschaft*. Berlin, Wien: Parey Buchverlag.
- LEYS, E. (1976). *Wasserrückhaltung im Bereich der Wildbachverbauung*. Wien: Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft.
- LEYS, E., & RICCABONA, B. (1970). *Vorschlag für die Einreihung von Entleerungssperren in ein Namensschema*. Wildbach - und Lawinenverbauung, Jg. 34 Sonderheft.
- LOISKANDL, W. (2009). *Skriptum Hydraulik I*. Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien.
- PEPPERL, &, & FUCHS GmbH, .. (2001). *Handbuch Servicematerial Ultra*. Mannheim.
- SETZNAGEL, R. (1989). *Modellversuche mit Wildbachsperrren*. Wien: Diplomarbeit, Institut für Wildbach und Lawinenverbauung.
- SETZNAGEL, R. (1989). *Modellversuche mit Wildbachsperrren*. Wien Diplomarbeit Universität für Bodenkultur Wien.
- STINY, J. (1917). *Versuche über Schwemmkegelbildung. Geologische Rundschau* .

- ÜBLAGGER, G. (1973). *Retendieren, Dosieren und Sortieren*. . Mitteilungen der forstlichen Bundesversuchsanstalt, Heft 102.
- WANG, F. (1901). *Grundriss der Wildbachverbauung*. Leipzig: Verlag S. Hirzel.
- WEBER, C. (Sep. 2006). Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz. *Wildbach- und Lawinenverbau Nr. 154*.
- ZOLLINGER, F. (1983). *Die Vorgänge in einem Geschiebeablagerungsplatz - Ihre Morphologie und die Möglichkeiten einer Steuerung*. Zürich, Dissertation ETH Zürich: ADAG Administration und Druck AG.

8 Anhang

8.1 Scans der Ablagerungen Rechteckform mit Rechensperre

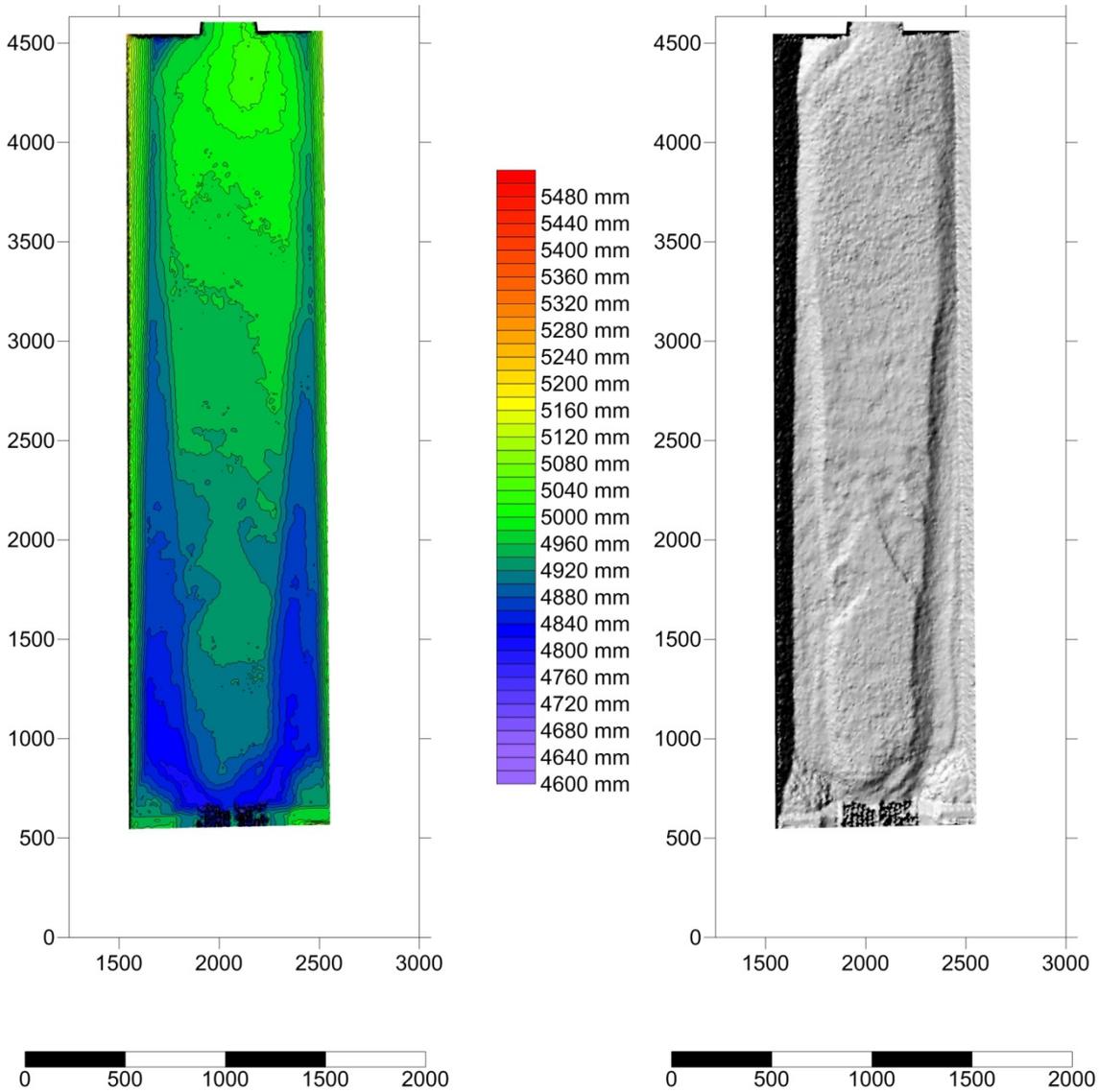


Abbildung 35: Höhengichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 1 nach HQ₁₅₀.

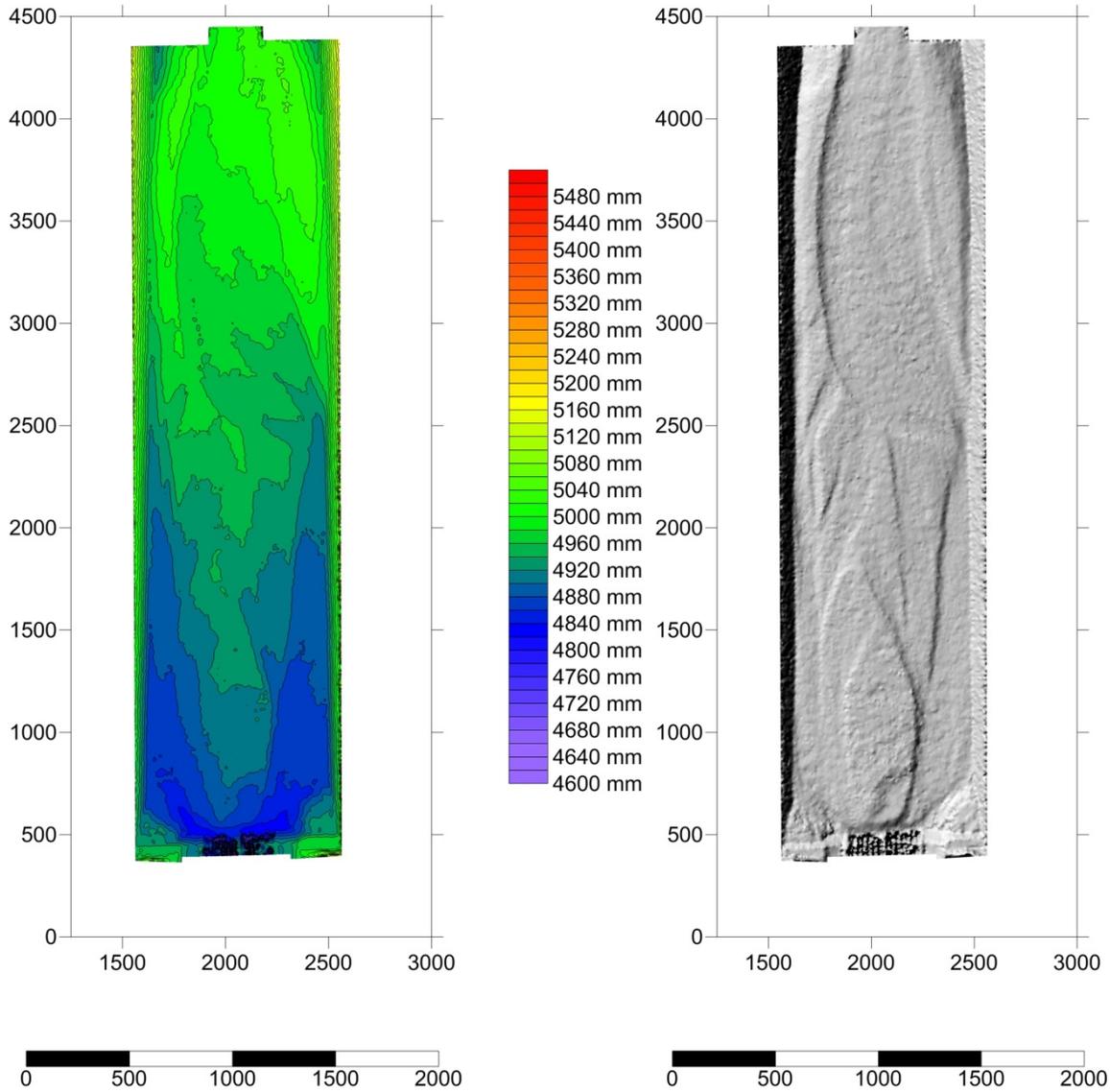


Abbildung 36: Höhengschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 1 nach Spülung HQ₅.

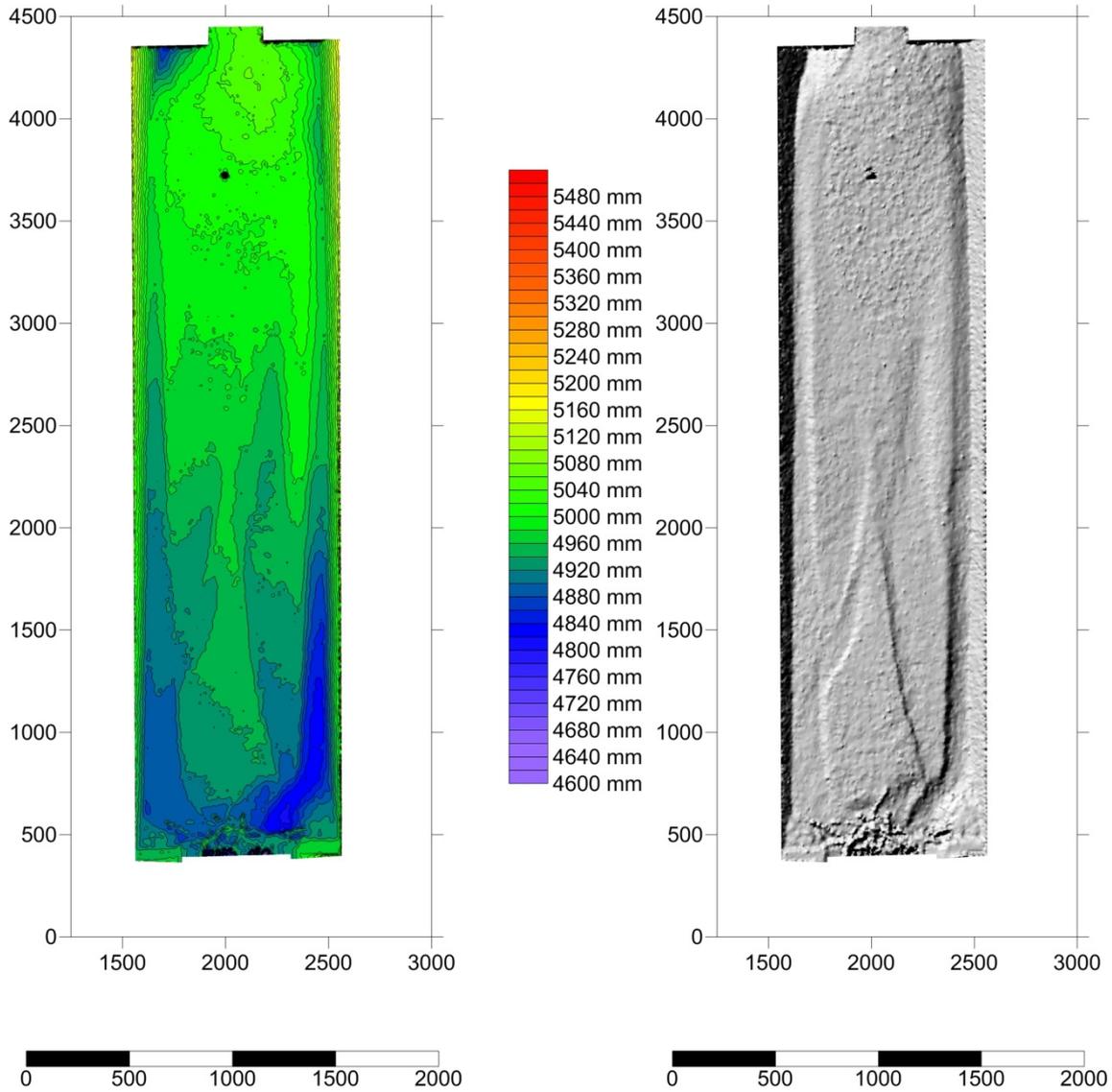


Abbildung 37: Höhengichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 2 nach HQ₁₅₀.

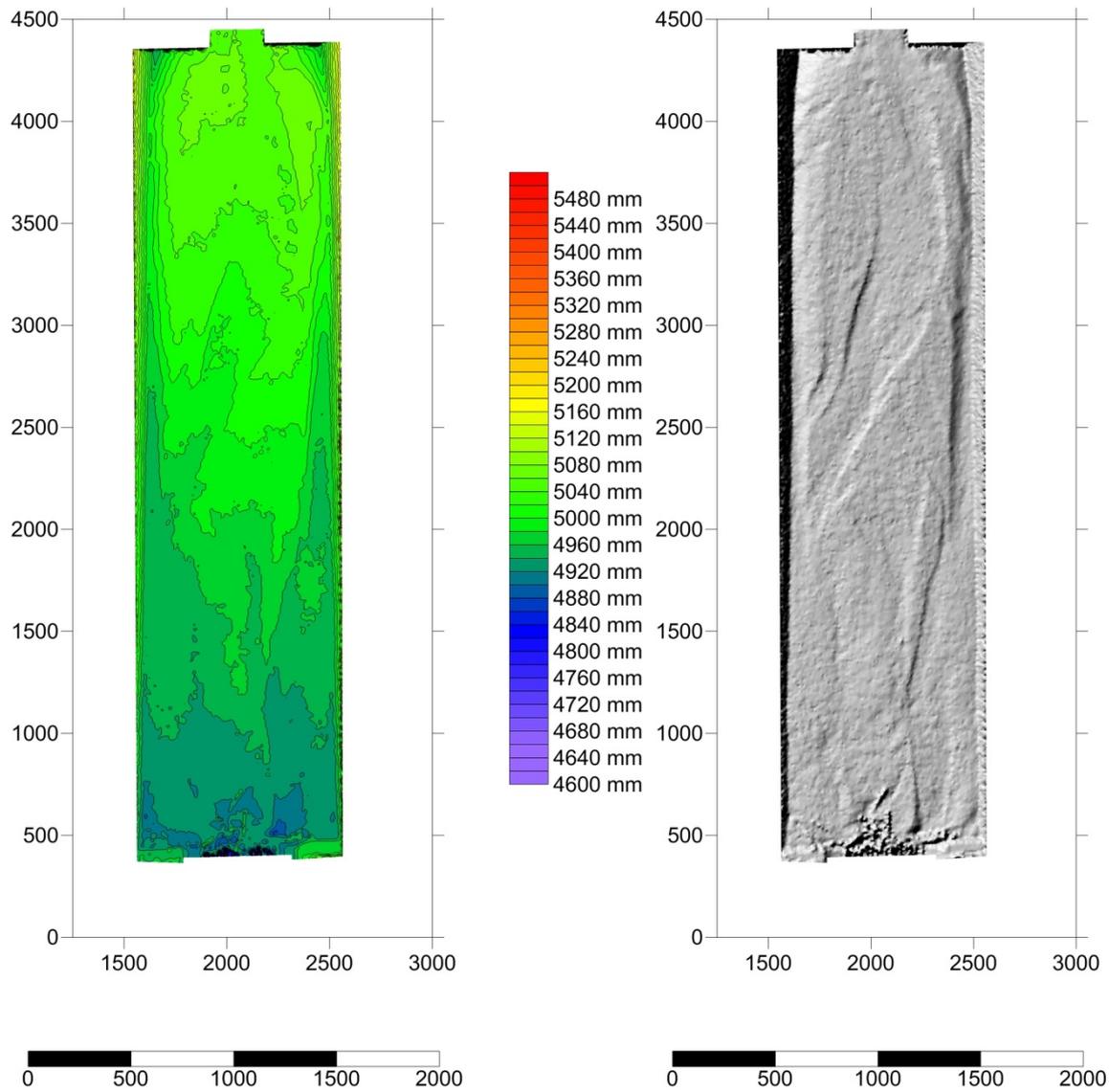


Abbildung 38: Höhengichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 2 nach Spülung HQ₅.

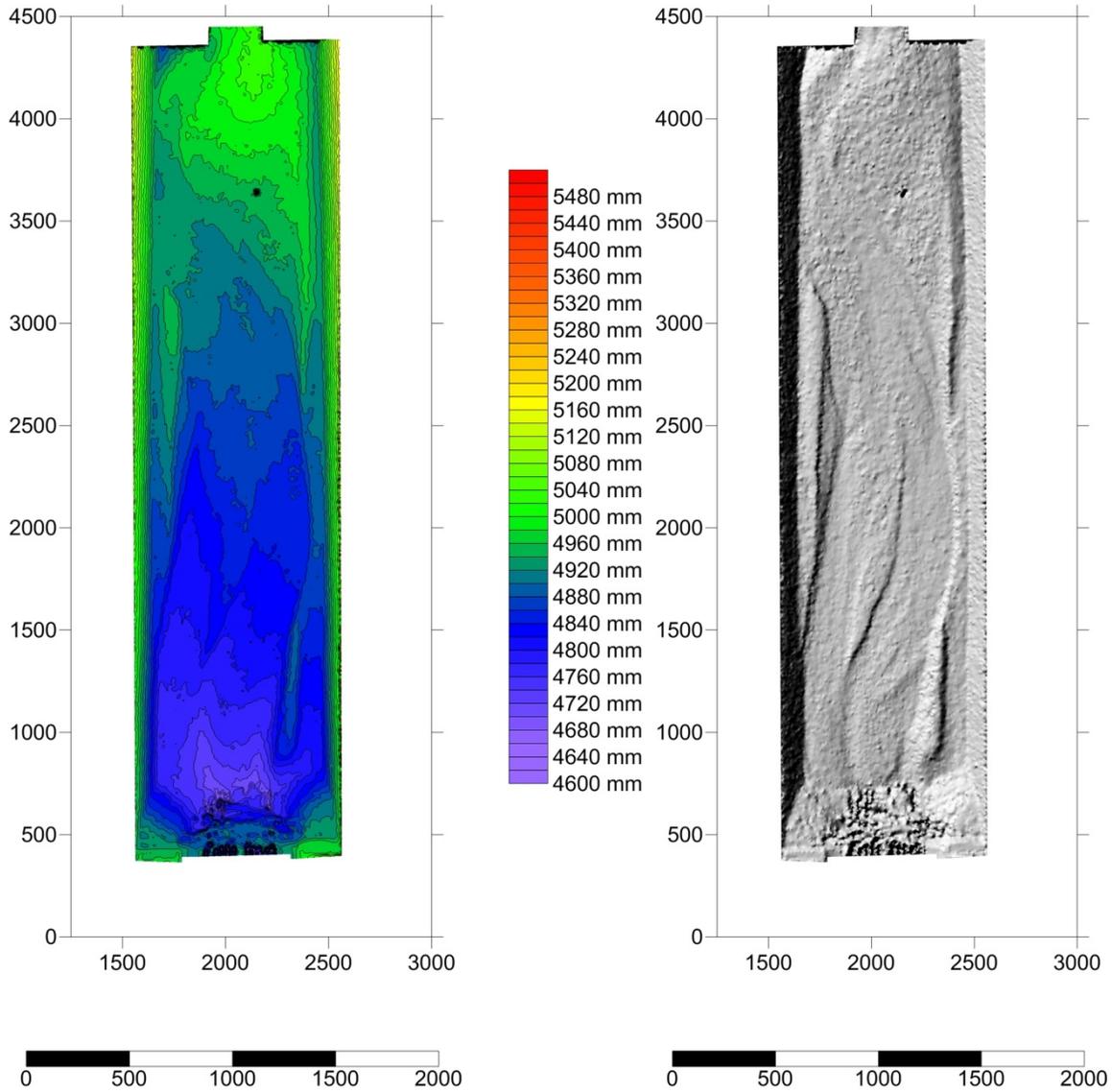


Abbildung 39: Höhengichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 3 nach HQ₁₅₀.

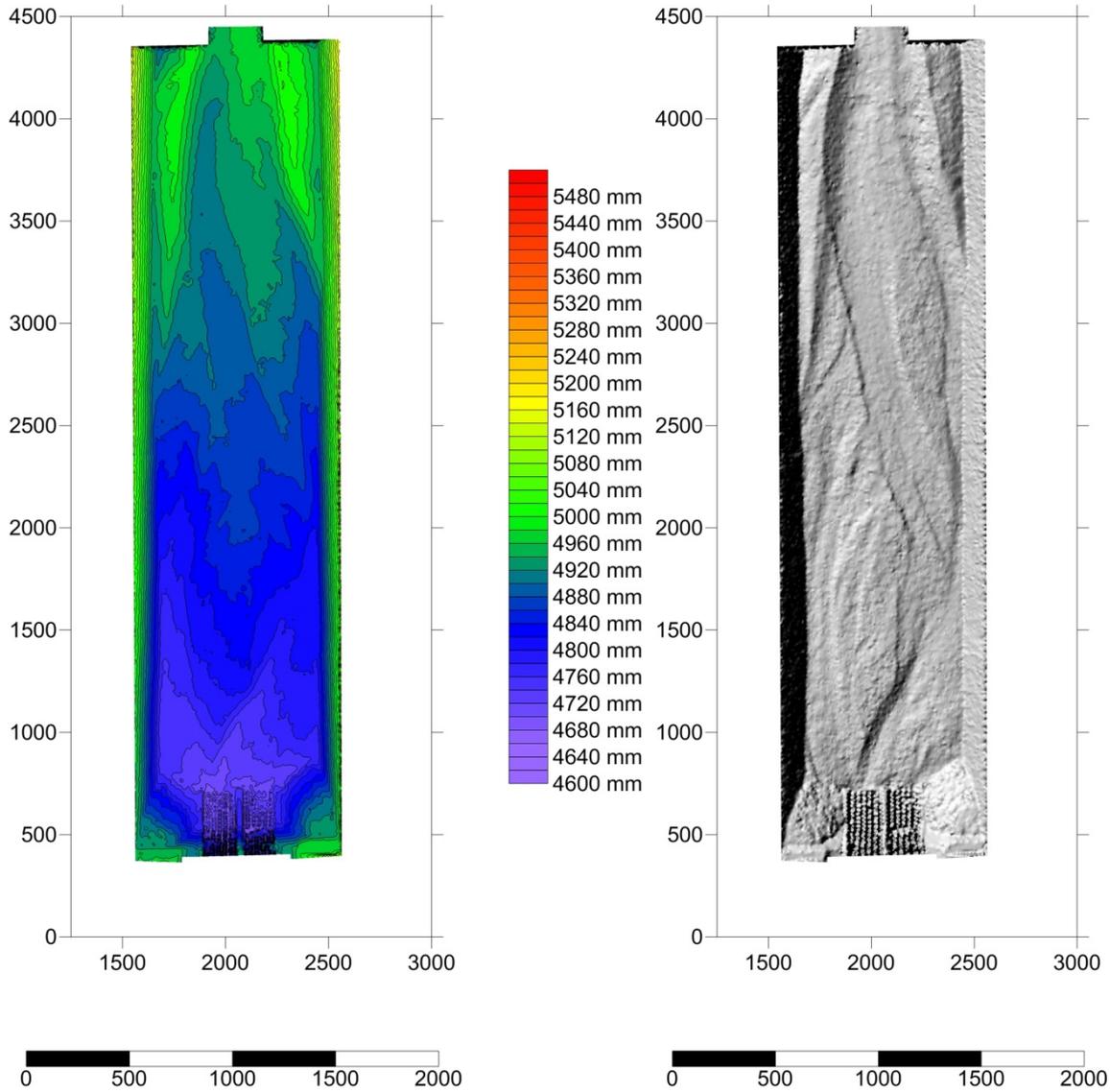


Abbildung 40: Höhengichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 3 nach Spülung HQ₅.

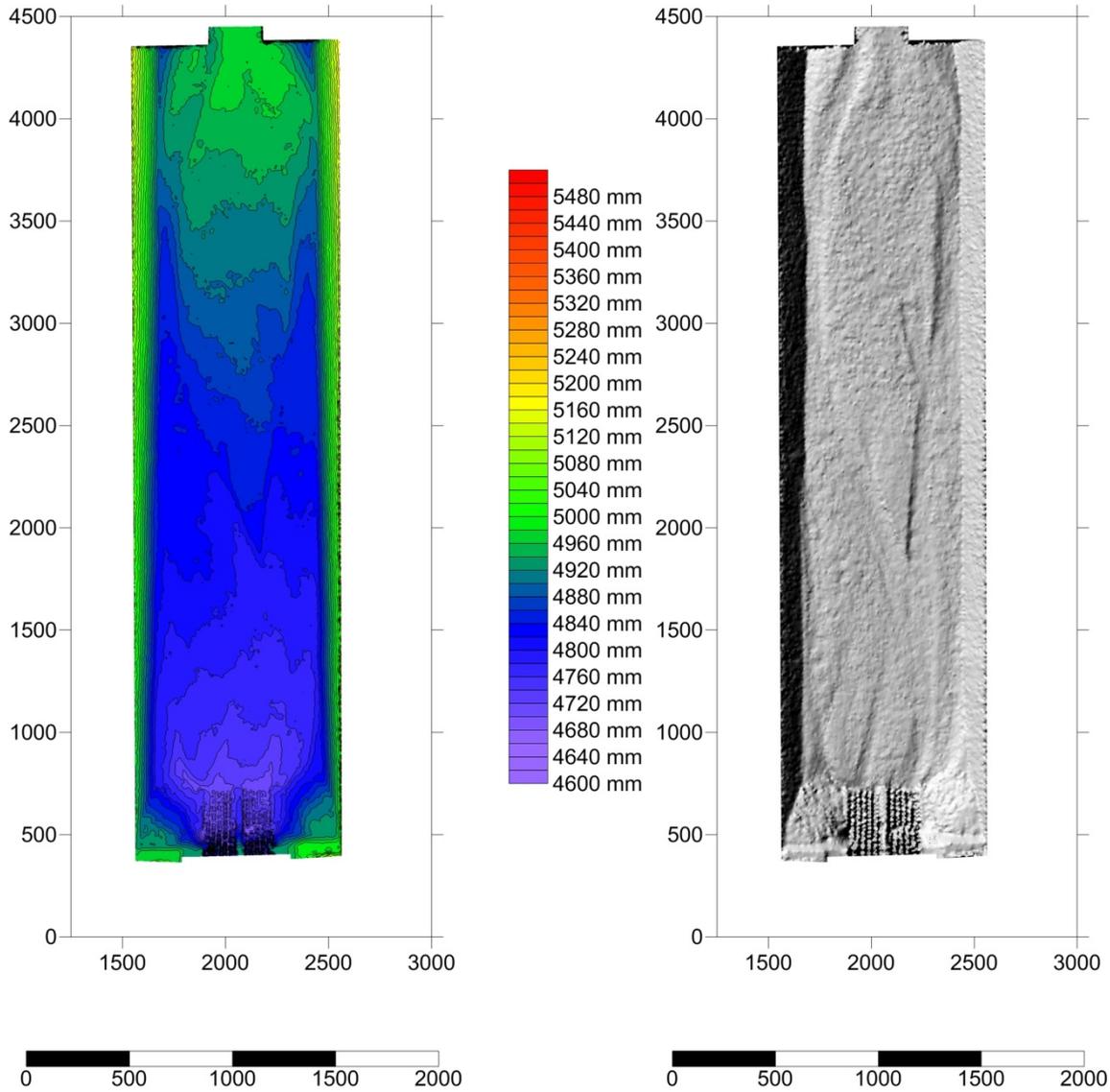


Abbildung 41: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 4 nach HQ₁₅₀.

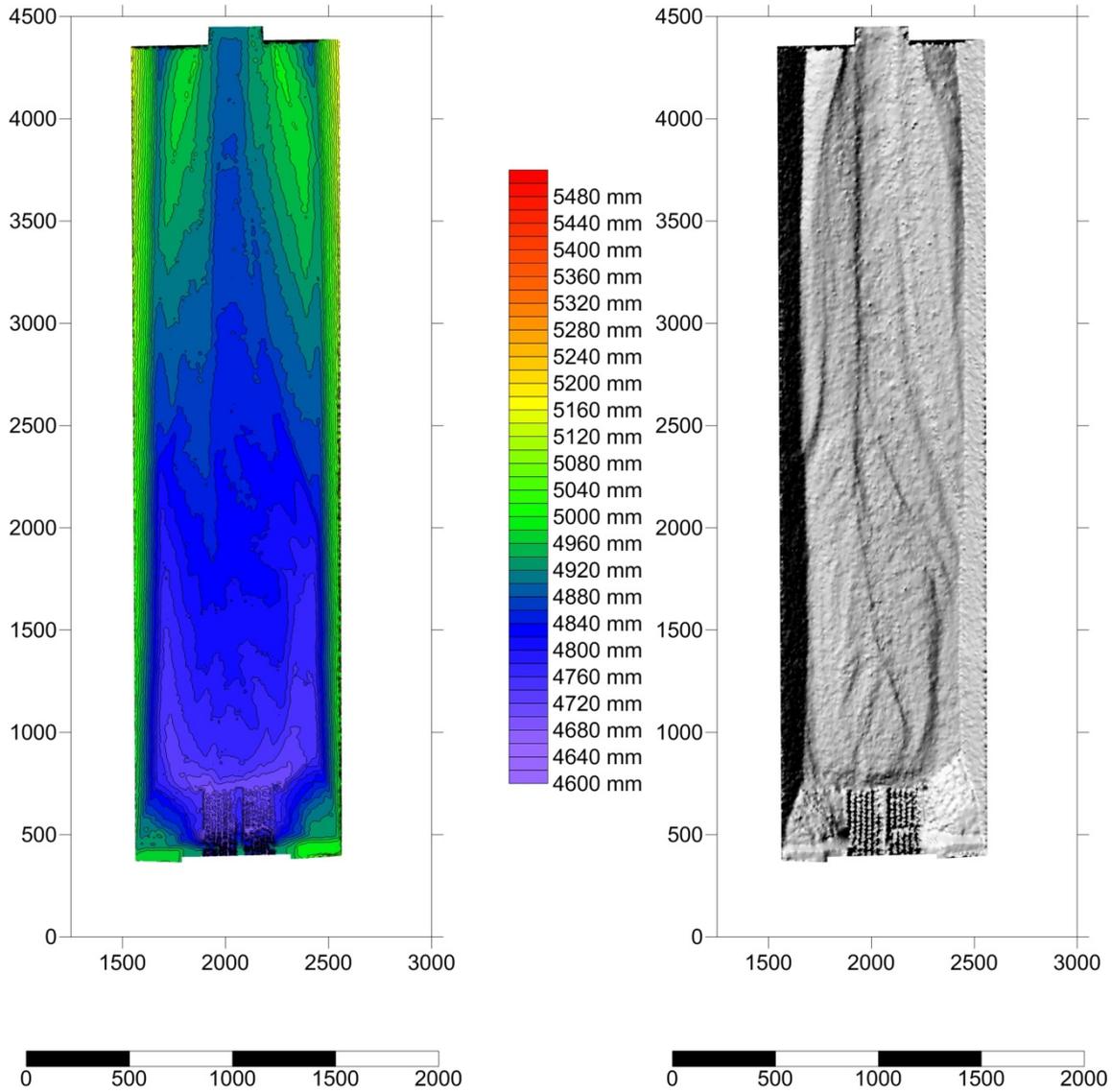


Abbildung 42: Höhengschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 4 nach Spülung HQ₅.

8.2 Scans der Ablagerungen Rechteckform mit Balkensperre

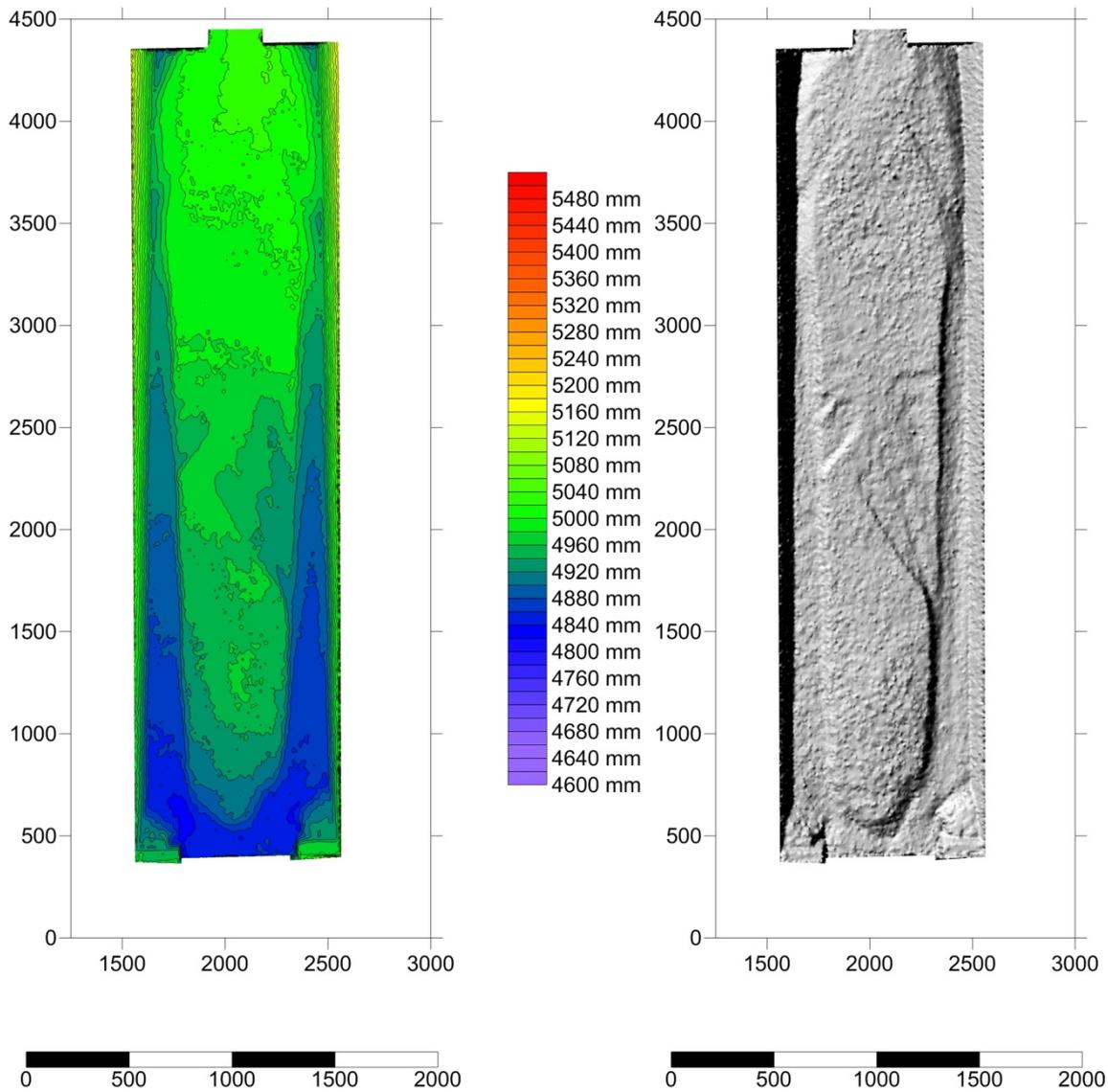


Abbildung 43: Höhengichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 6 nach HQ_{150} .

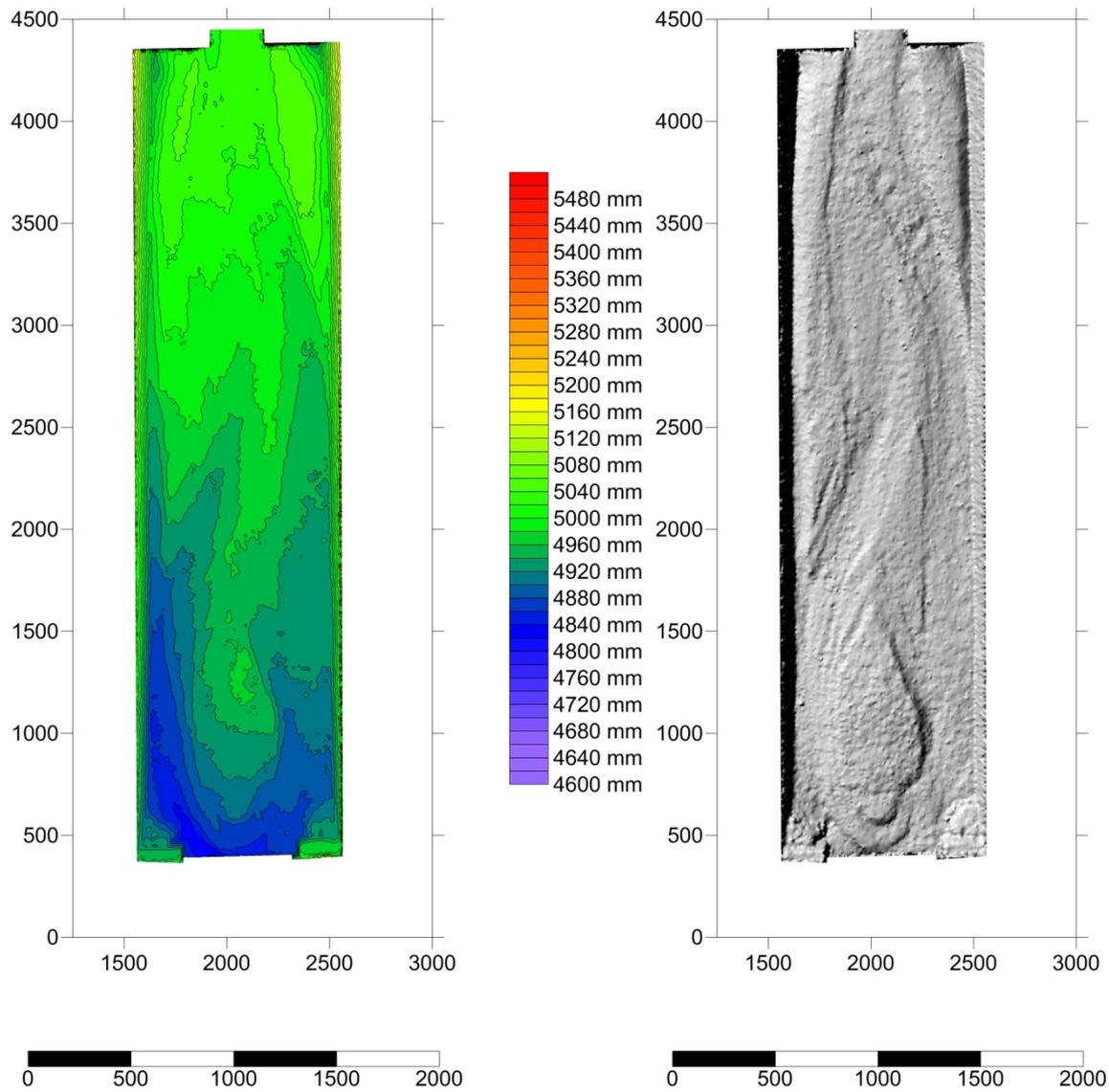


Abbildung 44: Höhengichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 6 nach Spülung HQ₅.

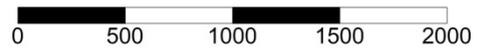
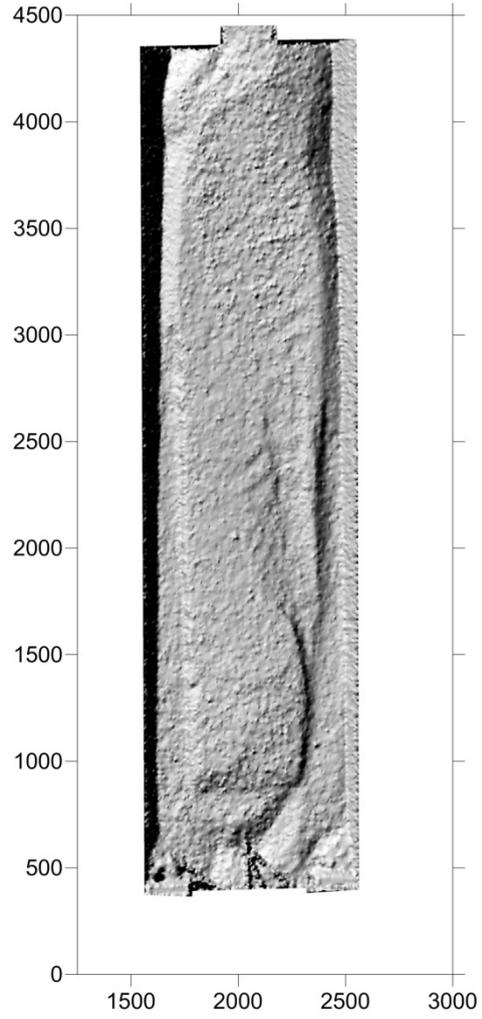
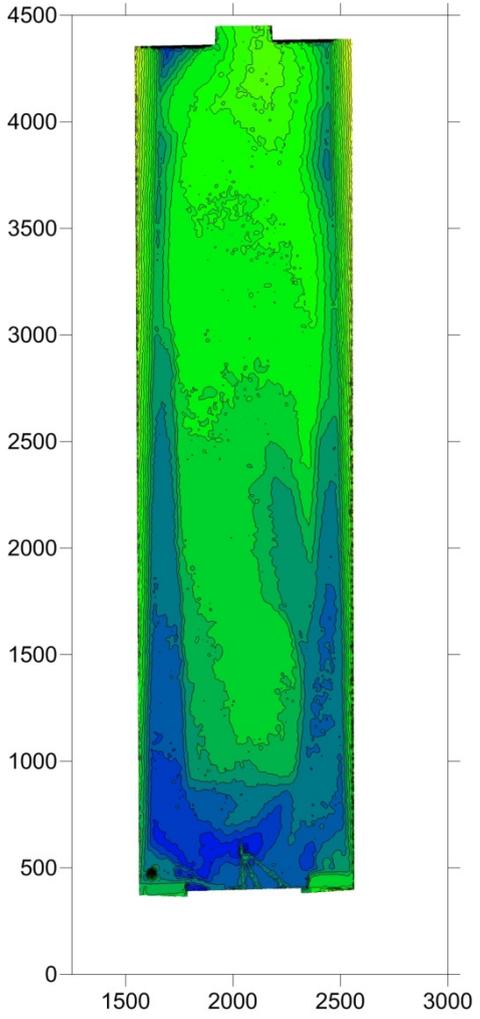


Abbildung 45: Höhengichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 7 nach HQ₁₅₀.

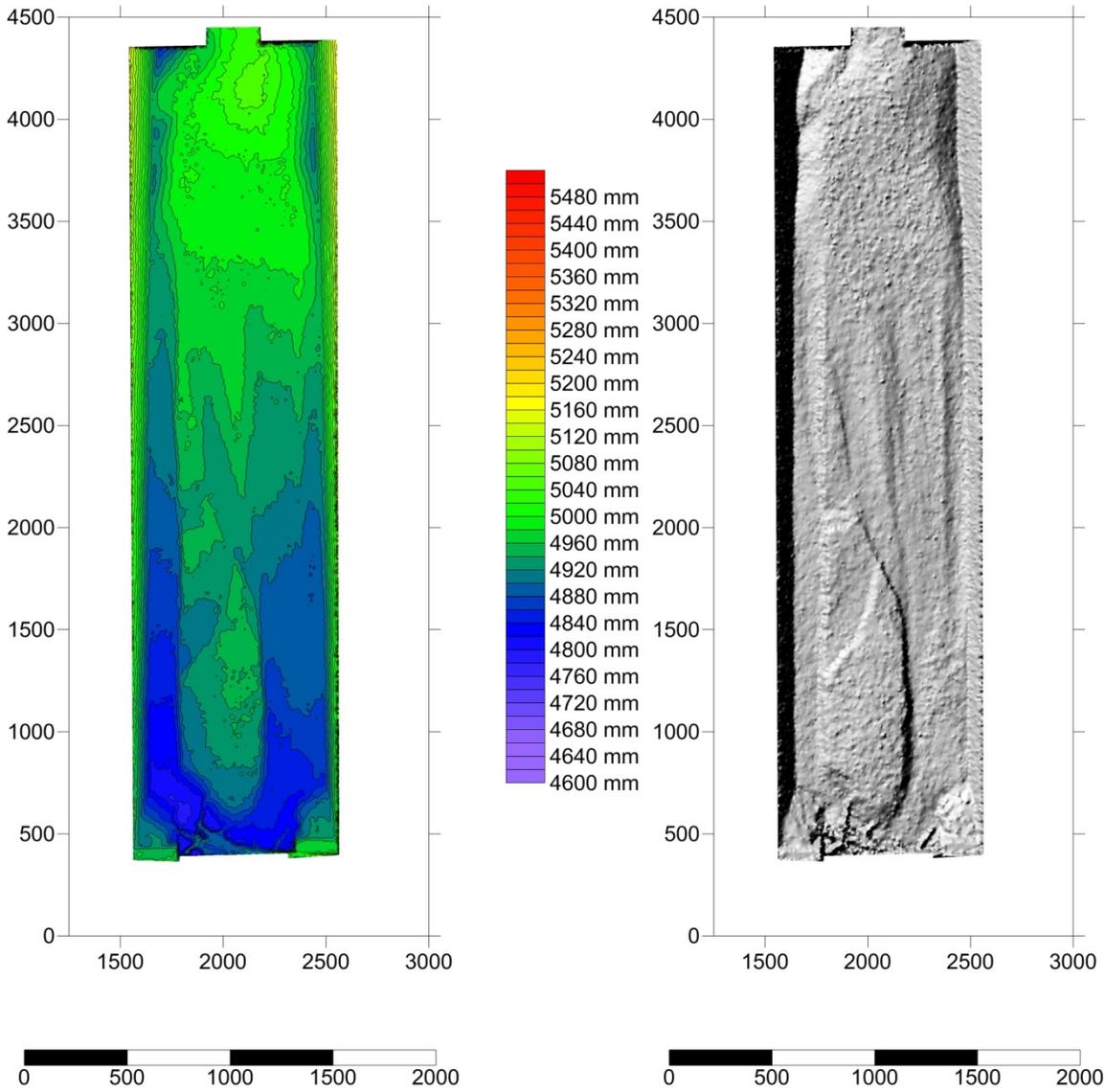


Abbildung 46: Höhengichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 8 nach HQ₁₅₀.

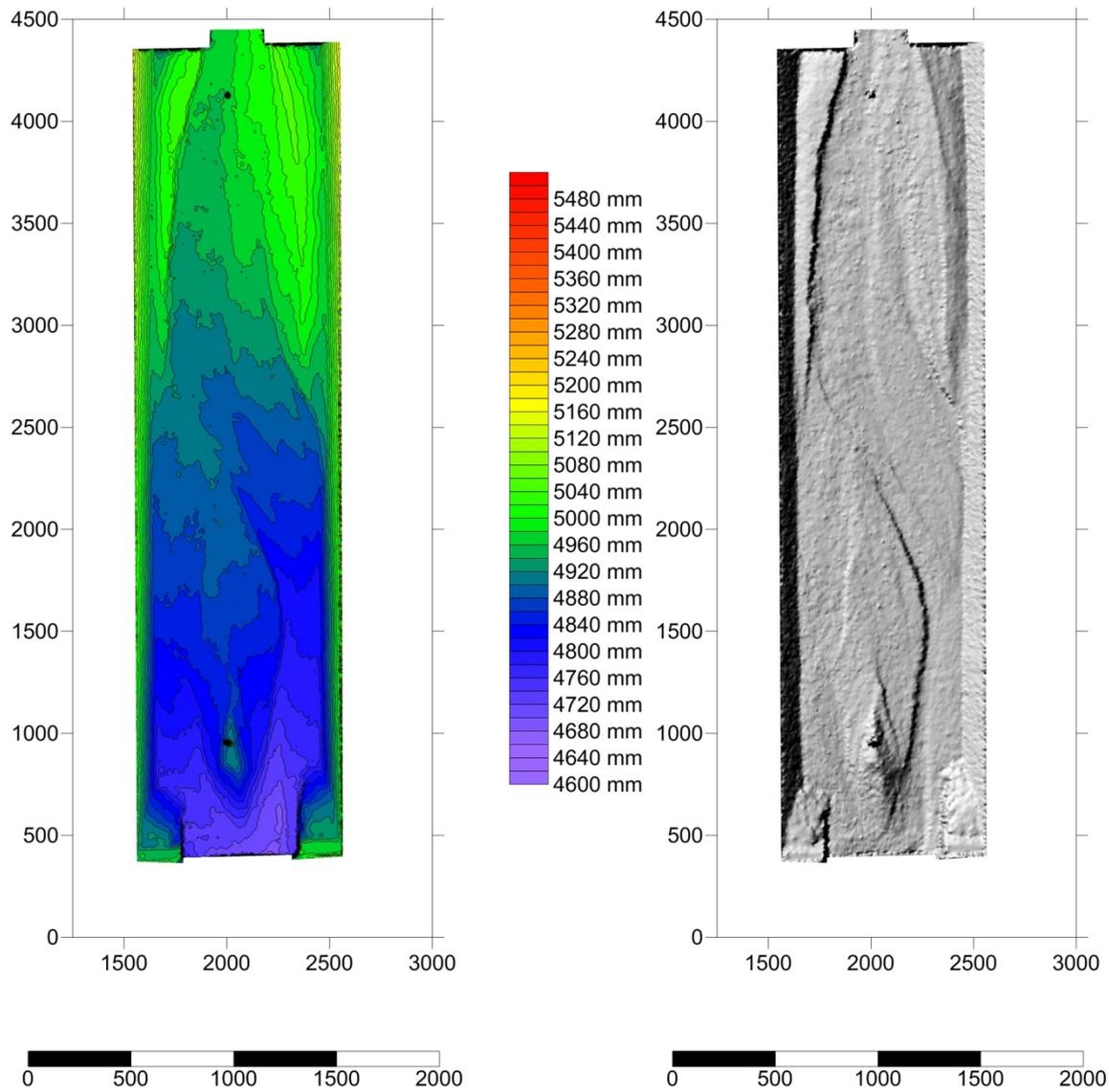


Abbildung 47: Höhengichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 8 nach Spülung HQ₅.

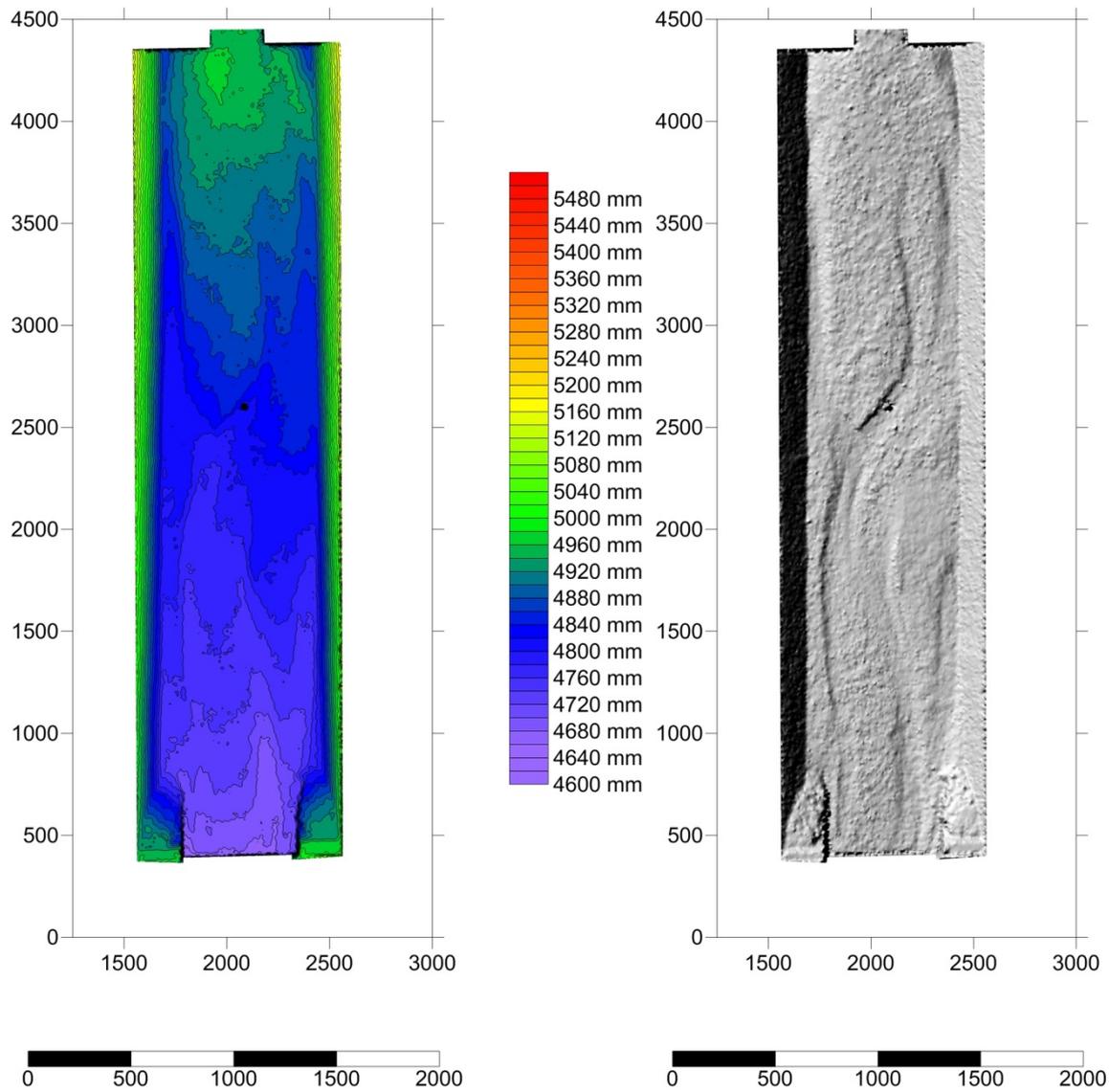


Abbildung 48: Höhengichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 10 nach HQ₁₅₀.

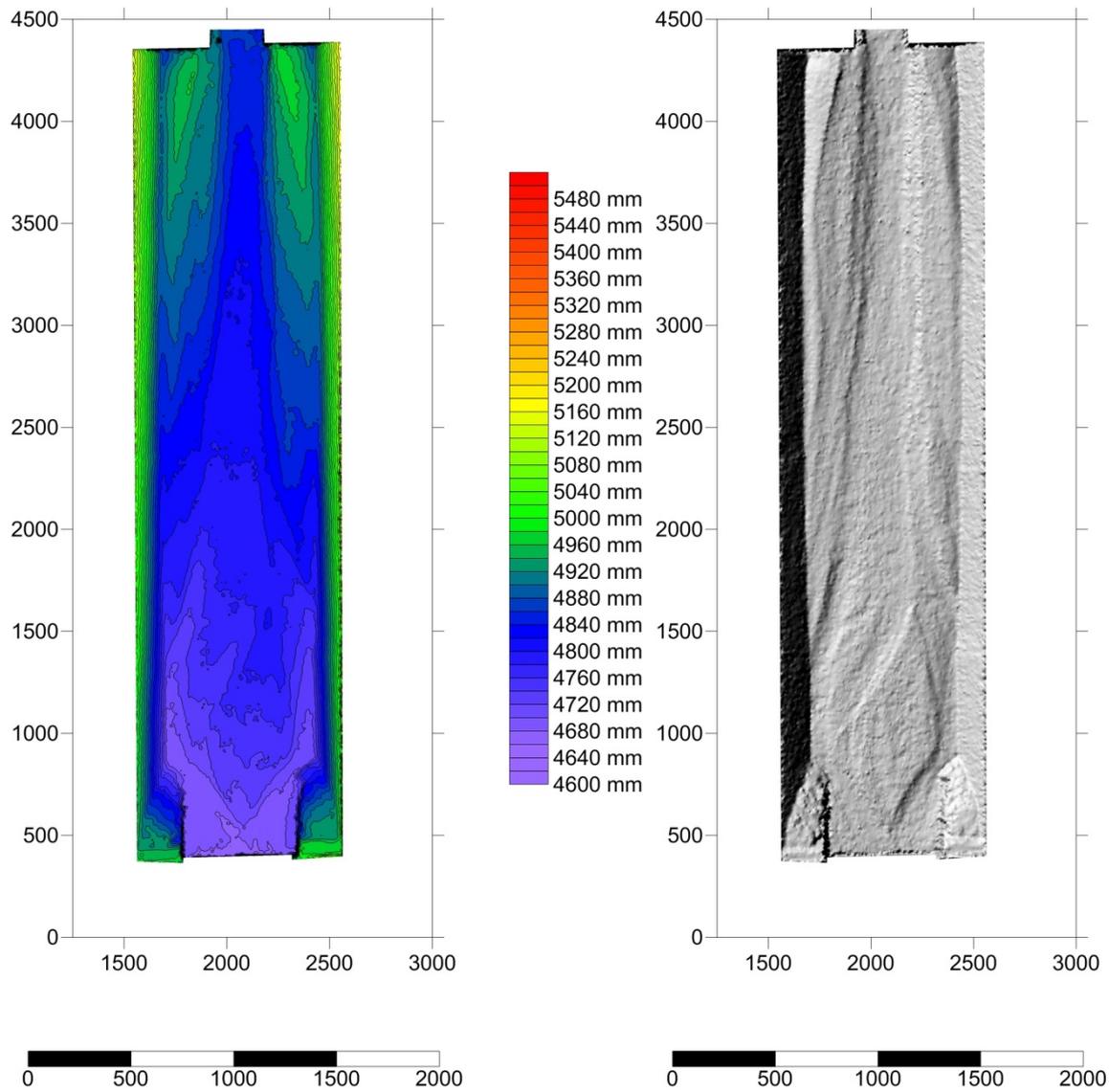


Abbildung 49: Höhengichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 10 nach Spülung HQ₅.

8.3 Scans der Ablagerungen Birnenform mit Rechensperre

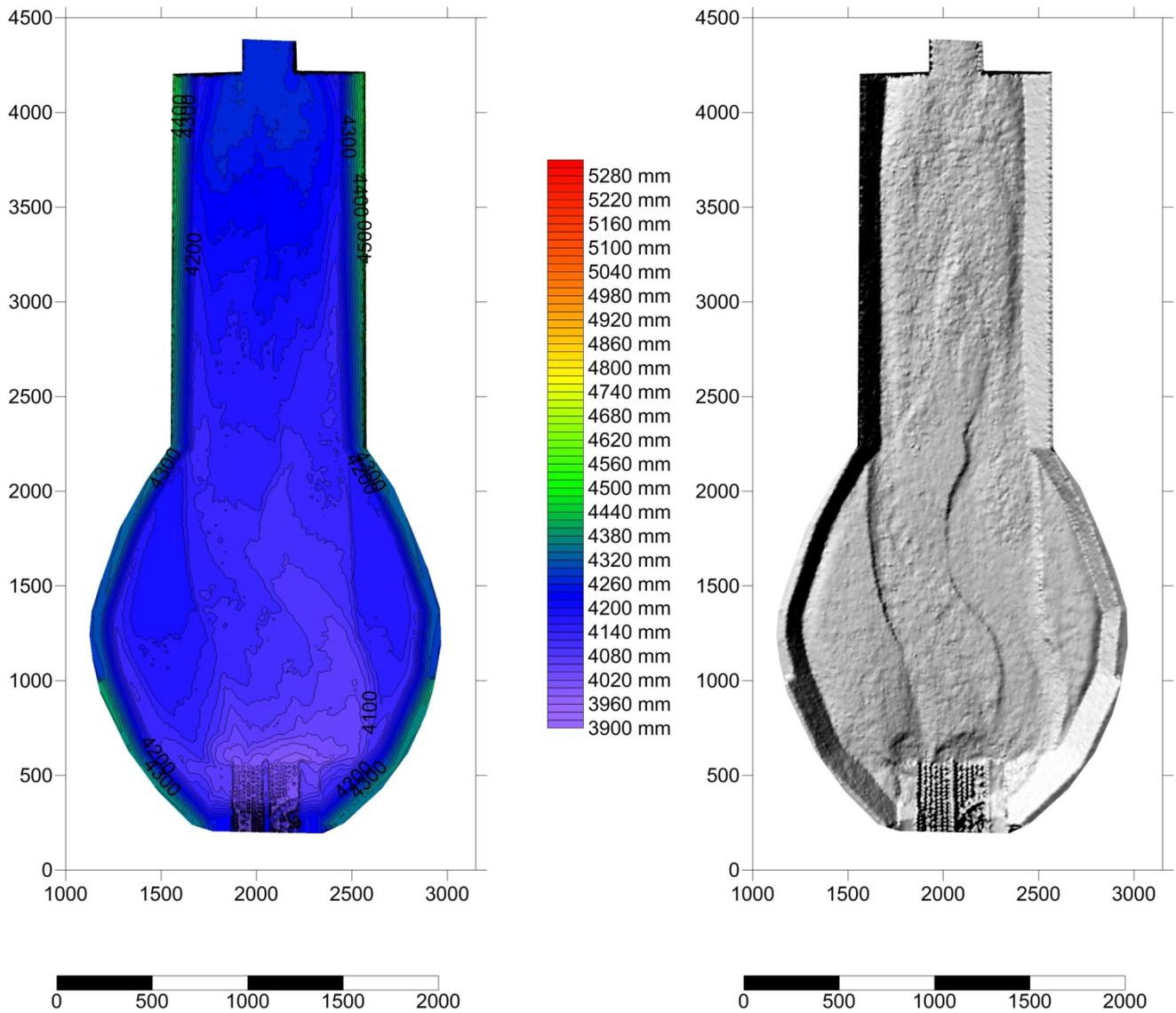


Abbildung 50: Höhengschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 11 nach HQ₁₅₀.

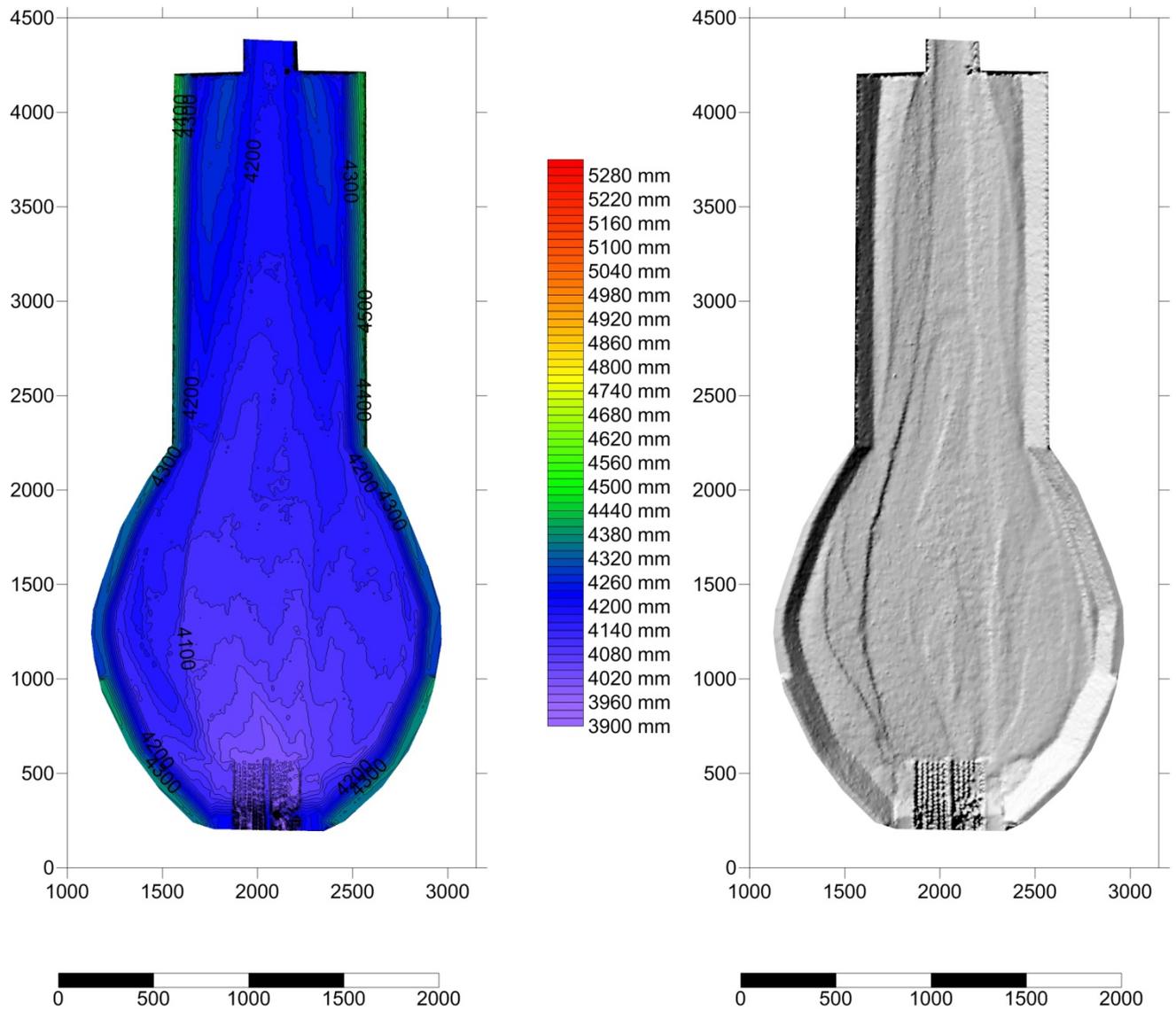


Abbildung 51: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchnummer 11 nach Spülung HQ₅.

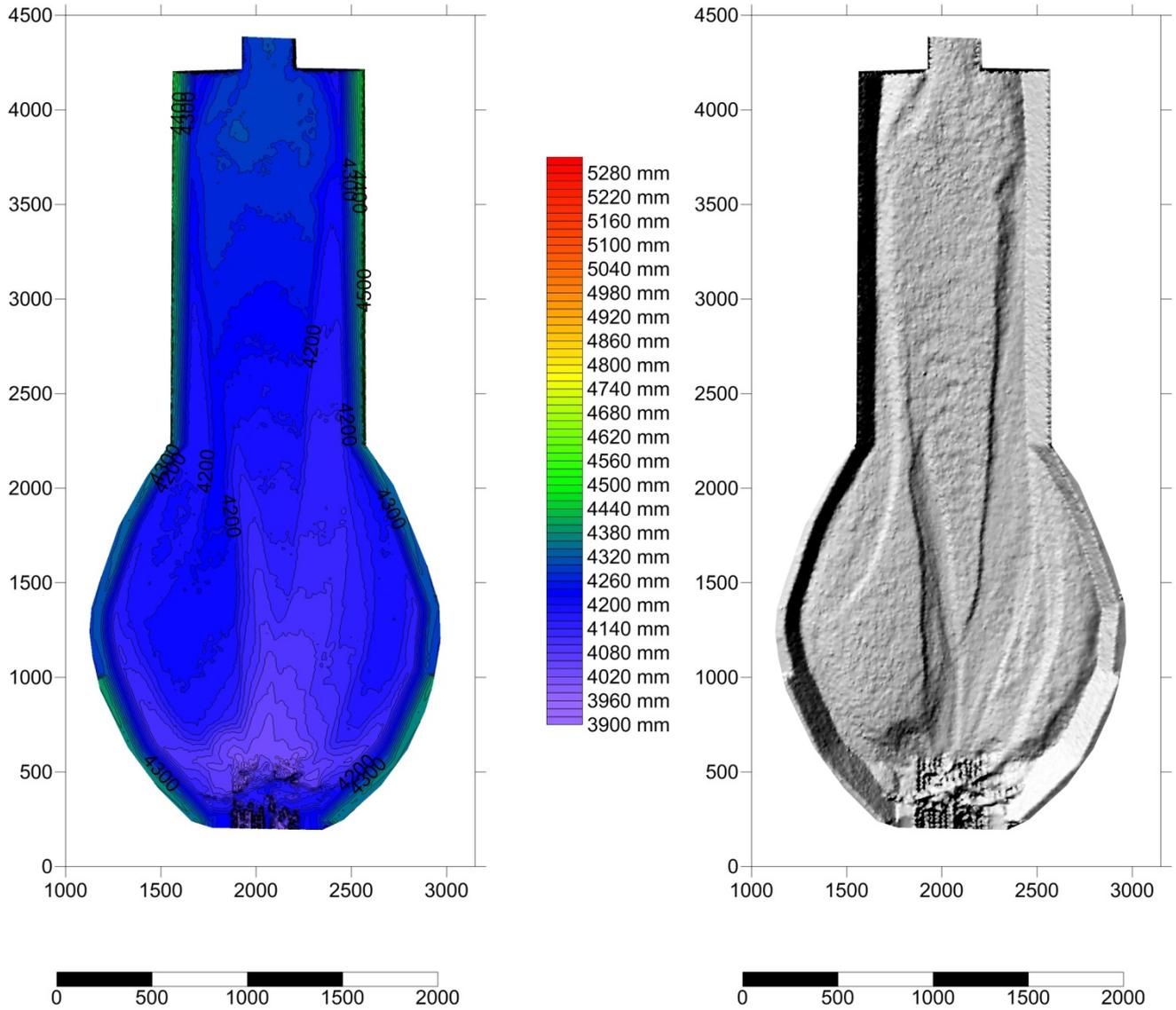


Abbildung 52: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 12 nach HQ₁₅₀.

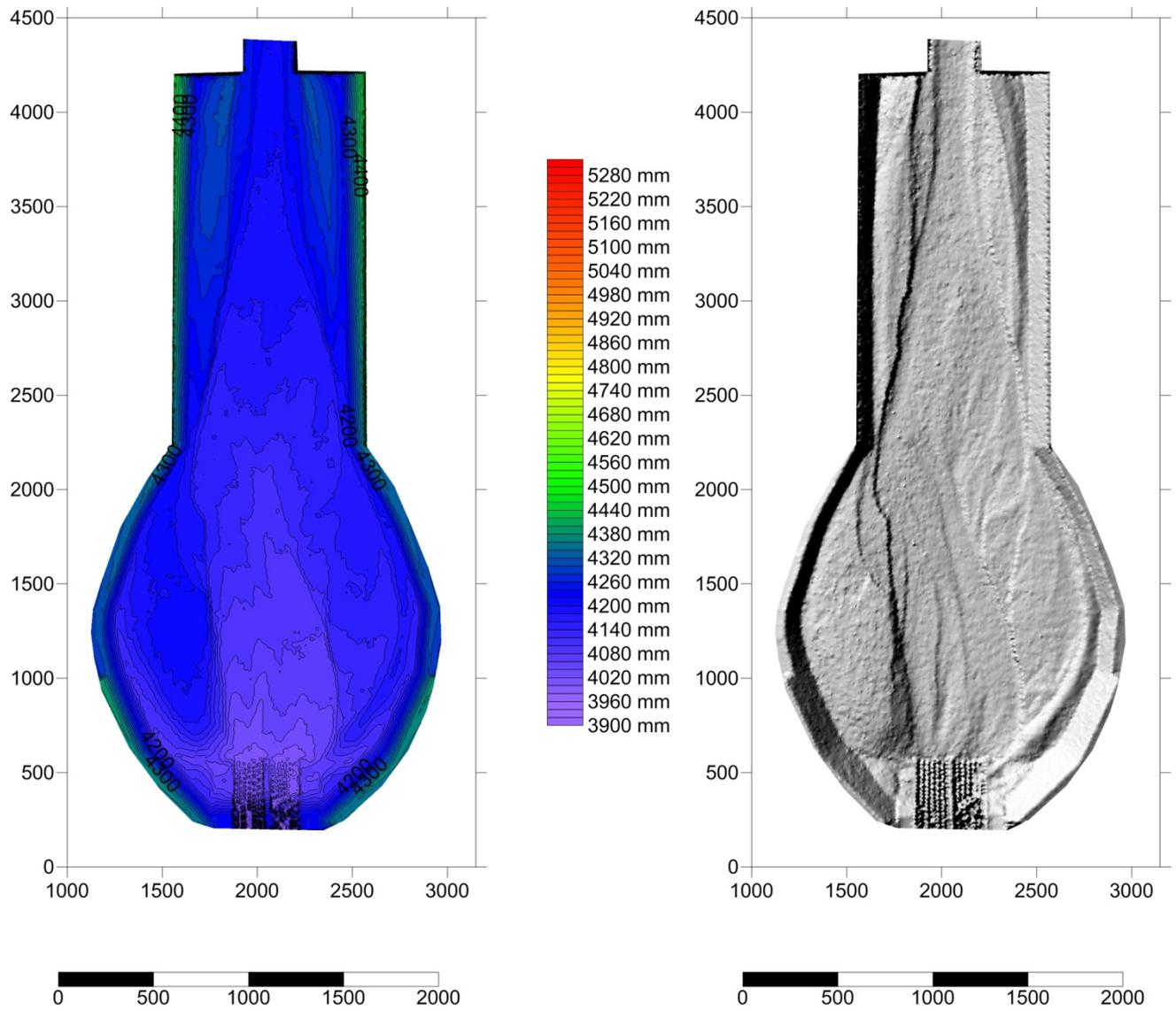


Abbildung 53: Höhengichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 12 nach Spülung HQ₅.

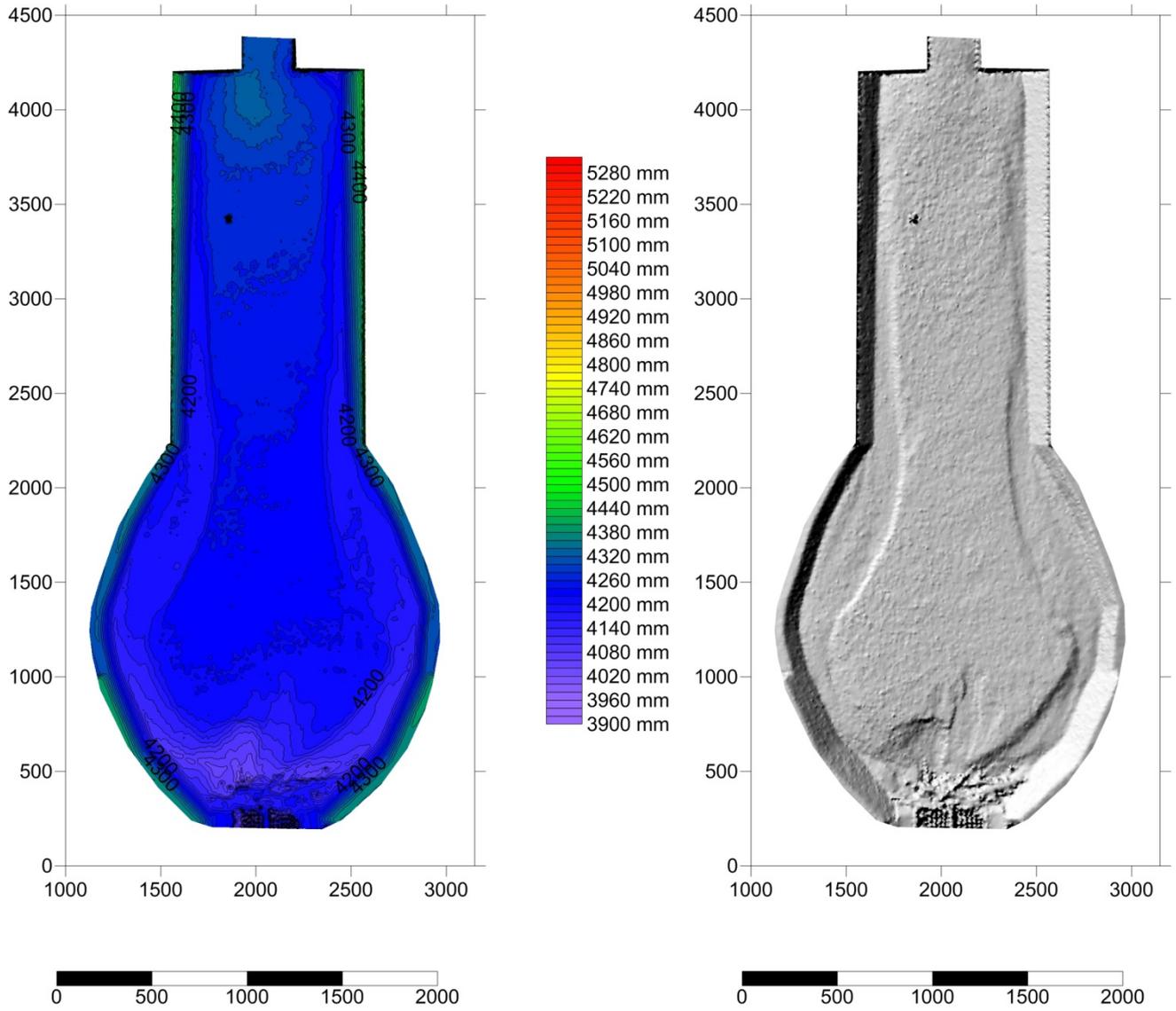


Abbildung 54: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 14 nach HQ₁₅₀.

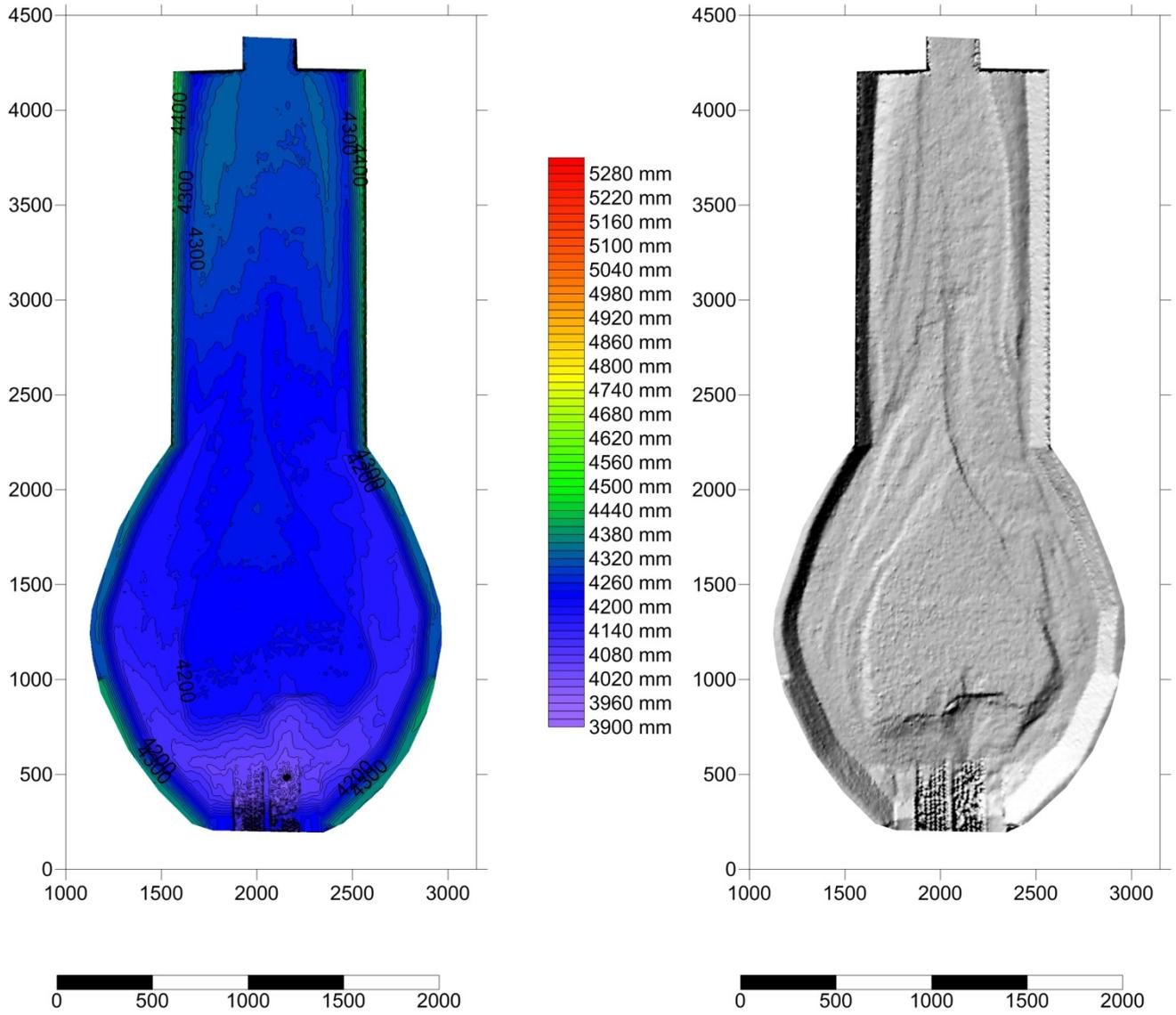


Abbildung 55: Höhengichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 14 nach Spülung HQ₅.

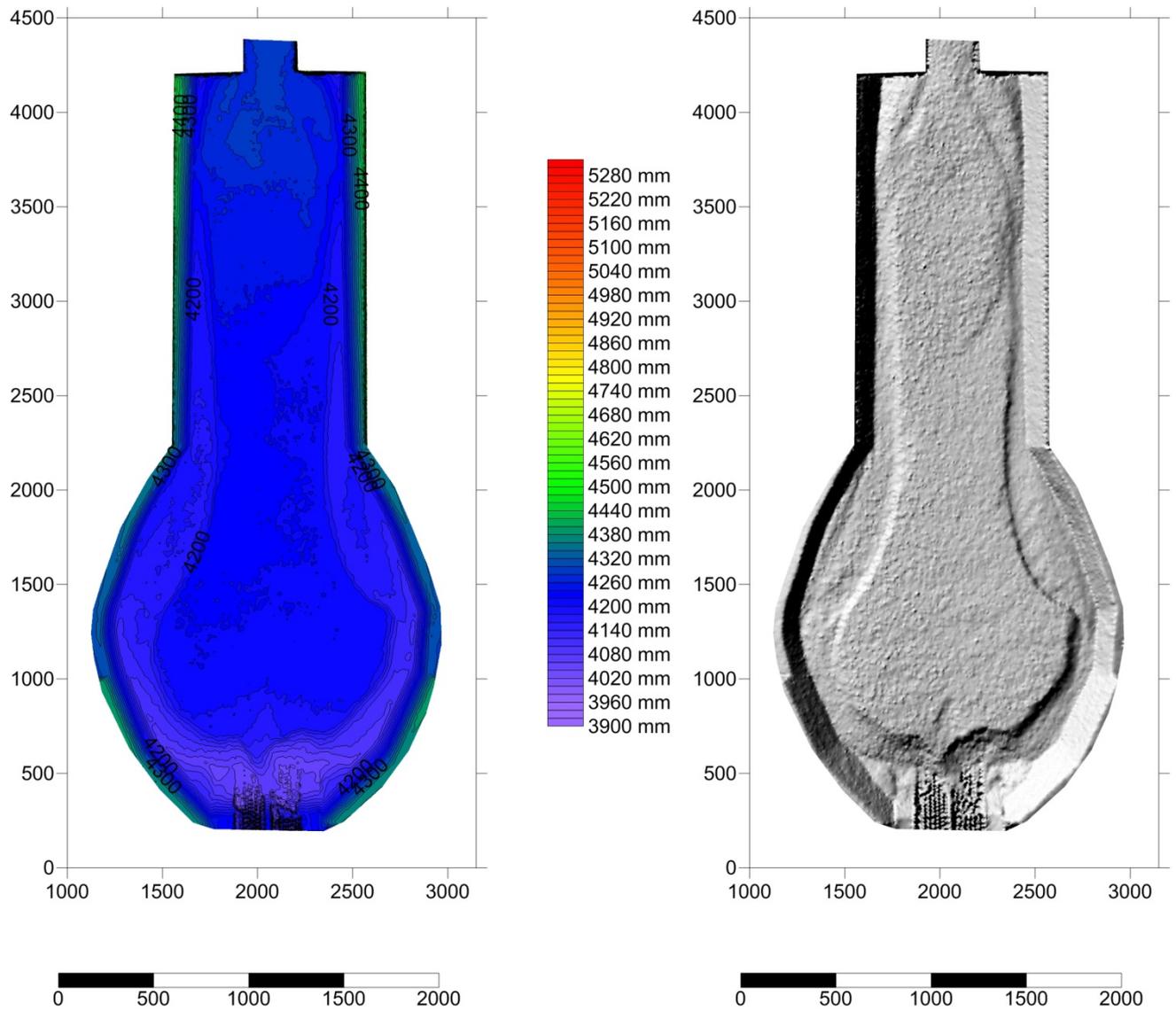


Abbildung 56: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 15 nach HQ₁₅₀.

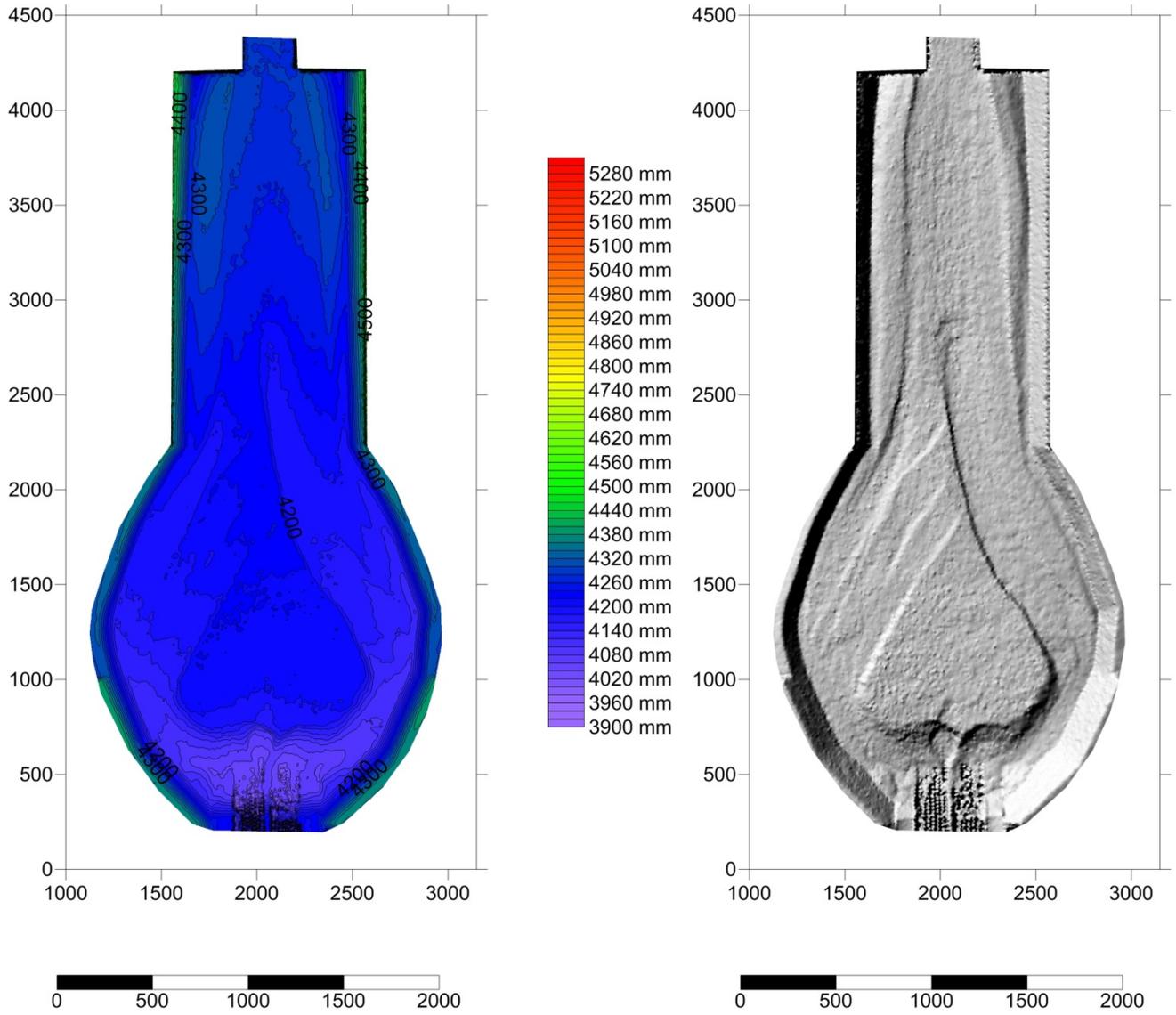


Abbildung 57: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 15 nach Spülung HQ₅.

8.4 Scans der Ablagerungen Birnenform mit Balkensperre

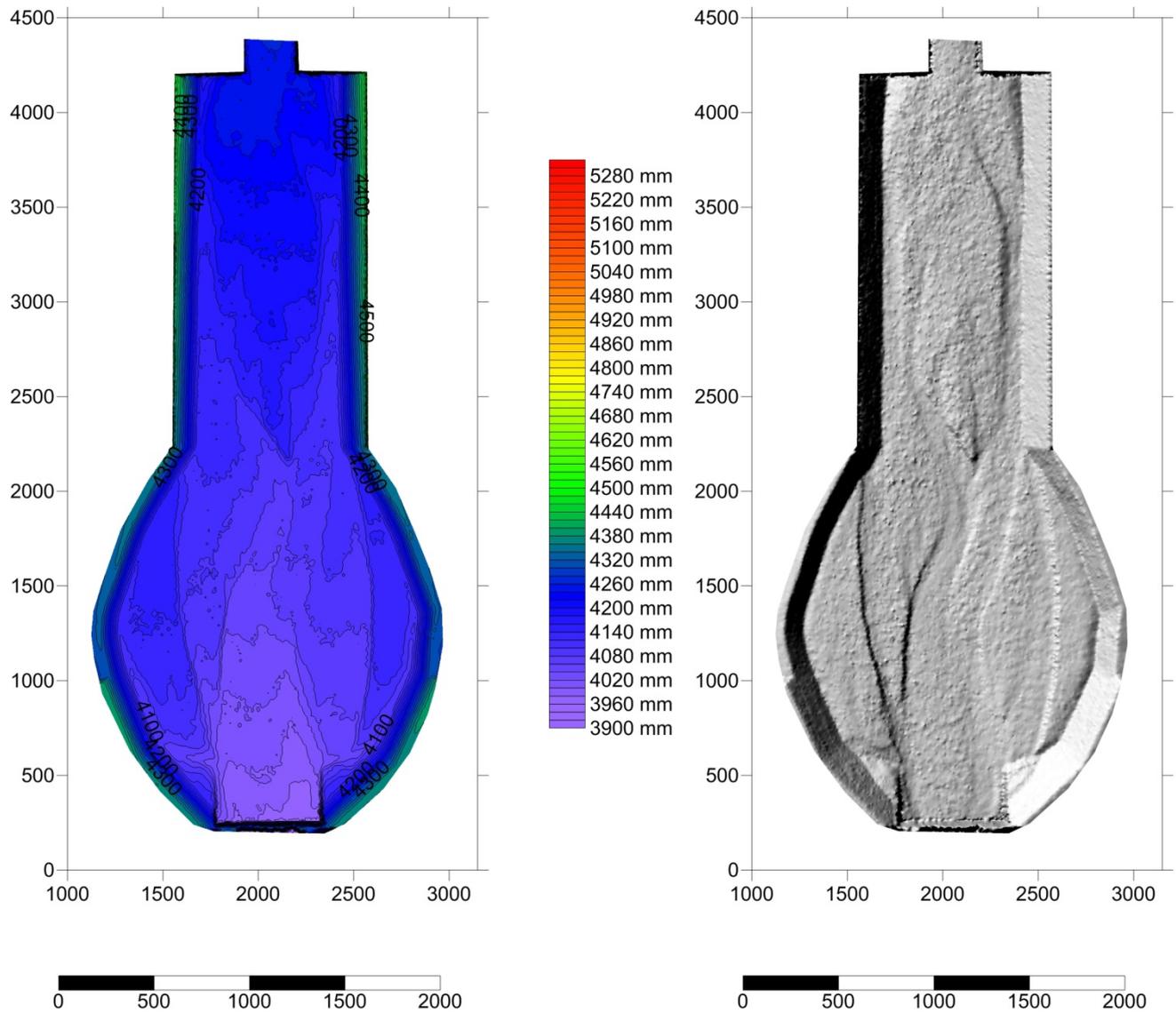


Abbildung 58: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 16 nach HQ₁₅₀.

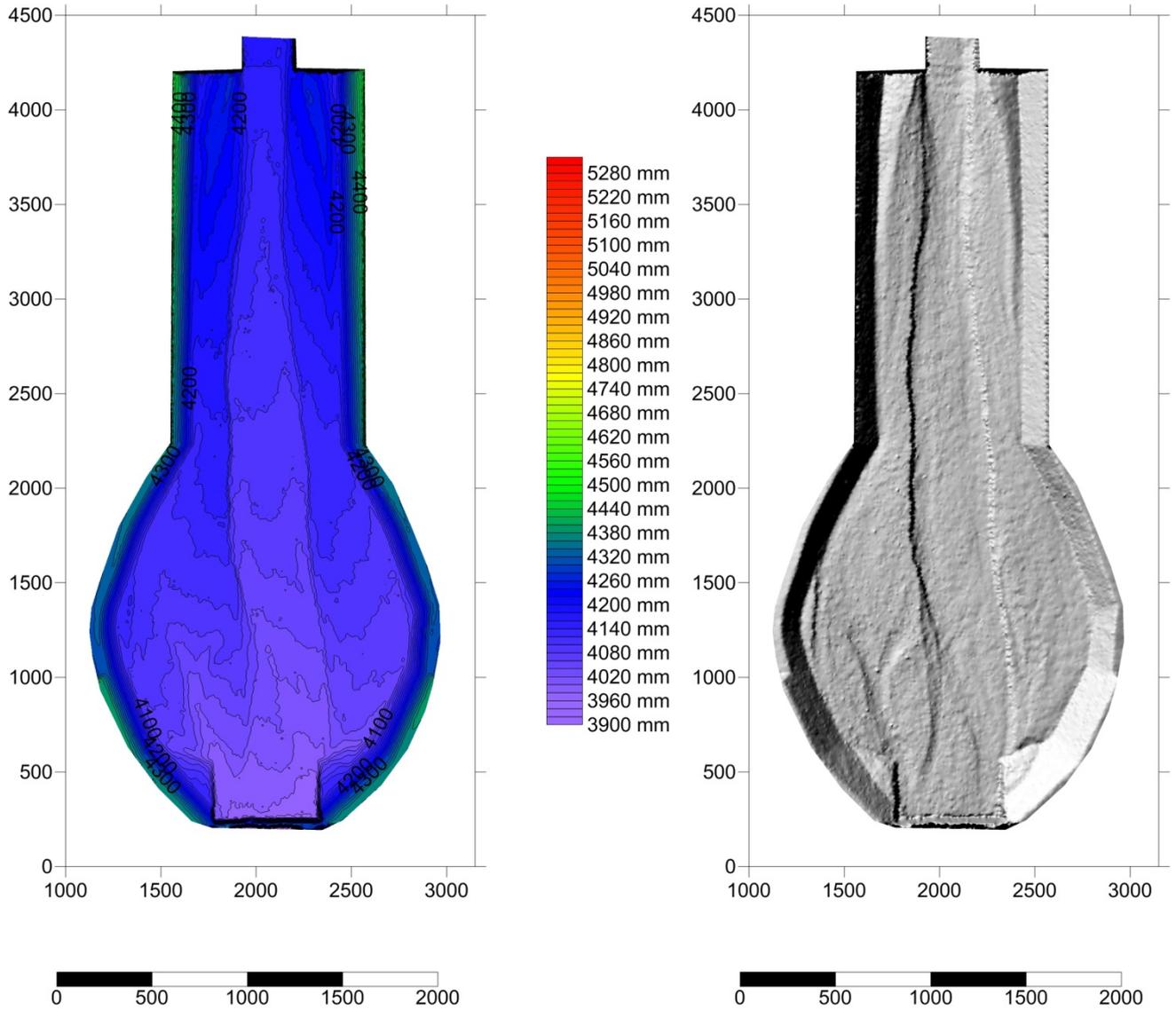


Abbildung 59: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 11 nach Spülung HQ₅.

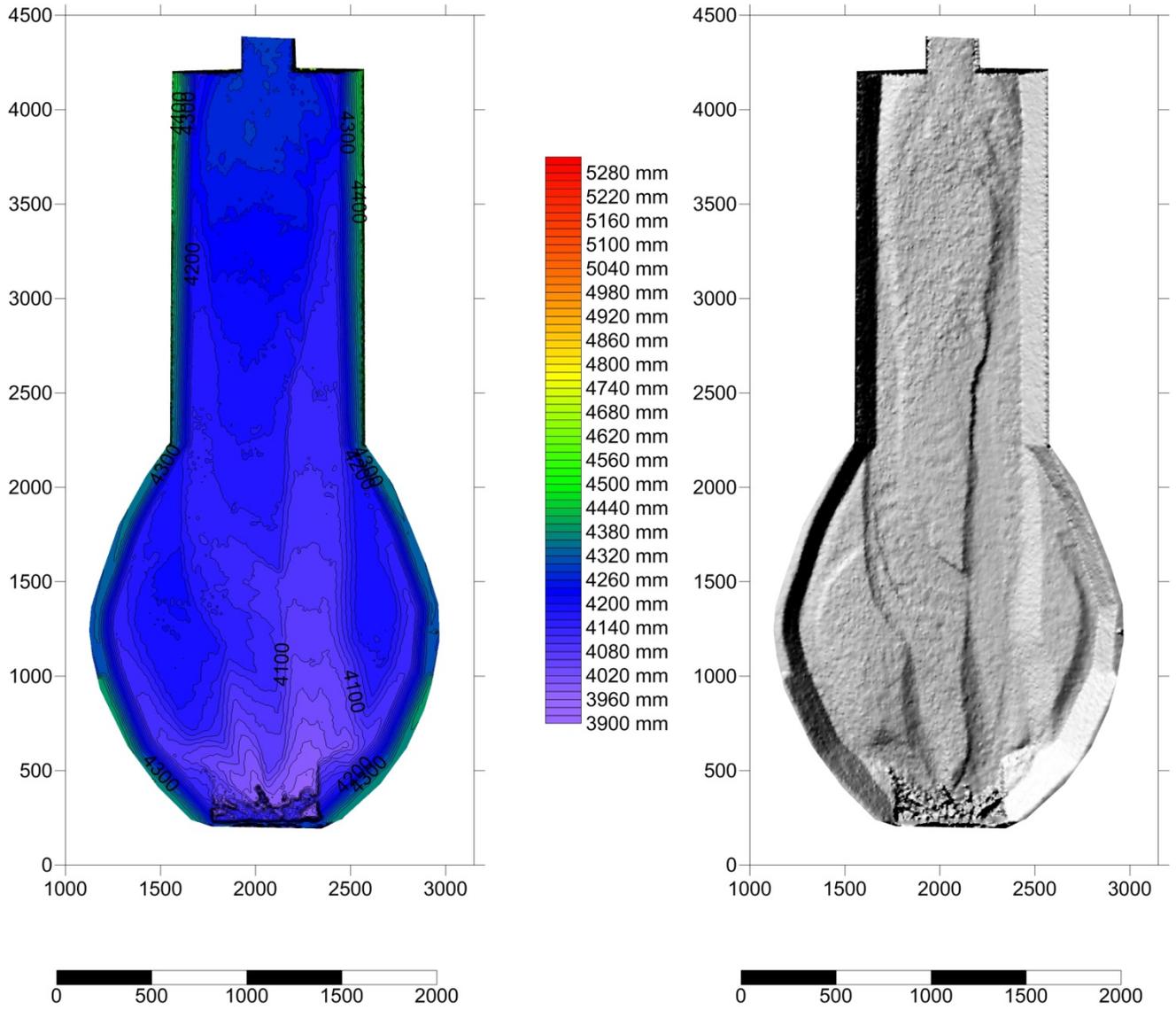


Abbildung 60: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchnummer 17 nach HQ₁₅₀.

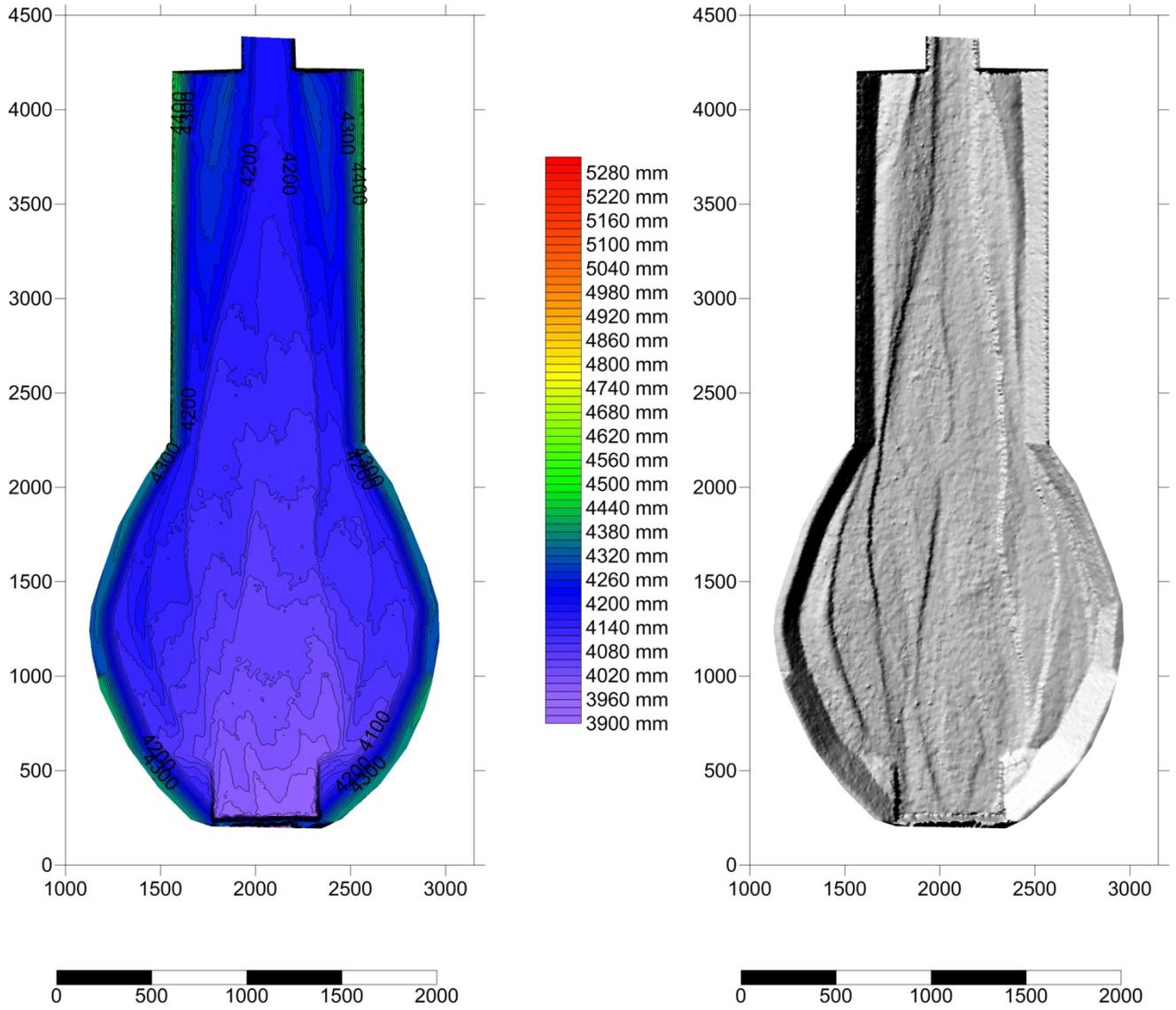


Abbildung 61: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 17 nach Spülung HQ₅.

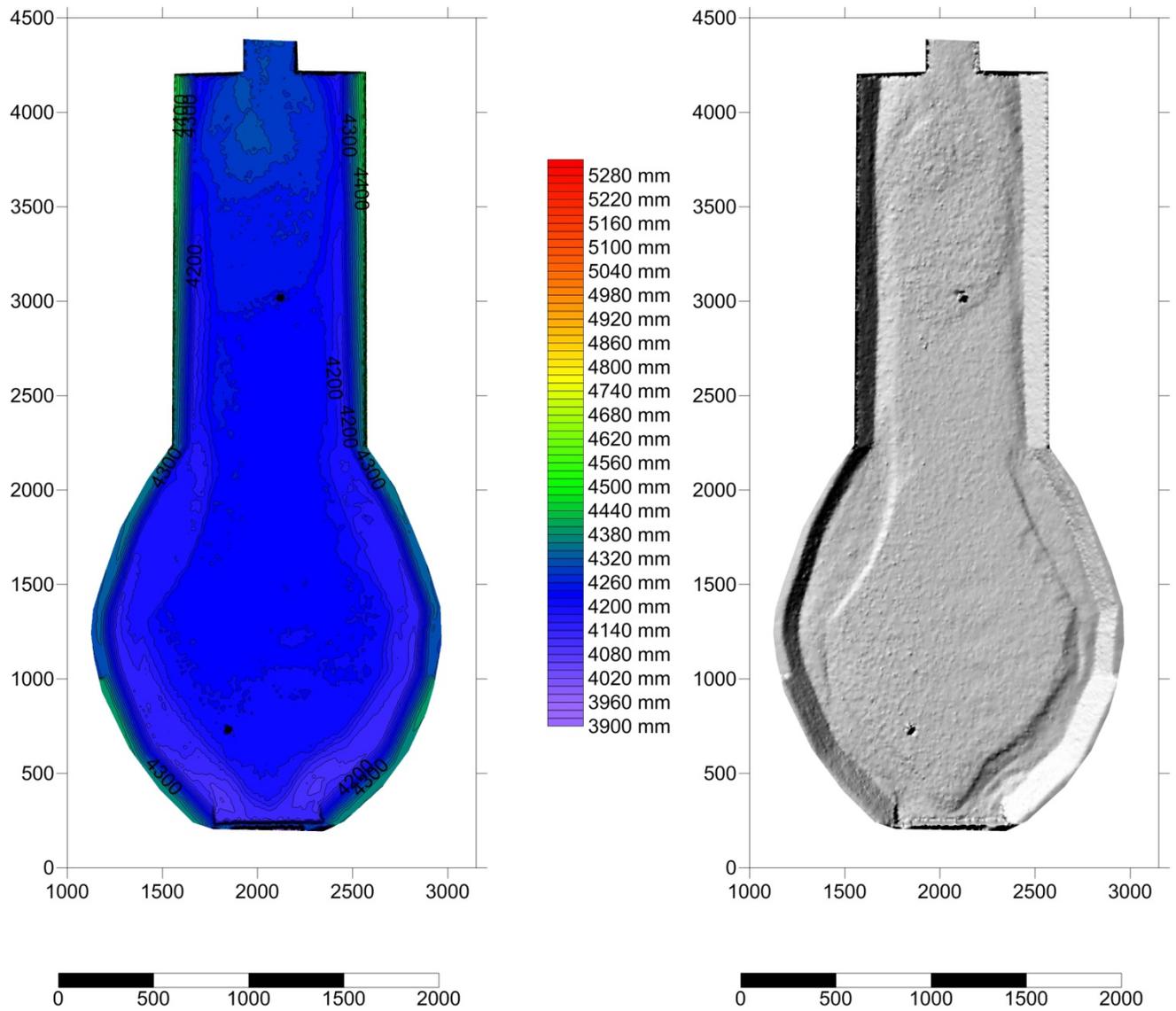


Abbildung 62: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 20 nach HQ₁₅₀.

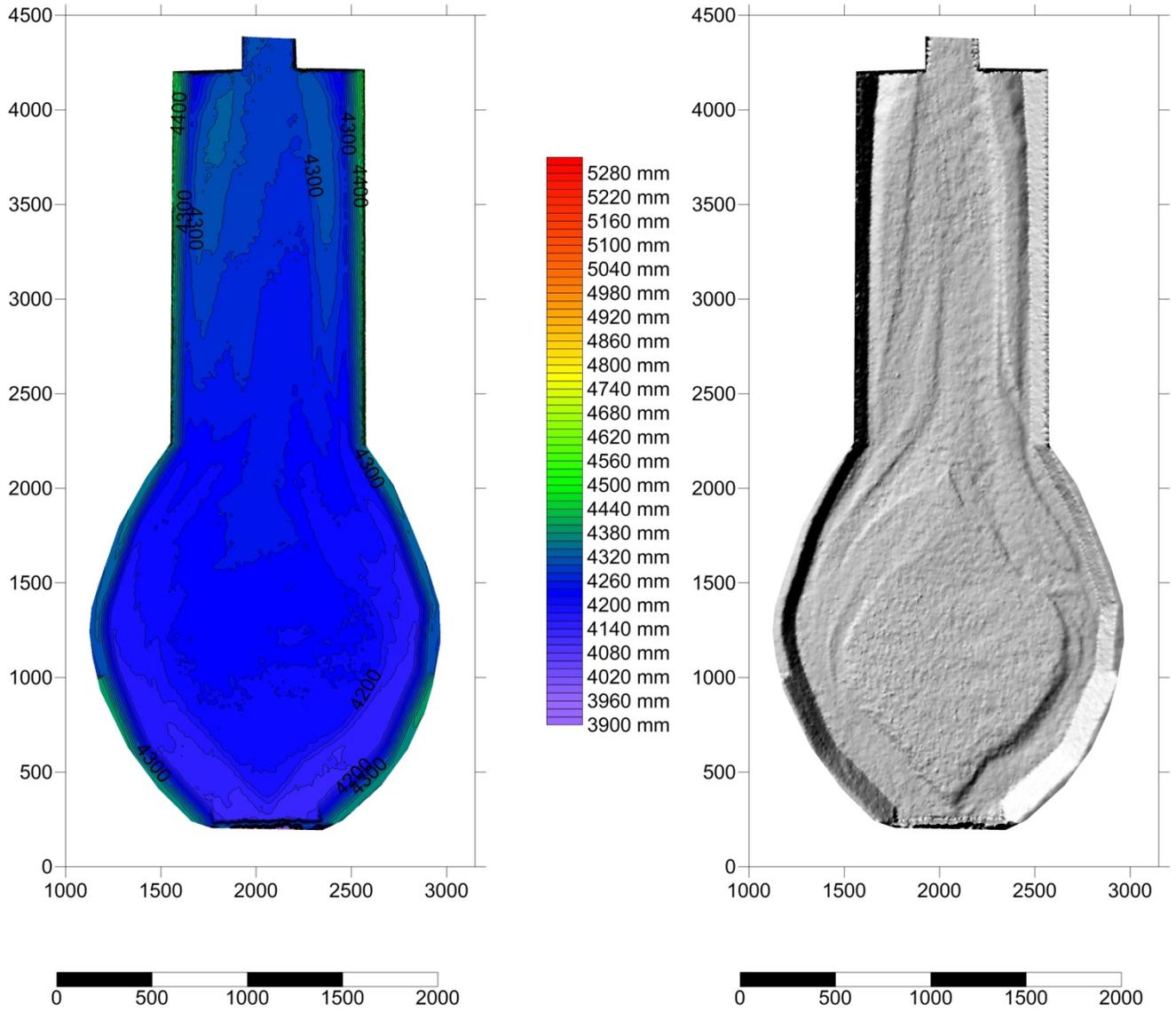


Abbildung 63: Höhengichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 20 nach Spülung HQ₅.

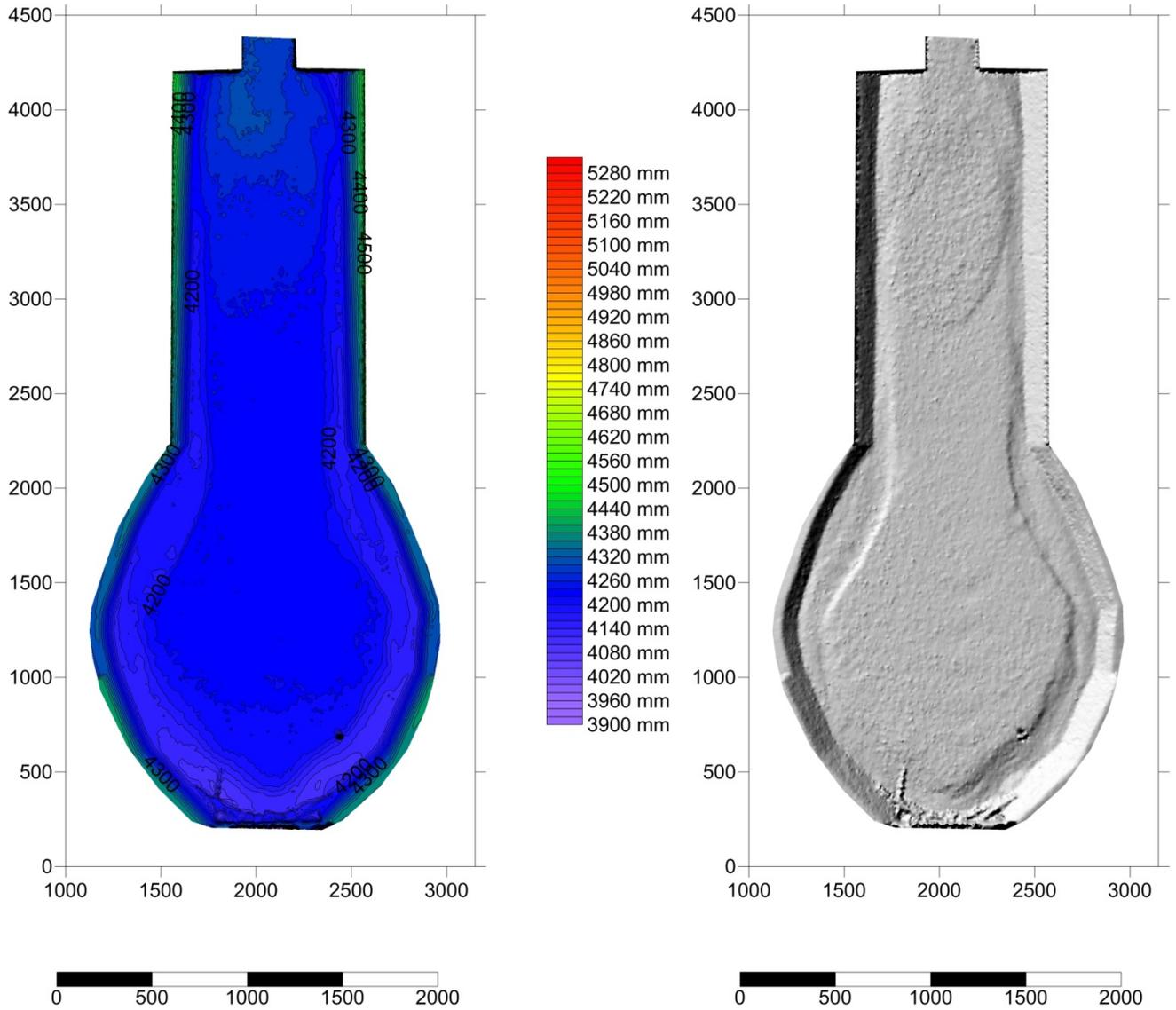


Abbildung 64: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchnummer 21 nach HQ₁₅₀.

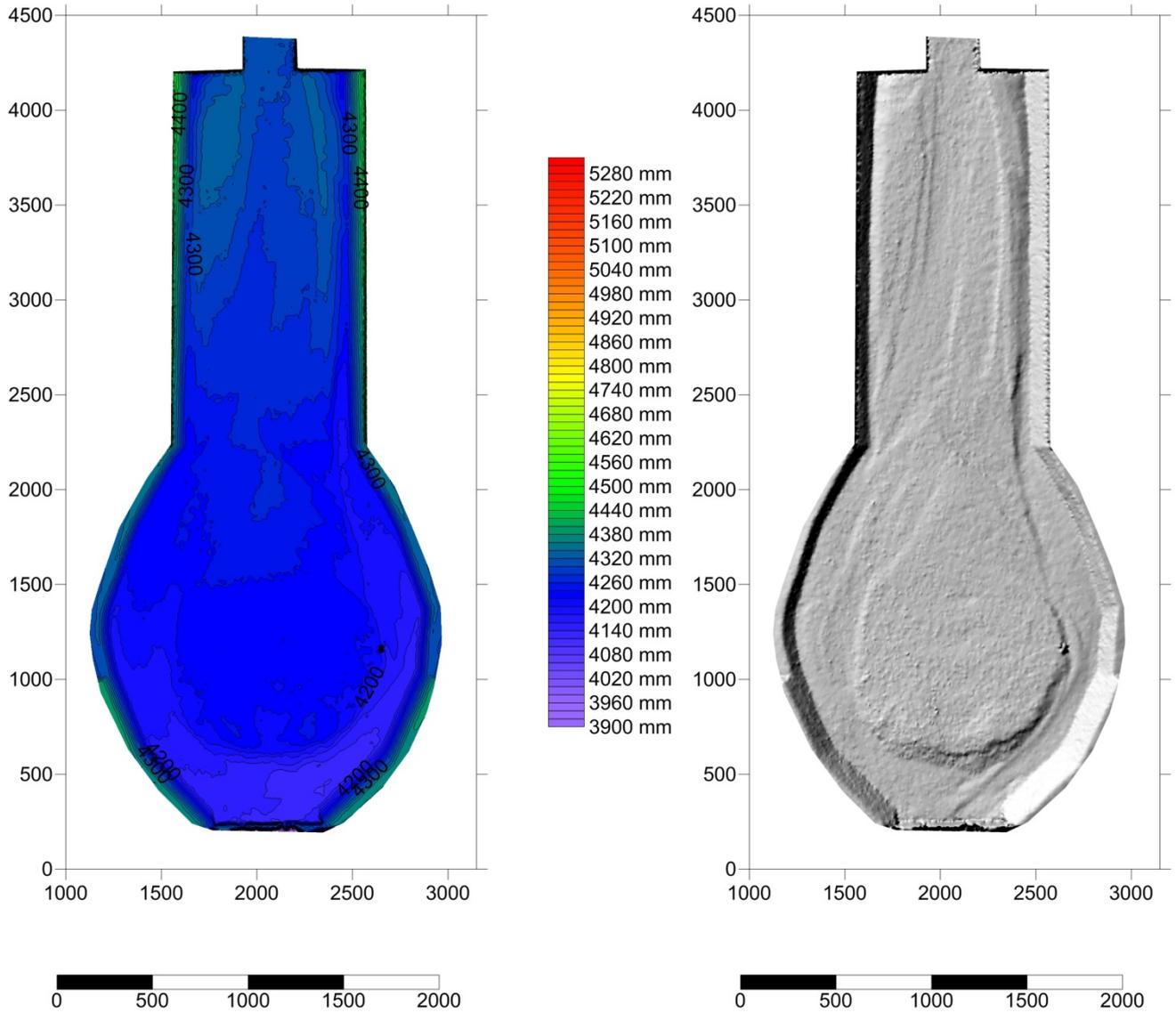


Abbildung 65: Höhenschichtlinien und Hillshade Versuchsnummer 21 nach Spülung HQ₅.

9 English Summary

9.1 Introduction

In the framework of the INTERREG Project "SedAlp" (Sediment management in Alpine basins: integrating sediment continuum, risk mitigation and hydropower WP6 Performance analysis and definition of optimal planning and design of torrent control works to reduce their impact on longitudinal sediment continuity) physical scale model experiments are carried out in the hydraulic laboratory of the Institute of Mountain Risk Engineering at the University of Life Sciences in Vienna in order to optimize torrent protection structures.

9.2 History of physical scale models for torrents

For this project available data on physical scale models were reviewed. In the year 1901 WANG (1901) made first experiments to understand fan formation. STINY (1917) gave further descriptions on the related processes. HAMPEL (1968) made numerous experiments to investigate the deposition behaviour of torrents and gave recommendations on the construction of retention basins. He showed the influence of the grain-size distribution and the slope on the deposition. His key findings are: Deposition is more dependent on the sand content of a sediment mixture than on the grain-size distribution. An increase of the sand content by 7 % results in an increase of the slope of the deposition by 1 %. An increase of the channel slope by 10 % results in an increase of the slope of the deposition by 1 %. And finally an increase of the mean grain diameter by a factor of 10 results in an increase of the slope of the deposition by 3 %. HAMPEL (1974) investigated different types of check-dams and concluded:

1. The relation between beam distance and maximum grain-size should be bigger than 1 to favour self-emptying.
2. Horizontal beams are preferable over vertical beams.
3. The distance between the beams should not be bigger than 1.5 the width of the beam.
4. Series of check-dams with decreasing beam distance are recommended.

For ZOLLINGER (1983) the key parameters to optimize a deposition basin are the size and form as well as the height and size of the openings of a dam. For self-emptying the following factors are most important:

1. High discharges with low sediment concentration
2. High content of fine sediment and no presence of cohesive material.
3. Long, narrow and steep deposition basins.
4. Backwater effects reduce the sediment peaks and prefer self-emptying processes.
5. Driftwood must be removed after clogging.
6. Armour layer should be destroyed.
7. Openings of dams have to be over the whole height, but there may be beams in-between.
8. The receiving river and the torrent below the dam must be able to transport the passing sediment.
9. The deposition basin must be reached by machines.
10. Control and maintenance are essential.

SETZNAGEL (1989) made a lot of experiments in order to test different types of check dams for the processes bedload transport and debris flow.

Unfortunately all above mentioned experiments were not Froude scaled. That means the results can only be regarded qualitatively, but cannot be related quantitatively with nature.

For the actual project pre-investigation were made by HAINZER (2013) and TROJER (2013) at the Institute of Mountain Risk Engineering. All experiments are Froude scaled. The physical scale is 1:30. HAINZER (2013) investigated the deposition and self-emptying behaviour of a screw dam with vertically inclined beams. TROJER (2013) extended the experiments by adding driftwood and comparing the screw-dam with a beam dam with horizontal beams. The experiments were made in an elongated deposition basin with 5 % channel slope. Therefore a scaled hydrograph and sedigraph were applied. During the falling limb of the hydrograph no sediment was added to model self-emptying at the end of the experiments. Their key findings are:

1. The deposition behaviour of bedload can be controlled by the beam distance, if no driftwood is present.
2. Driftwood causes a more chaotic deposition behaviour, but clearly increases the deposition volume.
3. Screw dams with vertically inclined beams cause less clogging by driftwood than beam dams with horizontal beams.

9.3 Model Setup

Two different types of check dams are investigated. A screen-dam with inclined vertical beams is compared with a beam-dam with horizontal beams (Figure 1). The experiments should evaluate the variation of sediment transport of these structures including the influence of coarse woody debris. Therefore the distance between the steel elements can be adjusted to show their ability to filter sediment. The distances have been varied from 10.5 mm ($=d_{90}$ of the grain-size distribution) to 15 mm. The physical scale of the experiments is 1:30. All experimental runs are Froude scaled. Both dams are tested in elongated and pear-shaped sediment retention basins in order to investigate the shape effect of the deposition area. Both different geometries are shown in Figure 2 and Figure 3. The inclination of the basin is 5 %.



Figure 1: Screen-dam with inclined vertical beams and beam-dam with horizontal beams.

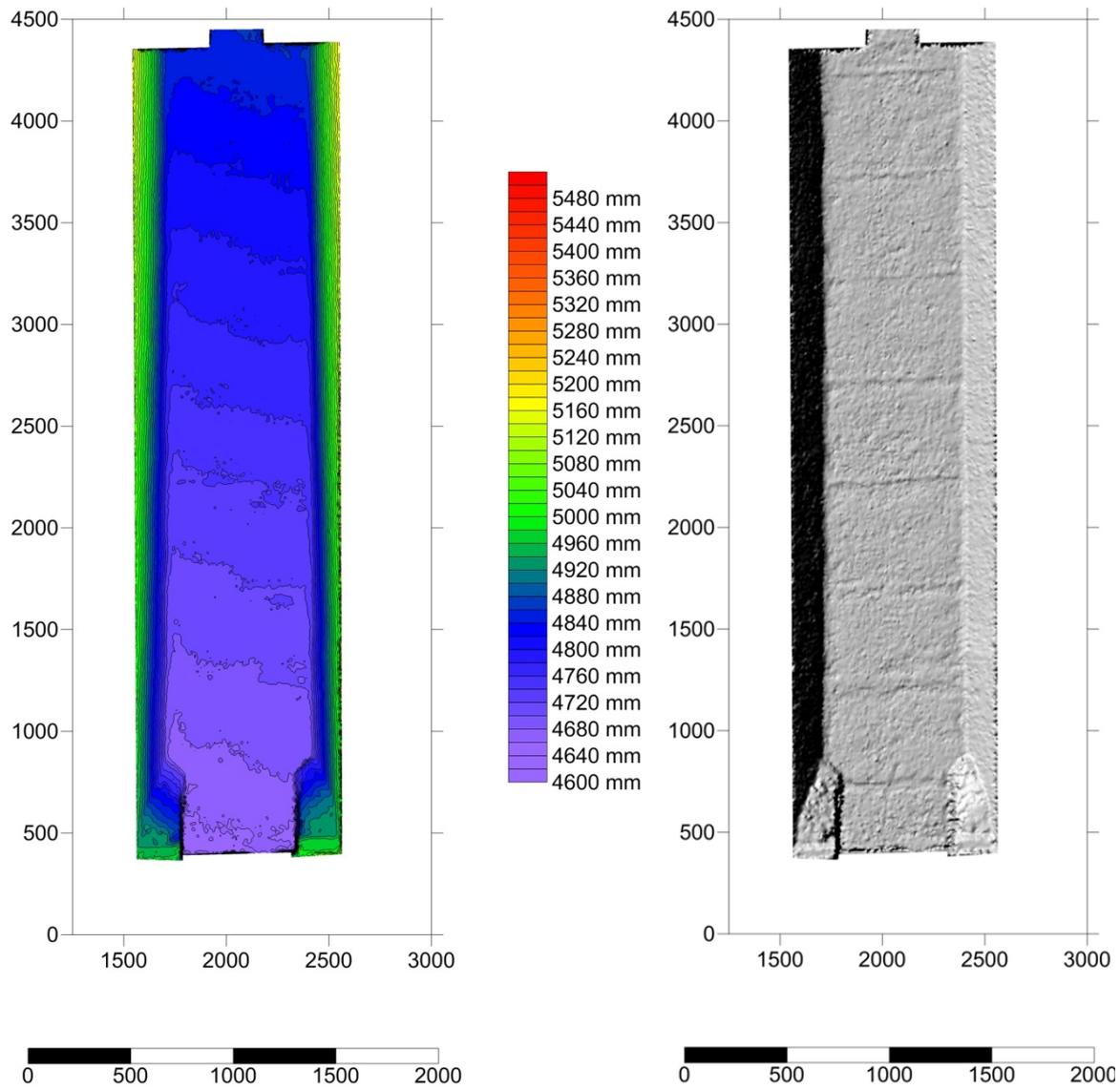


Figure 2: Elevation model and hill-shade of the elongated deposition basin.

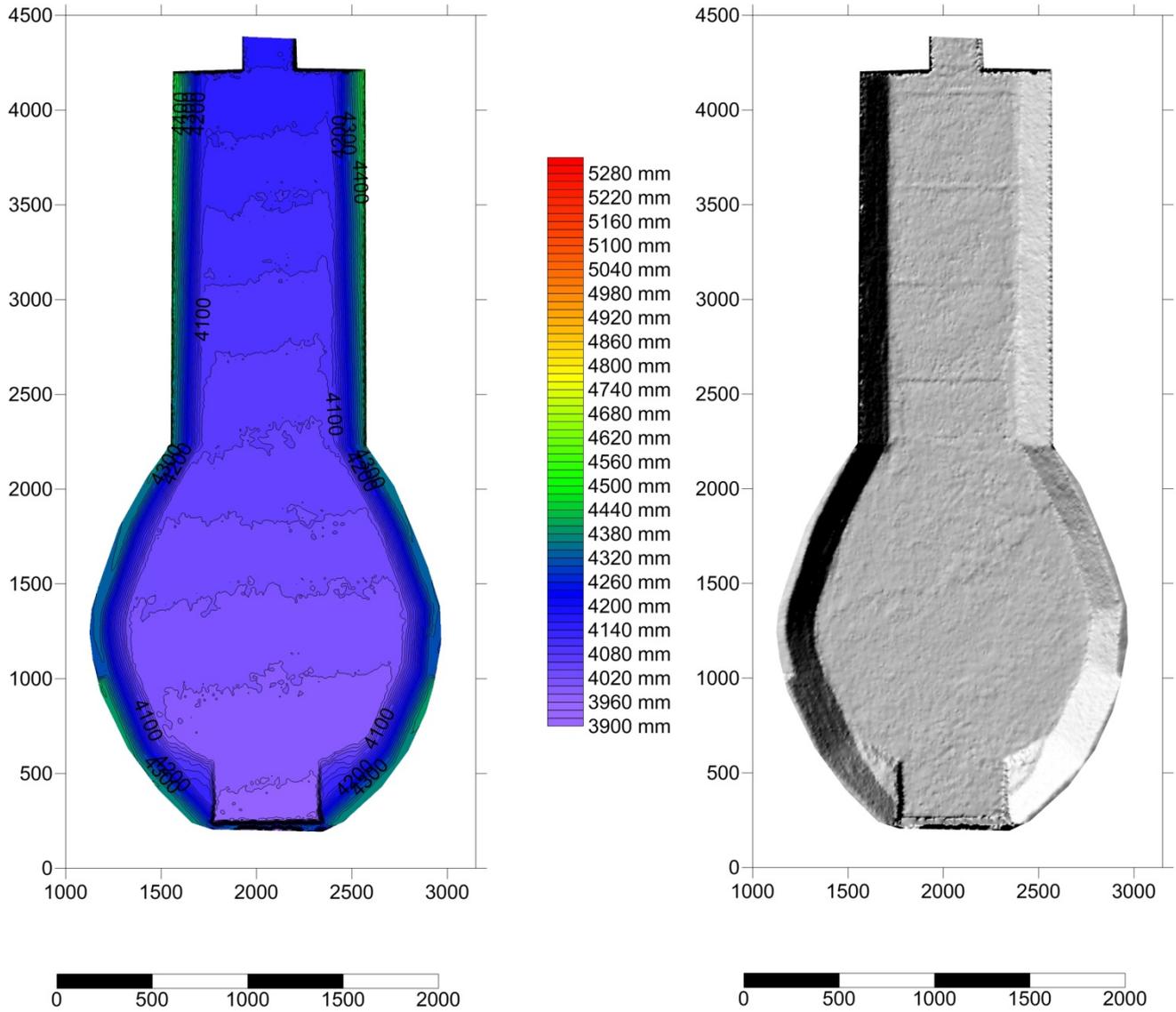


Figure 3: Elevation model and hill-shade of the pear-shaped deposition basin.

9.4 Experiments

First the hydraulic effect of the structures is investigated by measuring the flow field and the back-water effects of the protection measures. For a systematic comparison of the two check dams experiments with fluvial bedload transport are made. First a typical hydrograph for an extreme flood (HQ_{150}) with unlimited sediment supply is modelled. Therefore a typical torrential sediment mixture with a wide grain-size distribution is used. The sediment is fed by a conveyor belt according the transport capacity of the upstream reach. A total sediment volume of 1.05 m^3 is needed for each run. Then the deposition is scanned with a 2-D laser-scan device mounted on a rail above the basin in order to analyse the deposition pattern and the deposited volume. Afterwards a flood with a lower reoccurrence period (HQ_5) without sediment transport

from upstream is modelled to investigate the ability of the protection structure for self-emptying. Then the basin is scanned again to quantify the volume change in the deposition basin.

To investigate the influence of driftwood on the deposition behaviour experiments with logs are made. The hydro- and sedigraphs are the same as described above, but different log diameters and lengths are added upstream the basin. After scanning the surface the driftwood is removed carefully to model the cleaning of a log jam. An Example of a log jam can be seen in Figure 4. The view from the other side is shown in Figure 5. Then the more frequent flood without sediment and wood from upstream is modelled to show the self-emptying behaviour of the basins.



Figure 4: Example of a log jams caused by the added driftwood for both types of dams.



Figure 5: Rear view of log jams caused by the added driftwood for both types of dams.

An overview of all model runs for the elongated basin is shown in

Table 1 and for the pear-shaped basin in Table 2. Each run consists of the HQ_{150} and HQ_5 design event. Clearwater means that only the hydraulic behaviour (e.g. backwater effects of the dam in the basin) was investigated. Bedload means that $1,05 \text{ m}^3$ of bedload material were added by a conveyor belt according the

transport capacity of the upstream reach. And finally driftwood means that during the HQ₁₅₀ event additionally to the bedload driftwood was fed manually according a fixed timetable.

Table 1: Overview of the experimental runs for the elongated basin. Each run consist of the HQ₁₅₀ and HQ₅ design event.

Nr.	Type	Beam distance	Clear water	Bedload	Driftwood
001	screen dam	10,5 mm			
002	screen dam	10,5 mm			
003	screen dam	15 mm			
004	screen dam	15 mm			
005	screen dam	15 mm			
006	beam dam	10,5 mm			
007	beam dam	10,5 mm			
008	beam dam	15 mm			
009	beam dam	15 mm			
010	beam dam	15 mm			

Table 2: Overview of the experimental runs for the pear shaped basin. Each run consist of the HQ₁₅₀ and HQ₅ design event.

Nr.	Type	Beam distance	Clear water	Bedload	Driftwood
011	screen dam	15 mm			
012	screen dam	15 mm			
013	screen dam	15 mm			
014	screen dam	10,5 mm			
015	screen dam	10,5 mm			
016	beam dam	15 mm			
017	beam dam	15 mm			
018	beam dam	15 mm			
019	beam dam	10,5 mm			
020	beam dam	10,5 mm			
021	beam dam	10,5 mm			

9.5 Data Analysis

9.5.1 Deposition and erosion pattern

After each experiment the deposition was scanned by a laser-scan device mounted above the basin. With the known geometry of the basin the volume in the deposition basin was calculated by subtracting the elevation models after the HQ₁₅₀ and HQ₅. An example of a scan of a deposition for the experimental run Nr. 15 (screen dam with 10,5 mm beam distance and bedload transport without driftwood) is shown in Figure 6. The HQ₅

transported only sediment that was already deposited in the basin and some sediment that deposited in the channel upstream the basin. The deposition (left) and erosion (right) pattern can be seen in the hills-hade figures below.

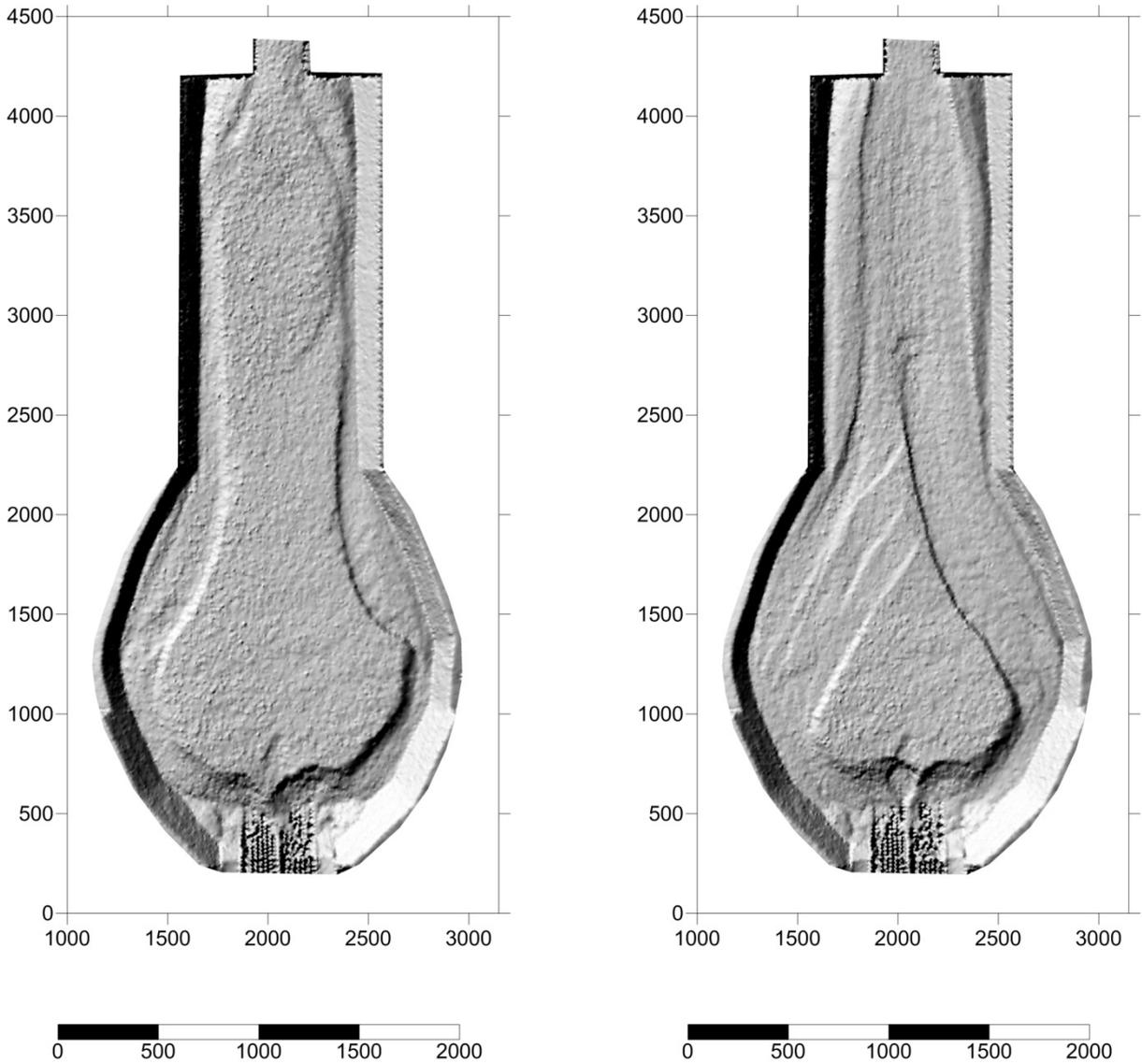


Figure 6: Hill-shade of the pear-shaped deposition basin for the experimental run 15 after the HQ₁₅₀ event with bedload transport and the following HQ₅ event without additional bedload from upstream.

9.5.2 Deposition volumes

Table 3 shows an overview of the deposition volumes for the elongated basin. The basin has been scanned after the HQ₁₅₀ event and finally after the following HQ₅ event. Table 4 shows an overview of the deposition volumes for the pear shaped basin for the same setup.

Table 3: Overview of the deposition volumes for the elongated basin. Each run consist of the HQ₁₅₀ and is followed by a HQ₅ design event.

Nr.	Type	Beam distance	Clear water	Bedload	Driftwood	Deposition [m ³]	
						HQ 150	HQ 5
001	screen dam	10,5 mm				0,5213	0,5524
002	screen dam	10,5 mm				0,6018	0,7125
003	screen dam	15 mm				0,3398	0,2917
004	screen dam	15 mm				0,2421	0,2476
005	screen dam	15 mm				-	-
006	beam dam	10,5 mm				0,5879	0,6375
007	beam dam	10,5 mm				0,6203	0,7216
008	beam dam	15 mm				0,5417	0,4138
009	beam dam	15 mm				-	-
010	beam dam	15 mm				0,1879	0,1789

Table 4: Overview of the deposition volumes for the pear shaped basin. Each run consist of the HQ₁₅₀ and is followed by a HQ₅ design event.

Nr.	Type	Beam distance	Clear water	Bedload	Driftwood	Deposition [m ³]	
						HQ 150	HQ 5
011	screen dam	15 mm				0,3716	0,3536
012	screen dam	15 mm				0,4962	0,4023
013	screen dam	15 mm				-	-
014	screen dam	10,5 mm				0,6295	0,6278
015	screen dam	10,5 mm				0,5641	0,5852
016	beam dam	15 mm				0,2486	0,2023
017	beam dam	15 mm				0,4054	0,2773
018	beam dam	15 mm				-	-
019	beam dam	10,5 mm				-	-
020	beam dam	10,5 mm				0,6337	0,705
021	beam dam	10,5 mm				0,6379	0,7353

9.5.3 Sediment passing the dam and self-emptying

The sediment volumes that passed the check-dam are given in Table 5 and Table 6. The value given in column HQ₅ is the total volume that passed after Hq₁₀₀ and HQ₅. Finally the effect of self-emptying efficiency [%] due to the HQ₅ was calculated by:

$$\text{self - emptying efficiency} = \frac{\text{Total volume sediment passing} - \text{volume sediment passing HQ}_{100}}{\text{Total sediment volume} - \text{sediment deposition in the upstream reach}} * 100$$

Table 5: Sediment passing the check dam self-emptying for the elongated basin.

Nr.	Type	Beam distance	Clear water	Bedload	Driftwood	Sediment passing [m ³]		self-emptying after HQ 5 [%]
						HQ 150	HQ 5	
1	screen dam	10,5 mm				0,3582	0,4550	10
2	screen dam	10,5 mm				0,2777	0,2949	2
3	screen dam	15 mm				0,5397	0,7157	17
4	screen dam	15 mm				0,6374	0,7598	12
5	screen dam	15 mm				-	-	-
6	beam dam	10,5 mm				0,2916	0,3699	8
7	beam dam	10,5 mm				0,2592	0,2858	3
8	beam dam	15 mm				0,3378	0,5936	25
9	beam dam	15 mm				-	-	-
10	beam dam	15 mm				0,6916	0,8285	14

Table 6: Sediment passing the check dam self-emptying for the pear shaped basin.

Nr.	Type	Beam distance	Clear water	Bedload	Driftwood	Sediment passing [m ³]		self-emptying after HQ 5 [%]
						HQ 150	HQ 5	
11	screen dam	15 mm				0,5079	0,6538	14
12	screen dam	15 mm				0,3833	0,6051	22
13	screen dam	15 mm				-	-	-
14	screen dam	10,5 mm				0,2500	0,3796	13
15	screen dam	10,5 mm				0,3154	0,4222	11
16	beam dam	15 mm				0,6309	0,8051	17
17	beam dam	15 mm				0,4741	0,7301	25
18	beam dam	15 mm				-	-	-
19	beam dam	10,5 mm				-	-	-
20	beam dam	10,5 mm				0,2458	0,3024	6
21	beam dam	10,5 mm				0,2416	0,2721	3

9.5.4 Comparison of the different experimental runs

For further analyses comparable experiments were grouped to show the effect of the beam distance, shape of the deposition basin and effect of the dam type. Figure 7 shows the experiments with bedload added but without drift wood. The given volumes are the deposition in the storage area after the HQ₁₅₀ event. It can be seen, that without driftwood the deposition volume is controlled by the beam distance. The elongated basin results in less bedload deposition compared to the pear-shaped basin.

The experimental runs for the HQ₁₅₀ with bedload transport and added driftwood are shown in Figure 8. Compared to the experiments without driftwood slightly higher (on average) deposition volumes were recorded for the narrow beam distance of 10,5 mm. For the wider beam distance the deposition volumes are increased, but show a very high scatter. The high variability in the deposition behaviour can only be described by the chaotic and unpredictable clogging behaviour of the wood. The same effect was found in the pre investigation (TROJER 2013).

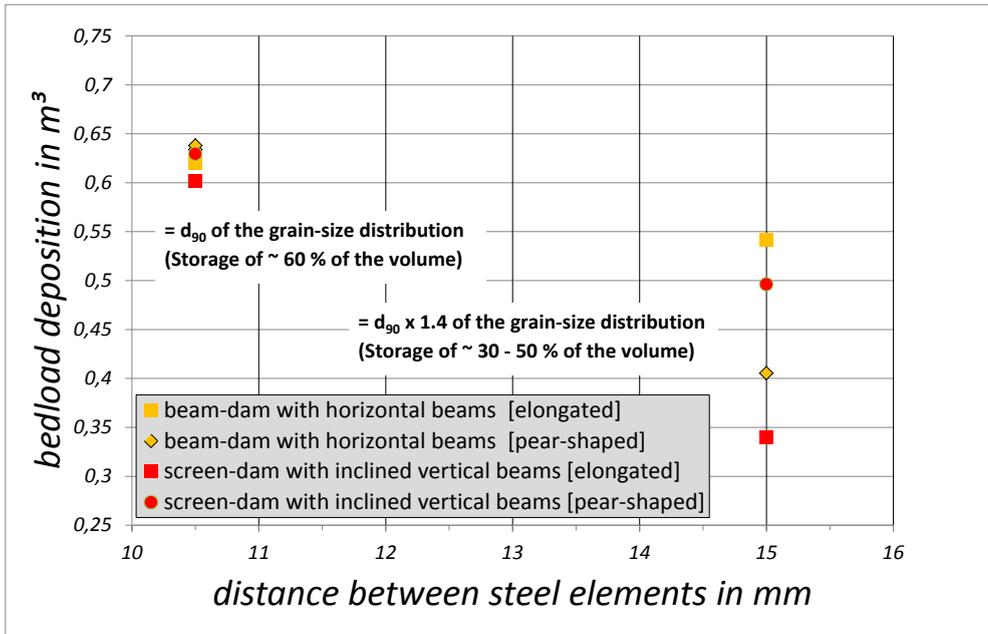


Figure 7: Experiments with bedload without drift wood. The volumes are given for the deposition basin.

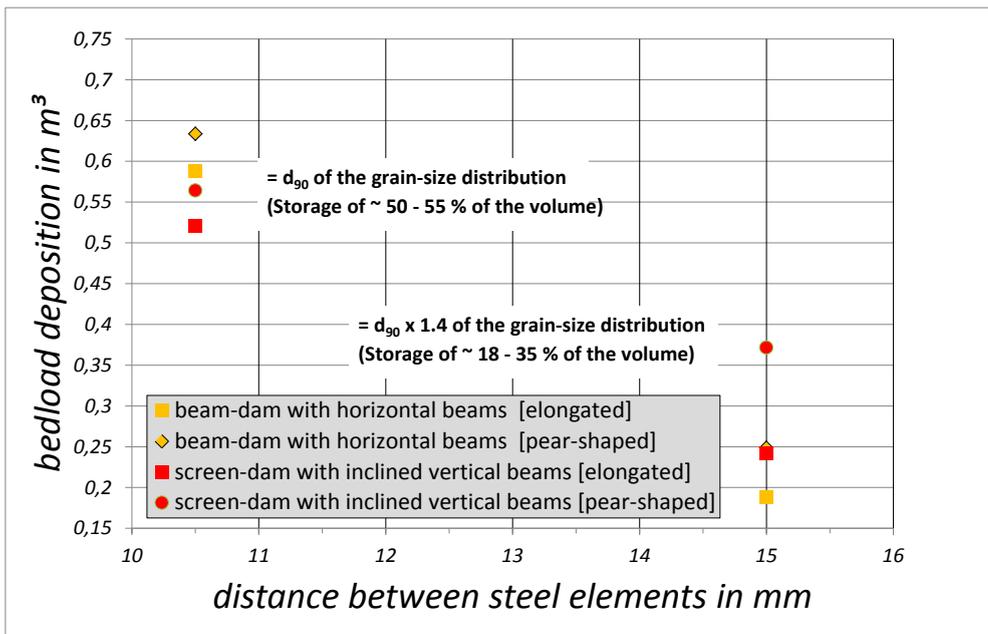


Figure 8: Experiments with bedload and drift wood [Nr. 2,3,7,8,12,14,17,21]. The volumes are given for the deposition basin.

The results have been further analysed concerning the possibility of self-emptying. Therefore the self-emptying efficiency has been calculated as described above and the rates are plotted against the beam distance. Figure 9 shows the results of the experiments without driftwood. Again, the beam distance controls the passing volume, but no effect of the shape of the deposition basin was found. The results for the experiments with additional driftwood are shown in Figure 10. It has to be reminded, that the driftwood has been removed in-between the HQ_{100} and HQ_5 . The data with driftwood show a higher scatter. The efficiency

of the experiments with the wider beam distance seems to be higher, but this can be attributed to the fact, that during the HQ₁₀₀ more sediment has been trapped.

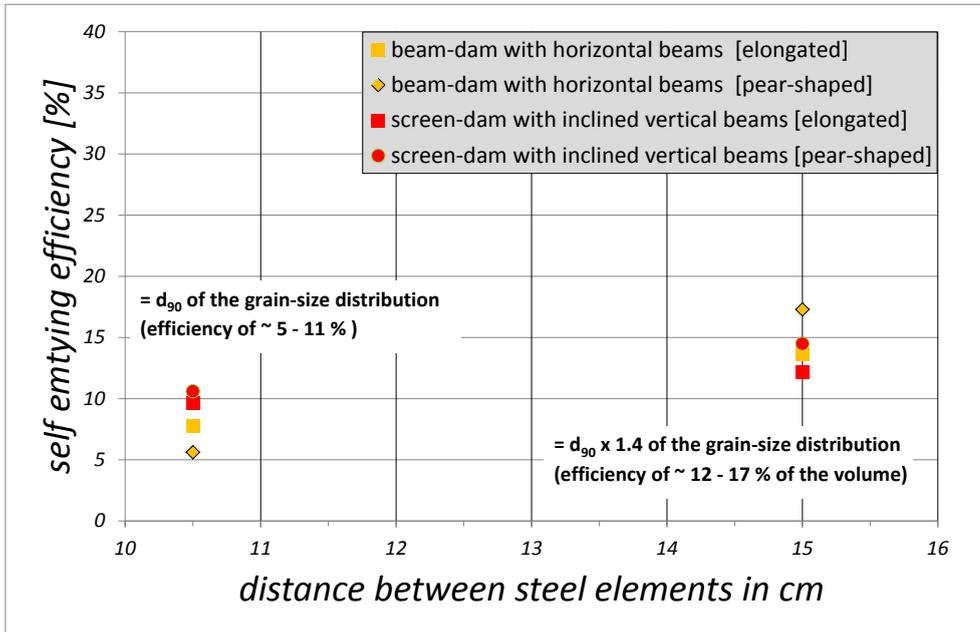


Figure 9: Self-emptying efficiency for the experiments with bedload without drift wood.

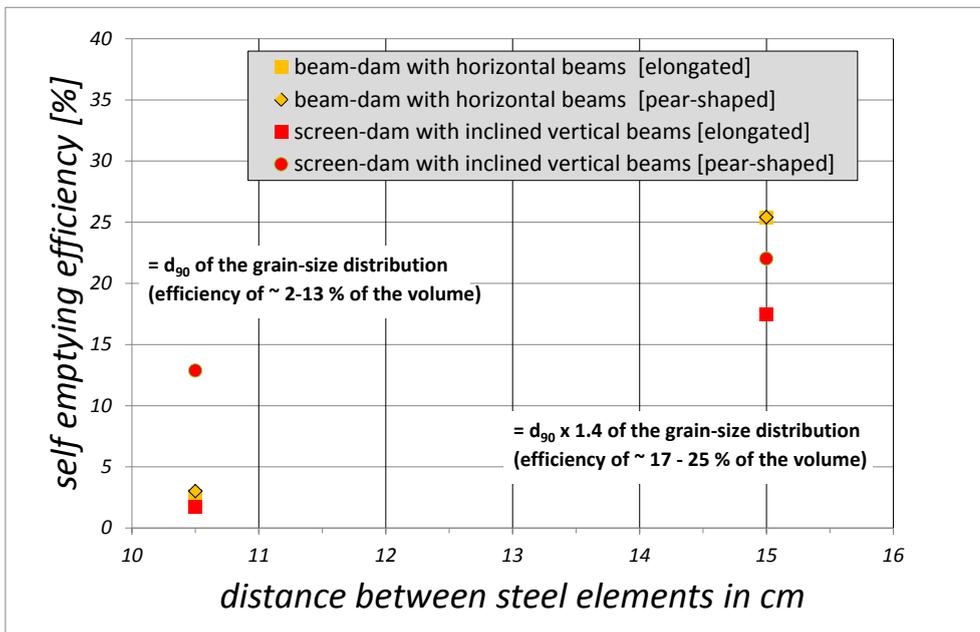


Figure 10: Self-emptying efficiency for the experiments with bedload without drift wood.

9.5.5 Grain sorting

Grain-size distributions were analysed in the deposition area and from the passing sediment. No grain sorting effect was found. In a statistical sense there has not been a difference between the deposited and transported sediment. This can be explained by the function of the dams. Deposition did not start at the dam (no mechanical sorting due to the openings). All depositions started due to the reduced transport capacity at the inlet of the deposition area. Two effects play a major role: reduced transport energy due to the milder slope in the basin and widening which results in smaller flow depth.

9.6 Conclusions and Recommendations

The actual project and the pre-investigations showed that the deposition during the experiments was not controlled by sorting-effects at the location of the dam. The deposition always started from upstream, where the transport capacity was reduced due to the milder slope and the widening of the basin. No grain sorting effects could be identified. Finally it can be stated:

1. The deposition volume can be controlled by the beam distance if there is no driftwood.
2. The pear shaped basin resulted in higher deposition than the elongated basin.
3. Driftwood causes clogging of the dam and therefore higher deposition of bedload material.
4. Due to the chaotic behaviour of the log jams, driftwood causes a higher variability in the deposition behaviour.
5. Driftwood often causes log jams at the filter structure and therefore increases the trapping efficiency for bedload material. Beam dams with horizontal beams produce worse log jams than screen dams with inclined vertical beams. This effect is shown in Figure 11.
6. Even if the log-jams are removed, the self-emptying efficiency is limited. No statistically significant shape or filter structure type effect could be proofed.



Figure 11: Different clogging behaviour of the dam types.

9.7 References

- HAINZER, D. (2013). Geschiebemanagement Schöttelbach. Wien: Diplomarbeit, Institut für alpine Naturgefahren.
- HAMPEL, R. (1968). Geschiebealagerung in Wildbächen dargestellt in Modellversuchen. Zeitschrift des Vereins der Diplomingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung Österreichs.
- HAMPEL, R. (1974). Die Wirkungsweise von Wildbachsperrren. Zeitschrift des Vereins der Diplomingenieure der Wildbach - und Lawinenverbauung Österreichs.
- TROJER, M. (2013). Optimierung von Filtersperrren durch physikalische Modellversuche, Wien: Diplomarbeit, Institut für alpine Naturgefahren.
- SETZNAGEL, R. (1989). Modellversuche mit Wildbachsperrren. Wien: Diplomarbeit, Institut für Wildbach und Lawinenverbauung.
- STINY, J. (1917). Versuche über Schwemmkegelbildung. Geologische Rundschau .
- WANG, F. (1901). Grundriss der Wildbachverbauung. Leipzig: Verlag S. Hirzel.
- ZOLLINGER, F. (1983). Die Vorgänge in einem Geschiebeablagerungsplatz - Ihre Morphologie und die Möglichkeiten einer Steuerung. Zürich, Dissertation ETH Zürich: ADAG Administration und Druck AG.