

Hydraulische Rauheit von geotextilen Matten

Physikalische und numerische Untersuchungen

Jan Derksen

Abstract

The objective of the present study is to determine the hydraulic roughness of geosynthetic concrete mattresses as a basis for the design in practice-oriented applications. For this purpose, a hybrid model approach is used, that combines physical model tests and numerical modelling. The skin and form roughness of full-scale uniform mattresses is investigated in the laboratory flume of the Institute of Hydraulic Engineering and Water Resource Management at RWTH Aachen University. The experimental tests provide a data base to calibrate and validate a numerical model in order to analyse the influence of the geosynthetic mattress shape on the hydraulic roughness. As a result, the hydraulic roughness of geotextile mattresses is quantified. Moreover, the simulation outcome demonstrates the capability of the numerical model to describe the flow processes in the flume considerably good.

Zusammenfassung

Die vorliegenden Untersuchungen verfolgen das Ziel einer Quantifizierung der hydraulischen Rauheit von geotextilen Matten als Bemessungsgrundlage für anwendungsbezogene Fragestellungen. Hierzu wird ein hybrider Modellansatz bestehend aus physikalischen Modellversuchen und weiterführender numerischer Modellierung gewählt. In der Kipprinne des Institutes für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der RWTH Aachen University werden die Oberflächen- und Formrauheit einer definierten gleichförmigen geotextilen Matte auf experimenteller Basis realmaßstäblich bestimmt. Zugleich stellen die Ergebnisse eine geeignete Datengrundlage zum Aufbau eines numerischen Modells dar. Dieses Modell wird nach erfolgreicher Kalibrierung und Validierung für eine geometrische Variantenstudie der Betonmattenform genutzt, um den Einfluss der geotextilen Mattenform auf die Formrauheit zu analysieren.

1 Problemstellung und Zielformulierung

Der ingenieurwissenschaftliche Anspruch einer nachhaltigen, technisch ausgereiften und zugleich wirtschaftlichen Bemessung von Ingenieurbauten setzt die Kenntnis der maßgebenden Einflussgrößen voraus. Die Bemessung neuer Freisiegelgerinne und die Überprüfung der Leistungsfähigkeit bestehender Gerinne sind typische Aufgaben im Tä-

tigkeitsfeld des Wasserbauingenieurs. Hierbei ist die Abhängigkeit geometrischer (Gerinnequerschnitt, Sohlneigung, Rauheit) und hydraulischer (Abfluss, Wasserstand) Zielgrößen zu berücksichtigen. In der dargestellten Bemessungssituation wird der Abfluss Q in dem Trapezquerschnitt mit der Sohlneigung I abgeführt. Unter der Annahme einer hydraulischen Sohlrauheit k_{st} stellt sich die Fließtiefe h ein. Eine Unterschätzung der tatsächlichen Systemrauheit um den Betrag Δk_{st} resultiert in einem Anstieg der Wasserspiegellage um Δh .

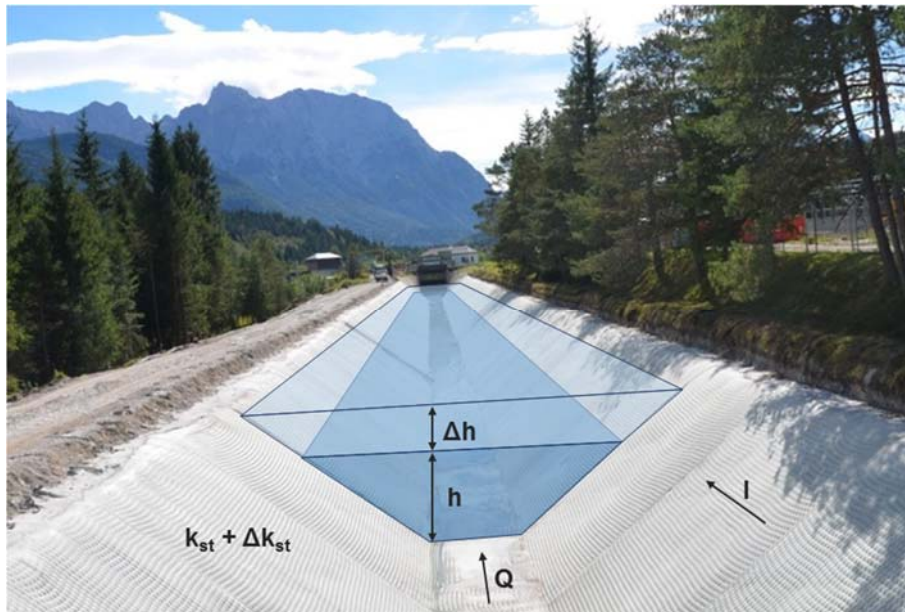


Abb. 1: Schematische Darstellung der Problemstellung (Foto: Huesker, 2015)

Schließlich ist die Kenntnis der hydraulischen Gerinnerauheit unbedingt notwendig, um den Bemessungsabfluss sicher abführen zu können und die Gefährdung von Sachgütern, Leib und Leben durch Überströmung der Gerinnekrone zu verhindern. Der Stellenwert einer zuverlässigen Kenntnis des Wasserstandes und des abführbaren Durchflusses eines Freispiegelgerinnes wird insbesondere bei der Betrachtung eines Hochwasserszenarios ersichtlich und verdeutlicht zugleich die Relevanz der Themenformulierung.

Die Untersuchungen verfolgen das Ziel, die hydraulische Rauheit von geotextilen Betonmatten als Bemessungsgrundlage für praxisrelevante Anwendungen zu bestimmen. Neben der Quantifizierung der Oberflächen- und Formrauheitsanteile besteht Interesse an dem Einfluss der Mattenform auf den Fließwiderstand. Hierzu wird eine geeignete wasserbauliche methodische Vorgehensweise konzipiert, durchgeführt und ausgewertet.

2 Methodische Vorgehensweise

Für die Beantwortung wasserbaulicher Fragestellungen werden in Forschung und Praxis gleichermaßen Naturmessungen, physikalische Modellversuche, theoretische Ansätze, numerische Verfahren oder eine Kombination der genannten Methoden herangezogen. Insbesondere physikalische Modellversuche erfüllen die Anforderung an eine möglichst realitätsnahe und erfassbare Abbildung der zu simulierenden Zustände oder Strömungsvorgänge (Kobus 1984). Hingegen werden numerische Modelle aufgrund ihrer Reproduzierbarkeit unter variablen Randbedingungen insbesondere für Variantenstudien und als Prognosewerkzeug eingesetzt (Schüttrumpf 2014).

Zur Ermittlung der hydraulischen Rauheit von geotextilen Betonmatten wurde ein hybrider Modellansatz bestehend aus physikalischen Modellversuchen und weiterführenden numerischen Methoden gewählt. Folglich werden die Vorteile der beiden Ansätze miteinander kombiniert und Synergien genutzt, indem die belastbaren und praxisnahen Ergebnisgrößen experimentellen Untersuchungen zum Aufbau eines variablen numerischen Modells verwendet werden.

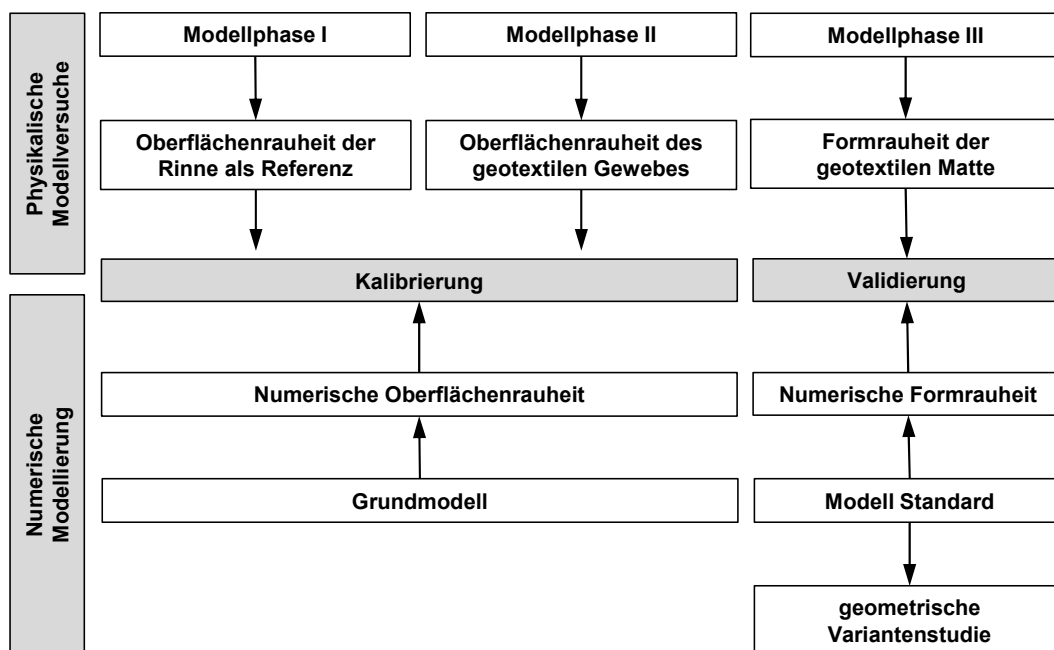


Abb. 2: Hybrider Modellansatz zur Untersuchung der hydraulischen Rauheit

3 Geotextile Matten

Geotextile Matten bestehen aus zwei Gewebelagen, die durch Stegbänder oder Abweibungen in definierter Anordnung miteinander verbunden sind. Der Hohlraum zwischen den Gewebelagen wird mit Ortbeton befüllt. Folglich fungieren die äußeren Gewebelagen als formgebendes Schalungssystem. Die Dicke und Formstruktur der geotextilen

Betonmatte variiert in Abhängigkeit der Länge und Anordnung der Stegbänder beziehungsweise Abwebungen.

Die Anwendungsbereiche von geotextilen Betonmatten reichen von Auskleidung von Kanälen, Gerinnen, Deichscharten und Becken über Deckwerke bis hin zu rohrummantelnden Auftriebssicherungen. Damit werden im Wesentlichen die Funktionen der Erosionsstabilität und Abdichtung erfüllt.

In Abhängigkeit der zu erfüllenden Funktion werden die Matteneigenschaften der Dicke, Durchlässigkeit, hydraulischen Rauheit und des Scherwiderstandes maßgebend, wodurch eine Vielfalt von Mattentypen entstanden ist (Pilarczyk 2007).

- **Gleichförmige Matten** weisen durch eine regelmäßige Anordnung der Stegbänder gleicher Länge eine vergleichsweise glatte Formstruktur auf.
- **Filterpunktmatten** ermöglichen im Bereich der Filterpunkte den Wassertransport durch die ansonsten wasserundurchlässige geotextile Matte.
- **Crib Matten** bestehen aus miteinander verbundenen zylindrischen betongefüllten Kanälen mit dazwischenliegenden wasserdurchlässigen Bereichen.
- **Flexible Matten** sind in mit durchgehenden Filterpunktstreifen oder Sollbruchstellen in Kissen unterteilt und sind aufgrund des Anpassungsvermögens des Mattensystems für den Einsatz auf setzungsempfindlichem Untergrund geeignet.

4 Physikalische Modellversuche

Die Zielsetzung der physikalischen Modellversuche ist die quantitative Bestimmung der hydraulischen Rauheit von gleichförmigen geotextilen Matten auf experimenteller Basis. Zudem liefern die experimentellen Untersuchungen eine geeignete Datengrundlage für die numerische Modellierung. Daraus folgt die Anforderung, die Rauheit und deren beeinflussende physikalischen Prozesse im Modell realitätsnah abzubilden.

4.1 Konzeption der experimentellen Untersuchungen

Die physikalischen Modellversuche wurden im Naturmaßstab durchgeführt, um eine direkte Übertragbarkeit der geometrischen, kinematischen und dynamischen Größen in die Natur zu ermöglichen. Demnach sind aufgrund der vollen dynamischen Ähnlichkeit keine Modellgesetze anzuwenden und Maßstabeffekte zu erwarten. Die experimentellen Untersuchungen in der Kiprinne des IWW gliedern sich in drei Modellphasen, die sich in der Ausprägung der Rinnensohle unterscheiden und der Ermittlung der Oberflächen- und Formrauheit der geotextilen Matten dienen.

Da Modellphase I (MP I) den Referenzfall für die darauffolgenden Modellkonfigurationen darstellt, bleibt die mit glatten Kunststoffplatten bestehende Sohle der Kiprinne unverändert. In der zweiten Modellphase II (MP II) wird die Sohle der Kiprinne flächig mit

dem geotextilen Gewebe ausgekleidet, um die Oberflächenrauheit des Systems zu ermitteln. Daraufhin wird das flächige Gewebe durch gefüllte geotextile Matten ersetzt, wodurch in der dritten Modellphase III (MP III) die Formrauheit quantifiziert wird.

4.2 Modellaufbau

Für die erste Modellphase werden keine Um- und Einbauten an der Rinne vorgenommen. In der zweiten Modellphase wird das geotextile Gewebe im Ein- und Auslaufbereich und am Rinnenrand fixiert, um eine Unterströmung des Gewebes während der Versuchsdurchführung zu unterbinden und damit die Lagestabilität sicherzustellen.



Abb. 3: Finaler Modellaufbau in der zweiten und dritten Modellphase

In der dritten Modellphase werden im Messbereich der Kipprinne insgesamt acht geotextile Mattenelemente ($0,90 \times 3,00 \times 0,11$ [m]) eingebaut. Zunächst werden die geotextilen Gewebeelemente werksseitig vorkonfektioniert und innenliegend mit einem Transportankersystem versehen. Daraufhin werden die Elemente mit einem fließfähigen Beton von einem Betonmischer und -pumpe, über Schlauchsystem und Einfüllstutzen befüllt. Nach dem Erreichen einer ausreichenden Betonfestigkeit werden die hergestellten geotextilen Mattenelemente nacheinander in die Kipprinne eingehoben. Abschließend werden die Mattenstöße und Übergänge zum Rinnenrand an die geotextile Mattenform angepasst.

4.3 Messtechnik

Die Auswertung der experimentellen Untersuchungen hinsichtlich der hydraulischen Rauheit erfordert die Kenntnis der Fließtiefe h und der vertikalen Fließgeschwindigkeitsverteilung $u(z)$ bei einem stationären Abfluss Q .

In dem 25,80 m langen Messbereich der Kipprinne werden drei Querschnitte zur Aufnahme der Messgrößen in Rinnenmitte definiert. Die Bestimmung der Fließtiefe erfolgt über die Messung des lagenbezogenen Wasserspiegels mit Hilfe von Ultraschallmess-

sonden. Die Fließgeschwindigkeiten werden mit einem ADV Messgerät (Acoustic Doppler Velocimeter) aufgenommen. Zur Erfassung und Kontrolle der stationären Abflussverhältnisse während der Versuchsdurchführung wird ein magnetisch-induktives Durchflussmessgerät verwendet.

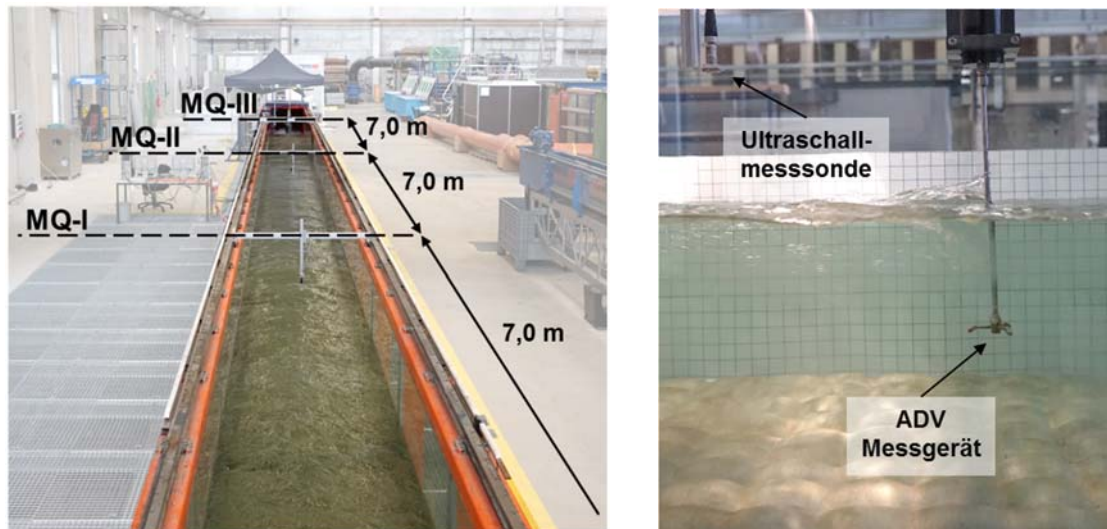


Abb. 4: Messung der Fließgeschwindigkeit und der Fließtiefe in den Messquerschnitten I, II und III

4.4 Versuchsprogramm und -durchführung

Das Versuchsprogramm beschreibt die Konfiguration der Eingangsgrößen in den drei Modellphasen indem folgende Größen variiert und damit unterschiedliche Fließtiefen und Fließgeschwindigkeitsverteilungen auf der Messstrecke erzeugt wurden:

- Durchfluss Q {200; 300; 400} [l/s]
- Neigung der Kipprinne I {0,0000; 0,0005; 0,0010; 0,0020} [-]

Zu Beginn der Versuche wurde ein stationärer Strömungszustand eingestellt und geprüft, dass keine zeitliche Varianz des Durchflusses und der Wasserspiegellagen in den drei Messquerschnitten vorliegt. Daraufhin werden die vertikalen Geschwindigkeitsverteilungen zwischen der Sohle und dem freien Wasserspiegel durch Messung der Fließgeschwindigkeiten in definierten relativen Fließtiefen ($z/h = 0,03; 0,10; 0,20; 0,30; 0,60$) der drei Messquerschnitte entlang der Kipprinnenlängsachse aufgenommen.

4.5 Versuchsauswertung

Die Rauheitswerte der jeweiligen Modellphasen wurden auf Grundlage von zwei unabhängigen Methoden ermittelt und anschließend ineinander überführt und verglichen. Hierfür werden zum einen die äquivalenten Sandrauheiten aus den vertikalen Geschwin-

digkeitsprofilen abgeleitet und zum anderen die Widerstandswerte nach den Fließformeln bestimmt. Diese Auswertung wurde auf insgesamt 27 Datensätze je Modellphase angewendet.

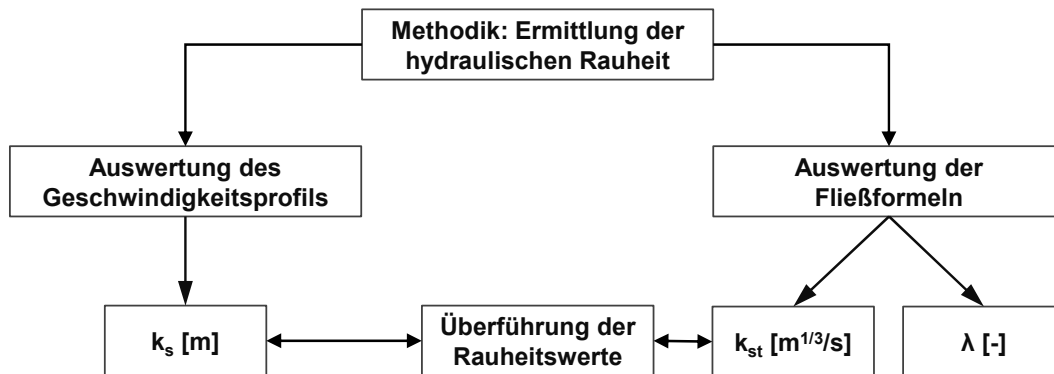


Abb. 5: Methoden zur Ermittlung der hydraulischen Rauheit

Die in den Fließformeln formulierte Beziehung zwischen mittlerer Fließgeschwindigkeit, hydraulischem Radius und Energiegefälle in Abhängigkeit des Fließwiderstandsbeiwertes ermöglicht eine direkte quantitative Auswertung der hydraulischen Rauheit. Allerdings ist der Seitenwandeneinfluss aufgrund der über den benetzten Umfang ungleichmäßigen Verteilung der Rauheit zu berücksichtigen.

Die Ermittlung der äquivalenten Sandrauheit aus den gemessenen vertikalen Geschwindigkeitsprofilen erfolgt über die Bestimmung des theoretischen Nullpunktes der logarithmischen Geschwindigkeitsverteilung. Der Sohlabstand z_0 steht folglich in einem funktionalen Zusammenhang zur Wandbeschaffenheit und wird für hydraulisch raue Strömungen in eine äquivalente Sandrauheit k_s überführt.

4.6 Ergebnisse

Der Vergleich der aus den drei Messquerschnitten konstruierten Wasserspiegellagen der Modellphasen I, II und III visualisiert qualitativ die Auswirkungen unterschiedlicher Sohlrauheiten. Mit zunehmender Systemrauheit erhöht sich gemäß den Fließformeln die Wasserspiegellage, wohingegen die mittlere Fließgeschwindigkeit entsprechend der Kontinuitätsbeziehung verringert wird.

Die Eignung der logarithmischen Geschwindigkeitsverteilung für turbulente Gerinneströmungen zur Beschreibung der im physikalischen Versuch gemessenen vertikalen Geschwindigkeitsprofile wird durch deren qualitativen Verlauf deutlich.

Der Reibungseinfluss der Rinnenwände auf die gemessenen vertikalen Geschwindigkeitsprofile in Rinnenmitte wird durch die Betrachtung der horizontalen Verteilungsfunktion der Fließgeschwindigkeit als vernachlässigbar nachgewiesen, wodurch eine Übertragbarkeit der ermittelten äquivalenten Sandrauheiten auf breite Gerinne zulässig ist.

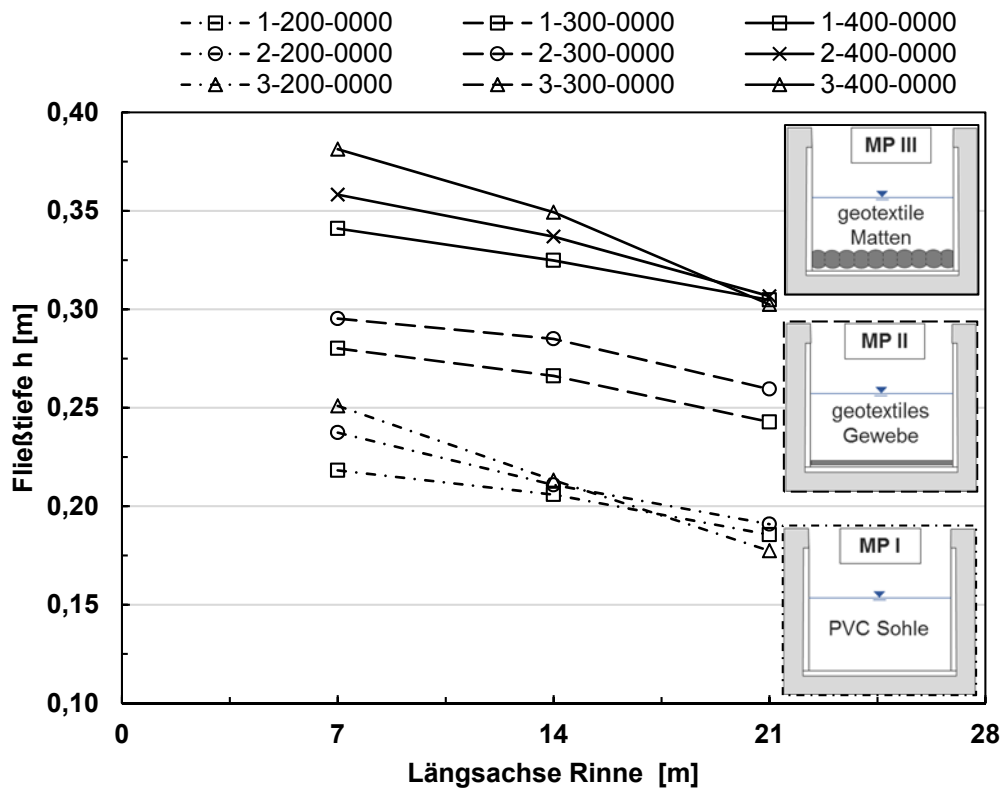


Abb. 6: Wasserspiegellagen entlang der Kipprinne unter Variation des Durchflusses (200, 300, 400 l/s)

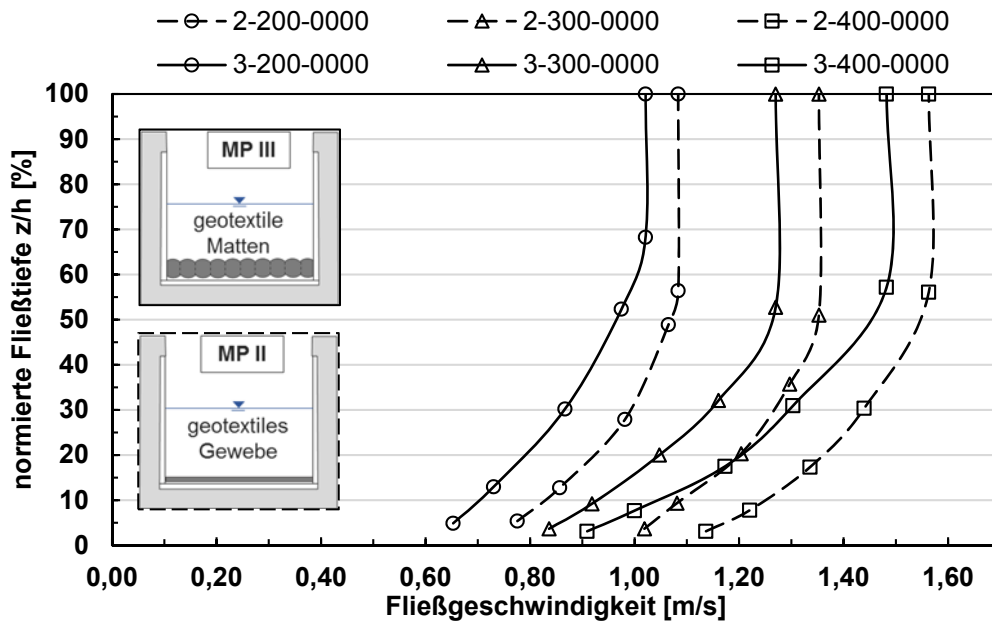


Abb. 7: Vertikale Geschwindigkeitsprofile unter Variation des Durchflusses (200, 300, 400 l/s)

Die Rauheitswerte der ausgewerteten experimentellen Untersuchungen zeigen eine geringe Streuung um die Mittelwerte der jeweiligen Modellphasen, wodurch die Konsistenz der Rauheitsbestimmung deutlich wird.

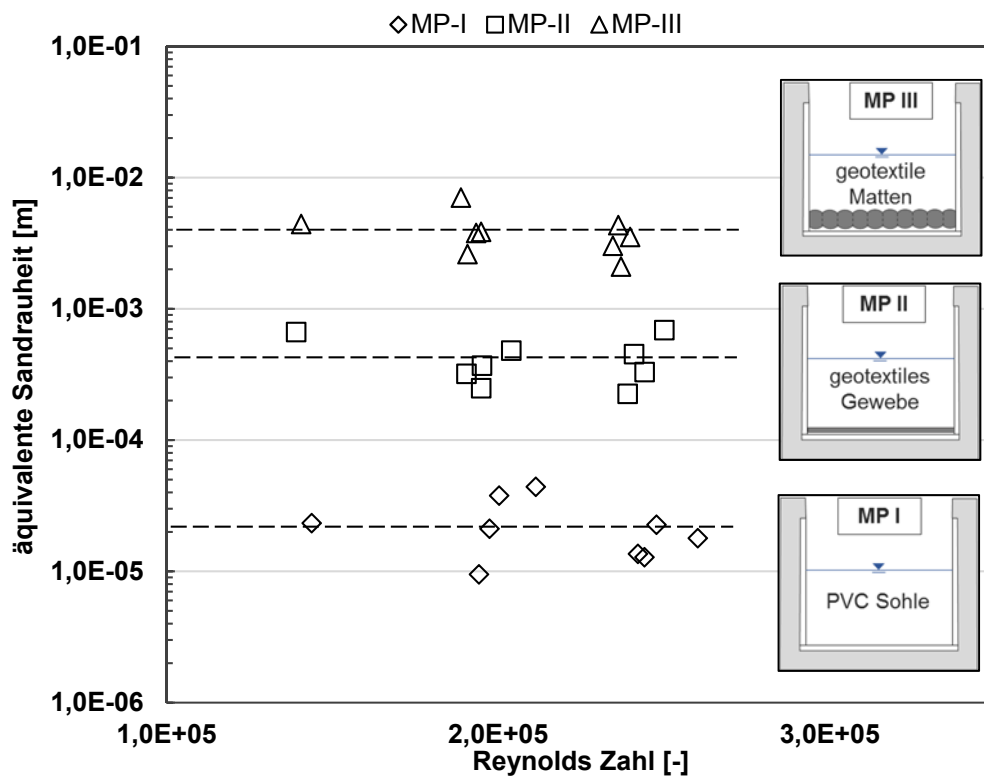


Abb. 8: Hydraulische Rauheiten in den Modellphasen I, II und III

Ein Vergleich der aufgezeigten methodischen Ansätze zur Ermittlung der hydraulischen Rauheit wird durch Überführung der äquivalenten Sandrauheiten k_s und Fließwiderstände nach Strickler k_{st} ineinander möglich. Hierbei liefert die Auswertung der Geschwindigkeitsprofile überwiegend geringfügig reduzierte äquivalente Rauheitshöhen als die aus den Fließformeln überführten Werte.

Der wesentliche Unterschied der Auswertungsmethoden wird durch die Bedeutung der jeweiligen Rauheitswerte ersichtlich. Während die äquivalente Sandrauheit eine absolute Rauheitshöhe in [m] darstellt, ist der dimensionsbehaftete Strickler Beiwert [$m^{1/3}/s$] als Rechengröße zu interpretieren. Die Schwäche der Ermittlung der hydraulischen Rauheit auf Basis der Fließformeln besteht in deren Abhängigkeit von den Strömungsverhältnissen und der Querschnittsform des Gerinnes, in der diese ermittelt wurden. Folglich ist eine Übertragbarkeit auf abweichende Bedingungen nur eingeschränkt möglich. Zudem ist die Berücksichtigung des Reibungseinflusses der Kipprinnenwände durch Korrekturverfahren notwendig. Im Gegensatz dazu ist die Ableitung der äquivalenten Sandrauheit aus den aufgenommenen Geschwindigkeitsprofilen unbeeinflusst von der Gerinneform und unterschiedlichen Sohl- und Wandrauheiten. Damit liefert dieser methodische Ansatz eine universell anwendbare Rauheitsgröße, die nach Bedarf in einen Strickler Beiwert als Rechengröße überführt werden kann. Folglich wird diese Auswertungsmethode zur Beschreibung der hydraulischen Rauheit empfohlen.

Die Gesamtrauheit der geotextilen Matten setzt sich anteilig aus der Oberflächen- und Formrauheit zusammen. Die Formrauheit der geotextilen Matten resultiert aus der in Modellphase III ermittelten Gesamtrauheit des Systems abzüglich des Oberflächenanteils des geotextilen Gewebes (Modellphase II). Die Gesamtrauheit wird maßgeblich durch den Anteil der Formrauheit bestimmt, wohingegen die Oberflächenrauheit einen vergleichbar geringen Rauheitsanteil beiträgt.

5 Numerische Modellierung

Auf Grundlage der Erkenntnisse aus den physikalischen Modellversuchen werden weiterführende Untersuchungen zur hydraulischen Rauheit mithilfe numerischer Simulationen durchgeführt. Die numerische Strömungssimulation (CFD = Computational Fluid Dynamics) stellt eine mathematische Beschreibung von Strömungsbewegungen dar, die mit numerischen Methoden gelöst werden (Martin 2011).

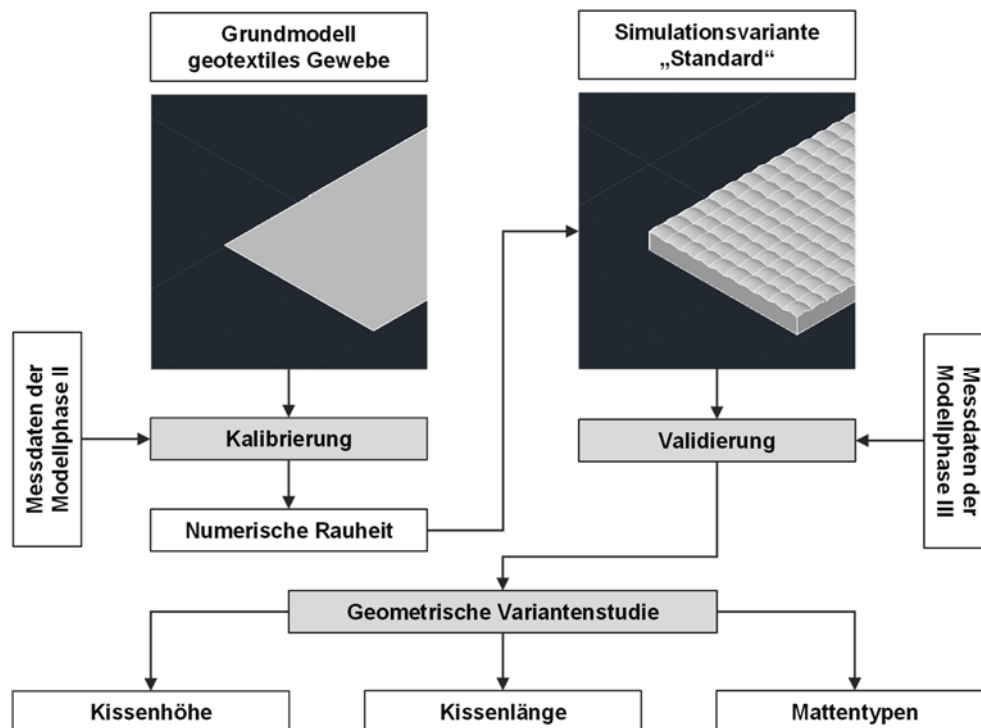


Abb. 9: Konzeption der numerischen Simulationen

Hierzu wird ein numerisches Rinnenmodell mit dem Softwarepaket OpenFOAM aufgebaut, das die physikalischen Prozesse der Versuche abbildet (OpenFOAM Foundation Ltd. 2015). Ein numerisches Grundmodell bildet die zweite Modellphase der physikalischen Modellversuche mit geotextilem Gewebe ab. Die numerische Sohlrauheit dient als Kalibrierungsgröße, um die Wasserspiegellage der experimentellen Untersuchungen abzubilden. Daraufhin wird die Sohle des Grundmodells durch eine Geometrie entspre-

chend der experimentell untersuchten geotextilen Matten ersetzt und mit der zuvor ermittelten numerischen Sohlrauheit versehen. Diese Simulationsvariante ermöglicht eine Validierung des numerischen Modells auf Grundlage der Messdaten aus den physikalischen Modellversuchen der dritten Modellphase. Schließlich werden im kalibrierten und verifizierten numerischen Modell unterschiedliche Sohlgeometrien implementiert. Die Zielsetzung der geometrischen Variantenstudie ist die Analyse des Einflusses der geotextilen Mattenform auf die hydraulische Rauheit.

Die durchgeführten Simulationen bilden den Füllprozess der Rinne mit dem einströmenden Fluid bis zum Erreichen eines stationären Abflusszustandes ab. Folglich wird ein ganzheitlicher Vergleich der physikalischen Prozesse in Experiment und Simulation und dadurch eine Plausibilitätsprüfung ermöglicht.

5.1 Pre- und Post-Processing

Das Pre-Processing beinhaltet den Aufbau des Simulationsmodells der Kipprinne im Realmaßstab ($1 \times 1 \times 29$ [m]) bestehend aus Erstellung der Modellgeometrie, Generierung des numerischen Rechengitters und Definition der geometrischen, hydraulischen und numerischen Rand- und Anfangsbedingungen.

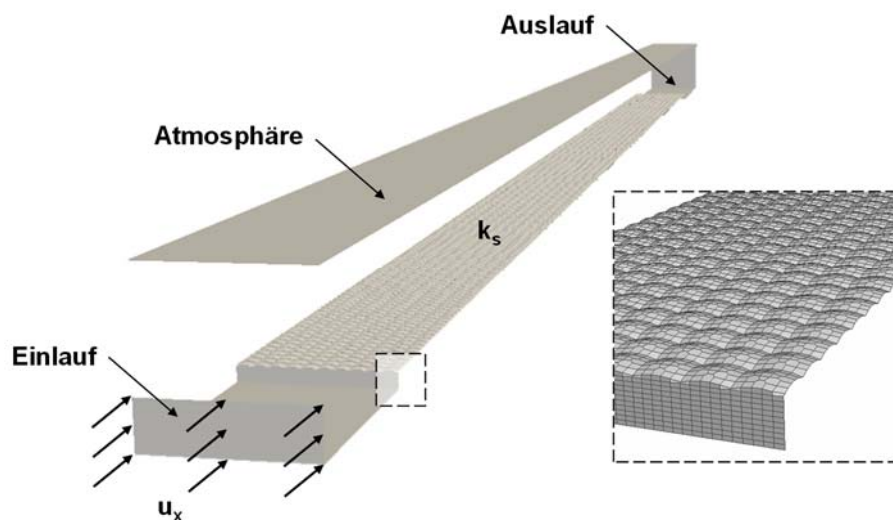


Abb. 10: Konzeption der numerischen Simulationen

Das numerische Modell mit ebener Sohle ist durch eine in Rinnenlängsachse gerichtete Hauptströmung charakterisiert. Demzufolge wird eine ausreichende räumliche Diskretisierung mit vergleichsweise geringer Zellenanzahl erzielt. Hingegen weist das numerische Modell zur Nachbildung der geotextilen Matten kleinräumige dreidimensionale Sohlstrukturen auf, welche die Strömungskomponenten in alle Raumrichtungen beeinflussen. Folglich wird das numerische Rechengitter insbesondere in Sohlnähe mit einer deutlich erhöhten räumlichen Auflösung diskretisiert.

Die Anfangs- und Randbedingungen werden an den Modellrändern und im numerischen Berechnungsgitter definiert. Als Ausgangsgrößen werden der Wasserstand, die Fließgeschwindigkeit, der Druck und das Turbulenzmodell vorgegeben. Am Einlauf der Rinne wird eine konstante Fließgeschwindigkeit in Rinnenlängsachse festgelegt, die sich nach der Kontinuitätsbeziehung aus dem abzubildenden Durchfluss und der Fläche des Einlaufes ergibt. Die Einlaufgeschwindigkeit der numerischen Modelle folgt aus den vergleichbaren experimentellen Untersuchungen. In den numerischen Modellen wird die Turbulenz durch das Standard k - ϵ -Modell als Wirbelviskositätsmodell der RANS (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes Modelle) Modelle implementiert. An den wasserundurchlässigen Wandungen wurde die Fließgeschwindigkeit entsprechend der Haftbedingung zu Null angenommen. Die hydraulische Rauheit der Rinnensohle und -wände wird in Form einer äquivalenten Sandrauheit definiert.

Die Zeitschrittweite zu Beginn der Simulation wurde nach der maximalen Courant Zahl in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit am Einlaufquerschnitt ermittelt. Durch Aktivierung der adaptiven Zeitschrittanpassung wird der Zeitschritt im weiteren Simulationsverlauf nach den jeweilig vorliegenden Strömungsgrößen angepasst.

Schließlich wird die Gerinneströmung als inkompressible Zwei-Phasen-Strömung aus Wasser und Luft abgebildet und mit dem Gleichungslöser auf Grundlage der Finite-Volumen Methode gelöst.

Die Nachbereitung der numerischen Berechnungen umfasst die Visualisierung, Analyse und Auswertung der Simulationsergebnisse. Die Bearbeitung und Ausgabe der Rohdaten erfolgt in visueller und tabellarischer Form über das Softwaretool ParaView. Da die Auswertung der numerischen Simulationsergebnisse auf eine Vergleichbarkeit mit den physikalischen Modellversuchen abzielt, sind insbesondere die Wasserspiegellage entlang der Kipprinnenlängsachse und die vertikalen Geschwindigkeitsverteilungen an den drei Messquerschnitten von Interesse.

5.2 Kalibrierung des numerischen Modells

In einem iterativen Prozess werden die Oberflächenrauheiten der Rinnensohle und des geotextilen Gewebes als numerische äquivalente Sandrauheiten im Grundmodell ermittelt, die eine vergleichbare Wasserspiegellage im physikalischen Modellversuch und numerischer Simulation hervorruft.

Allerdings ist diese Größe als theoretische Rauheitshöhe zu interpretieren, die für die Anfangs- und Randbedingungen des aufgebauten numerischen Modells gilt. Der Wert enthält die Berücksichtigung der spezifischen Modelleffekte und ist daher nicht universell übertragbar.

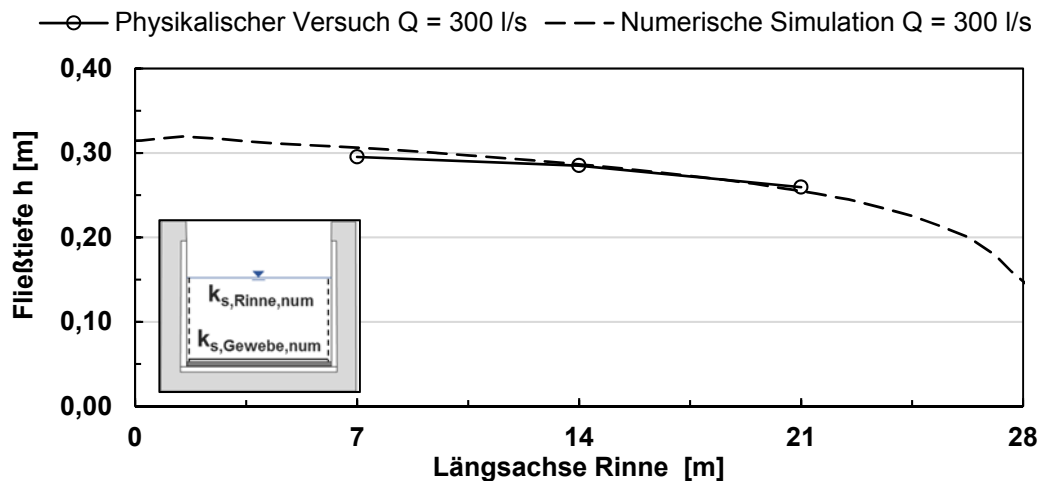


Abb. 11: Vergleich der gemessenen und simulierten Wasserspiegellagen im kalibrierten Modell

Die Nachbildung der gemessenen Wasserspiegellagen unter der Variation der hydraulischen Randbedingung des Durchflusses verifiziert das kalibrierte Grundmodell. Aus dem Vergleich der Wasserspiegellagen des physikalischen und des numerischen Modells geht die qualitative und quantitative Abbildbarkeit der leicht ungleichförmigen Strömung in der Kiprinne hervor.

5.3 Validierung des numerischen Modells

Das numerische Grundmodell wird um die dreidimensionale Formstruktur der geotextilen Matten an der Rinnensohle erweitert und mit der numerischen Oberflächenrauheit des geotextilen Gewebes versehen. Dieses Modell unterscheidet sich ausschließlich in der geometrischen Ausbildung der Sohle von dem Grundmodell, wohingegen die zuvor definierten Rand- und Anfangsbedingungen bestehen bleiben. Damit wird der Einfluss von Oberflächen- und Formanteilen an der hydraulischen Rauheit berücksichtigt, wodurch eine Vergleichbarkeit mit den physikalischen Modellversuchen der dritten Modellphase erreicht wird.

Die Plausibilität der Modellkonzeption wird durch die Abbildung der physikalischen Prozesse während der Rinnenfüllung bestätigt, die gleichermaßen aus dem Vergleich der Wasserspiegellagen der numerischen Simulation und des physikalischen Experimentes folgen.

Die numerische Überschätzung der hydraulischen Formrauheit und die daraus folgenden erhöhten simulierten Fließtiefen sind auf die ideelle Abbildung der Formstruktur der geotextilen Matten in der numerischen Modelbildung zurückzuführen. Die räumliche Diskretisierung der Kissenform bildet eine idealisierte gleichförmige geotextile Mattenform ab, die im realen Befüllungsvorgang nicht flächendeckend erzielt wird. Demzufolge wird eine höhere hydraulische Formrauheit im numerischen Modell implementiert, wodurch vergleichsweise größere simulierte Fließtiefen resultieren.

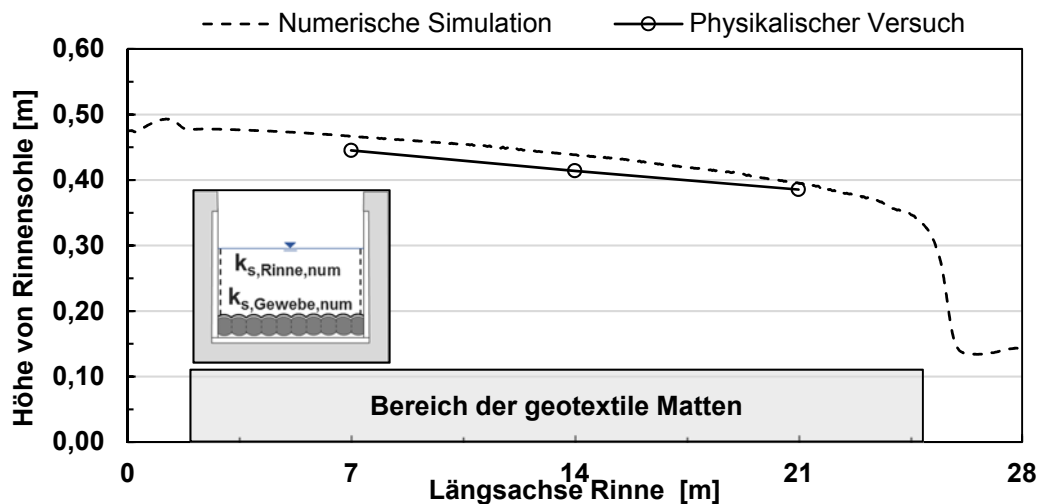


Abb. 12: Vergleich der Wasserspiegellagen im numerischen und physikalischen Modell

Dennoch verdeutlicht der Vergleich der physikalischen und numerischen Ergebnisse die qualitative Abbildbarkeit der relevanten Strömungsprozesse und -größen. Damit stellt die numerische Modellbildung ein geeignetes Werkzeug zur qualitativen Untersuchung und ersten Abschätzung von hydraulischen Rauheiten verschiedener Formstrukturen dar.

5.4 Einfluss der Mattenform – geometrische Parameterstudie

Die Reproduzierbarkeit der numerischen Modellbildung wird zur Prognose der Strömungsgrößen und der hydraulischen Rauheiten unter veränderten geometrischen Randbedingungen an der Rinnensohle genutzt.

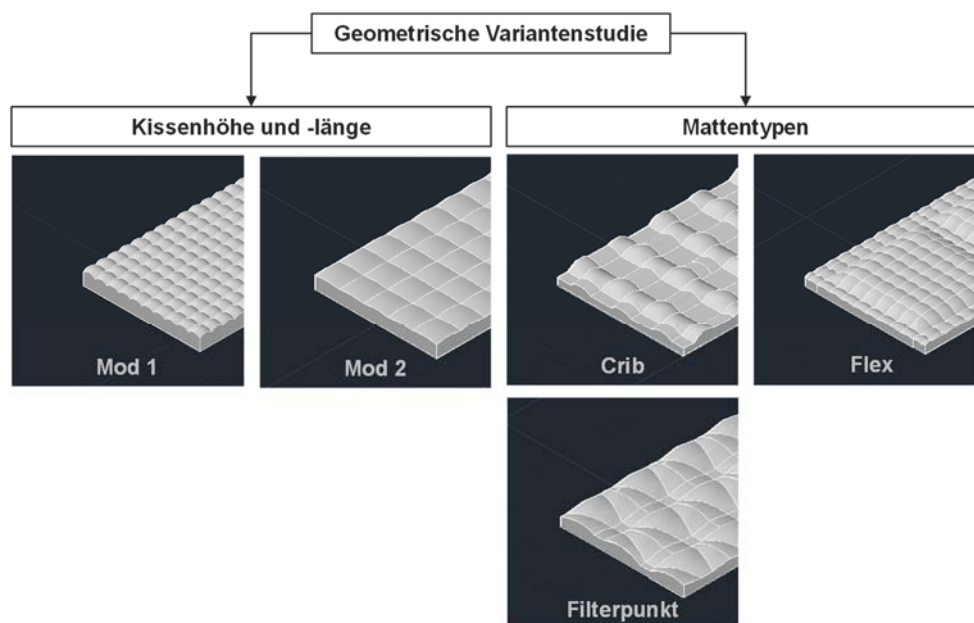


Abb. 13: Untersuchte geometrische Varianten der geotextilen Matten

Die Formrauheit der parabolischen Formstruktur der gleichförmigen geotextilen Matten wird maßgeblich durch die Höhe und Länge der Kissen beeinflusst. Mit zunehmendem Verhältnis der Höhe zur Länge der Kissen steigt die Rauheitsdichte, die in einer Zunahme des Fließwiderstandes durch einen erhöhten Formrauheitsanteil resultiert. Hingegen wird die Formrauheit bei einem zunehmenden Einfluss der Kissenlänge auf eine größere Fläche verteilt, wodurch ein reduzierter Fließwiderstand folgt.

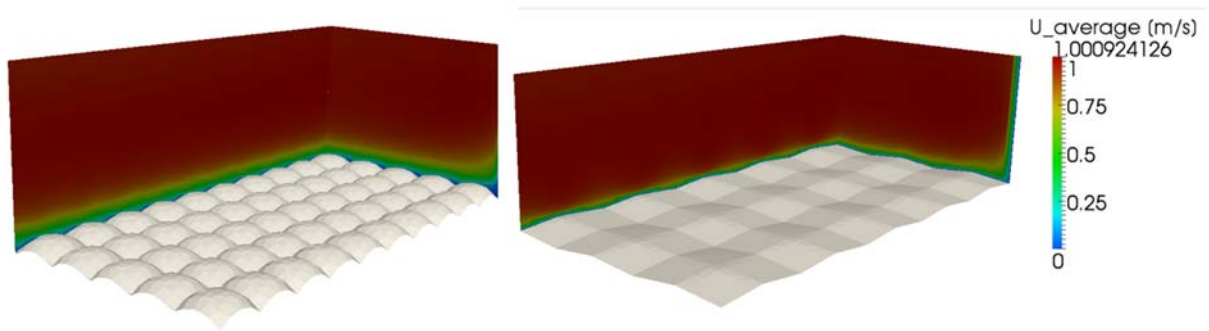


Abb. 14: Visualisierung der Formrauheit in Abhängigkeit der Kissenhöhe und -länge

Die räumlich aufgelösten Formstrukturen der übrigen Mattentypen implizieren lokale Schwankungen der mittleren Fließgeschwindigkeit und deren Verteilungen entlang der Oberfläche der Mattenformen. Schließlich beschreiben diese lokalen Unterschiede der Strömungsgrößen eine ungleichförmige Verteilung der hydraulischen Rauheit.

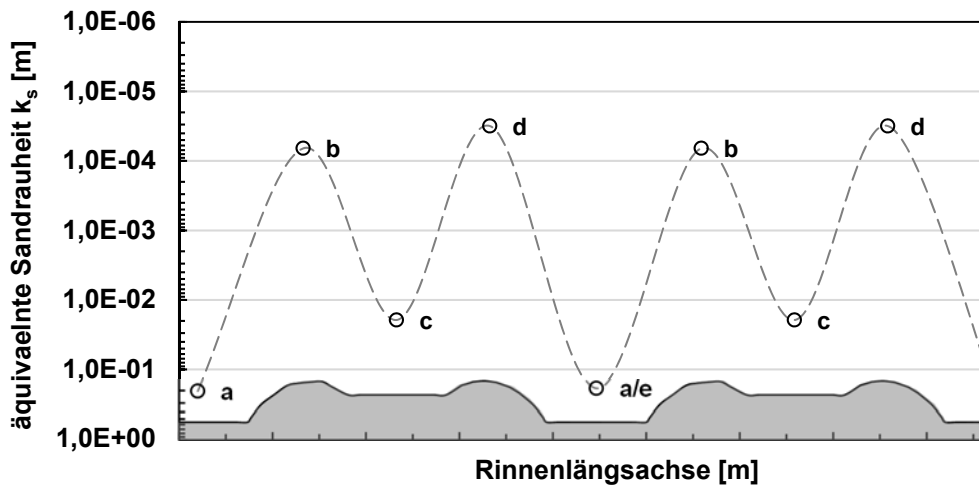


Abb. 15: Geschwindigkeitsverteilung und hydraulische Rauheit entlang einer aufgelösten Mattenstruktur

Die Orte in exponierter Lage (b und d) sind durch ein ungestörtes Strömungsfeld und einen hohen Geschwindigkeitsgradienten gekennzeichnet, wodurch geringe hydraulische Rauheiten entstehen. Im Gegensatz dazu erzeugt der lokale Eintrag von Formrauheit durch geometrische Konturen erhöhte hydraulische Rauheiten (a und e).

Letztlich wird die Gesamtrauheit der geotextilen Matten maßgeblich durch die maximalen lokalen Rauheitswerte bestimmt, die in den Bereichen geometrischer Formeinflüsse auftreten.

6 Schlussfolgerungen

- Die hydraulische Rauheit gleichförmiger geotextiler Matten konnte mithilfe experimenteller Untersuchungen in der Kipprinne des IWW quantifiziert werden.
- Die realmaßstäblichen Modellversuche erlauben aufgrund der vollen dynamischen Ähnlichkeit eine direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse.
- Der methodische Ansatz zur Ermittlung der hydraulischen Rauheit in Form einer äquivalenten Sandrauheit k_s aus den Geschwindigkeitsprofilen liefert eine universell anwendbare Rauheitsgröße.
- Die Gesamtrauheit der geotextilen Matten wird maßgeblich durch den Anteil der Formrauheit bestimmt, wohingegen die Oberflächenrauheit einen vergleichbar geringen Rauheitsanteil beiträgt.
- Die Datengrundlage der experimentellen Untersuchungen erlaubt eine Kalibrierung und Validierung eines numerischen Modells, das zur Prognose der Strömungsgrößen unter veränderten geometrischen Randbedingungen an der Rinnensohle genutzt wird.
- Im numerischen Modell wird eine signifikant erhöhte hydraulische Rauheit durch eine idealisierte gleichförmige Diskretisierung der geotextilen Matten implementiert. Daher ist eine direkte Übertragbarkeit der Simulationsergebnisse auf den realen Anwendungsfall kritisch zu bewerten.
- Die qualitative Abbildbarkeit der relevanten Strömungsprozesse in der numerischen Modellbildung verdeutlicht die Funktion als geeignetes Werkzeug zur qualitativen Untersuchung und ersten Abschätzung der hydraulischen Rauheit.
- Rauheitswerte sind auf Basis experimenteller Untersuchungen unter realitätsnahen Bedingungen zu bestimmen, um belastbare Widerstandswerte für den Anwendungsfall zu erhalten.
- Eine vollständige Nachbildung der turbulenten Energiekaskade mit der Methode der direkten numerischen Simulation (DNS) stellt einen geeigneten Ansatz zur kleinräumigen Analyse der hydraulischen Rauheit von komplexen geotextilen Mattengeometrien in zukünftigen Untersuchungen dar.

7 Literatur

Kobus, H. (1984): Wasserbauliches Versuchswesen. In Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V (39).

Martin, H. (2011): Numerische Strömungssimulation in der Hydrodynamik. Grundlagen und Methoden. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

OpenFOAM Foundation Ltd. (2015): OpenFOAM User Guide.

Pilarczyk, K. W. (2007): Geosynthetics and geosystems in hydraulic and coastal engineering. London: Taylor & Francis.

Schüttrumpf, H. (2014): Wasserbauliches Versuchswesen - aus Anlass der Neuen Wasserbauhalle des IWW. In Internationales Wasserbau-Symposium Aachen.

Anschrift des Verfassers

J. Derksen, M.Sc.

derksen@geotechnik.rwth-aachen.de

Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen (GiB), RWTH Aachen University

Mies-van-der-Rohe-Str. 1

52074 Aachen