

I n h a l t

	Seite
Einführung	1
1. DAS TRANSPORTIERENDE MEDIUM (FLUID)	
1.1 Vorbemerkung	17
1.2 Schubspannungsverteilung	17
1.3 Strömungsvorgänge an der Grenze zwischen Flüssigkeit und Wandung	
1.3.1 Vorbemerkung	18
1.3.2 Definition der Grenzschicht	19
1.3.3 Plattengrenzschicht	20
1.3.4 Die Entstehung der Turbulenz (Stabilitätstheorie)	28
1.4 Das universelle Geschwindigkeitsverteilungsgesetz	
1.4.1 Zähigkeitsströmungen	35
1.4.2 Turbulente Strömungen	37
1.4.3 Geschwindigkeitsverteilung in der zähen Unterschicht	39
1.4.4 Geschwindigkeitsverteilung in der turbulenten Außenströmung	39
1.4.5 Turbulente Strömung mit hydraulisch glatter Sohle	41
1.4.6 Turbulente Strömung mit hydraulisch rauher Sohle	42
1.4.7 Übergangsbereich	44
1.4.7.1 Widerstandsbeiwert λ für sandrauhe Rohre	48
1.4.8 Lage der mittleren Geschwindigkeit	
1.4.8.1 Laminare Strömung	51
1.4.8.2 Turbulente Strömung mit zäher Unterschicht	52
1.4.8.3 Vollkommen turbulente Strömung	53
1.4.9 Geschwindigkeitsverteilungen bei Sedimenttransport	53
1.4.10 Schlußfolgerungen	59
1.5 Geschwindigkeitsverteilung von Luftströmungen mit freier Oberfläche	
1.5.1 Ältere Untersuchungen	65
1.5.2 Ansatz von ZANKE	
1.5.2.1 Messungen am Nordoststrand von Spiekeroog	67
1.5.2.2 Meßverfahren	68
1.5.2.3 Untersuchungsergebnis	68
1.6 Ungleichförmige Strömungen	75

	Seite
2. DAS TRANSPORTIERTE MEDIUM (SEDIMENT)	
2.1 Vorbemerkung	77
2.1.1 Darstellung von Korngrößenverteilungen	77
2.1.2 Klassifikation der Sedimente	83
2.1.3 Methoden zur Ermittlung der Korngrößen	84
2.1.4 Natürliche Korngemische	
2.1.4.1 Entstehung eines alluvialen Korngemisches	85
2.1.4.2 Kornverteilungen in alluvialen Gerinnen	88
2.1.4.3 Lagerungsdichte natürlicher Korngemische	93
2.1.4.4 Maßgebende Korngröße eines beliebigen Korn- gemisches	95
2.1.4.5 Maßgebende Korngröße eines natürlichen Sedimentes	99
2.1.4.6 Repräsentative Bodenproben	101
3. DIMENSIONSLOSE PARAMETER DER SEDIMENTBEWEGUNG	104
4. CHARAKTERISTISCHE EIGENSCHAFTEN VON SEDIMENT IN EINER STRÖMUNG	113
4.1 Sinkgeschwindigkeit	113
4.1.1 Vorbemerkung	113
4.1.2 Bewegung in idealer Flüssigkeit	113
4.1.3 Bewegung in realer Flüssigkeit	
4.1.3.1 Widerstand eines Einzelkörpers	114
4.1.3.2 Grenzsichten am umströmten Körper	117
4.1.3.3 Praktische Berechnung der Sinkgeschwindigkeit	123
4.1.3.4 Sinkgeschwindigkeit von Korngruppen	128
4.2 Beginn der Sedimentbewegung	
4.2.1 Einleitung	132
4.2.2 Kritische Schubspannungen	132
4.2.2.1 Frühere Arbeiten über kritische Schubspannungen bei rolligen Böden	136
4.2.2.1.1 Transportbeginn unter Windeinfluß	143
4.2.2.1.2 Transportbeginn unter Welleneinwirkung	145
4.2.2.2 Ansatz von ZANKE	
4.2.2.2.1 Hydraulisch rauhe Sohle (kohäsionsloses Sediment)	149
4.2.2.2.2 Hydraulisch glatte Sohle (kohäsionsloses Sediment)	151
4.2.2.2.3 Übergangsbereich und rauher Bereich	151
4.2.2.2.4 Sediment mit Einfluß von Adhäsionskräften	154
4.2.2.2.5 Bewegungsbeginn infolge Wind	156
4.2.2.2.6 Bewegungsbeginn unter Welleneinfluß	161

	Seite
4.2.3 Kritische Geschwindigkeit u_m	169
4.2.4 Erosionsbeginn bei bindigen Böden	
4.2.4.1 Allgemeines	173
4.2.4.2 Frühere Arbeiten	173
4.2.4.3 Kritische Betrachtung der Ergebnisse aus dem Schrifttum	178
4.2.4.4 Ansatz von ZANKE	
4.2.4.4.1 Vorbemerkung	179
4.2.4.4.2 Fester Boden	179
4.2.4.4.3 Flüssiger Boden	182
4.2.4.4.4 Übergangsbereich	184
4.2.5 Beginn der Suspendierung von Sedimenten	189
 5. QUANTITATIVER SEDIMENTTRANSPORT	
5.1 Allgemeines	192
5.2 Frühere Arbeiten	
5.2.1 Gleichung von DU BOYS (1879)	192
5.2.2 Suspensionstransportgleichung von FORCHHEIMER (1930)	194
5.2.3 Gleichungen von SCHOKLITSCH (1934/1943)	194
5.2.4 Gleichung von SHIELDS (1936)	195
5.2.5 Gleichung von KALINSKE (1947)	196
5.2.6 Gleichung von MEYER-PETER und MÜLLER (1948/49)	198
5.2.7 Geschiebefunktion von EINSTEIN (1950)	199
5.2.8 Gleichung von VOLLMERS und PERNECKER (1965)	203
5.2.9 Gleichung von ENGELUND und HANSEN (1967)	203
5.2.10 Gleichung von YANG (1973)	204
5.2.11 Weitere Transportgleichungen	205
5.2.12 Kritische Betrachtung der Gleichungen aus dem Schrifttum	206
5.3 Ansatz von ZANKE	208
5.3.1 Definition der Begriffe "Geschiebe- und Suspensionsfracht"	
5.3.1.1 Geschiebefracht	208
5.3.1.2 Suspensionsfracht	210
5.3.2 Entwicklung der Transportgleichung	
5.3.2.1 Transport als Geschiebefracht q_G	211
5.3.2.2 Transport in Suspension	217
5.3.2.3 Gesamttransport	222

5.3.2.4	Gültigkeitsgrenzen	222
5.3.2.5	Gleichungen von ZANKE in dimensionsloser Schreibweise	224
5.3.3	Berechnung der Transportraten mit der mittleren Geschwindigkeit	224
5.3.4	Abhängigkeit des Feststofftransportes von der Temperatur	225
5.4	Die Gleichungen von ZANKE im Vergleich mit Messungen	229
5.5	Sedimenttransport bei instationären Strömungen	
5.5.1	Allgemeines	232
5.5.2	Geschiebebewegung am Beispiel der TIDE-WESER	233
5.5.3	Transport in Suspension	241
5.6	Sandtransport bei Wind	246
5.6.1	Anwendungsbeispiel	255
5.7	Quantitativer Sedimenttransport unter Welleneinfluß	256
6.	VERTEILUNG SUSPENDIERTER SEDIMENTE	
6.1	Bewegung in Suspension	260
6.2	Diffusionstheorie	263
6.3	Erweiterter Ansatz nach ZANKE 1979	265
6.3.1	Ansatz für $\epsilon_S/\epsilon_W = \beta$	265
6.3.2	κ -Werte bei Suspensionstransport	268
6.3.3	Anwendbarkeit der klassischen Suspensionsverteilungsgleichung über Transportkörpern (ZANKE 1979 b)	271
6.3.4	Verteilungsberechnung für Gemische ohne Hilfsmessung (ZANKE 1979 c)	275
6.3.5	Berechnungsbeispiel	278
6.3.6	Wahrscheinlichkeitsansatz	283
7.	FORMEN DES SEDIMENTTRANSPORTES	
7.1	Einleitung	284
7.2	Kriterien für das Auftreten von Transportkörpern	
7.2.1	Definition der Sohlform	287
7.2.2	Sohlformen	287
7.3	Einige Ansätze für Transportkörperhöhen	290
7.4	Sedimenttransport in Transportkörpern	296
7.5	Instationäre Transportkörperbewegung (FÜHRBÖTER 1980)	299

	Seite
7.6 Ursachen der Transportkörperbildung	299
7.7 Numerische Simulation der Sohlformen (PULS, 1981)	301
7.8 Bedeutung der Transportkörperbildung im Hin- blick auf Unterhaltsarbeiten an Wasserstraßen	
7.8.1 Vorbemerkung	303
7.8.2 Vertiefung eines Tideflusses	303
7.8.3 Vertiefung eines Binnenflusses	304
7.8.4 Bedeutung von Bohrproben vor Flußvertiefungen	305
7.9 Mäander und Flechtströme	305
 8. MODELLKRITERIEN	
8.1 Allgemeines	309
8.2 Generelle Modellkriterien	310
8.3 Natur und Modell hydraulisch vollkommen rauh	312
8.3.1 Grobes Bettmaterial in Natur und Modell	312
8.4 Modell mit $\lambda Fr_* = 1$ und $\lambda Re_* = 1$	314
8.4.1 Allgemeine Kriterien für verzerrte Modelle	317
8.4.2 Ansatz von GEHRIG	318
8.4.3 Berücksichtigung der Rauhgkeit durch das logarithmische Gesetz	322
8.4.3.1 Sonderfall des gekippten Modells	324
8.5 Modelle mit vorwiegendem Transport in Suspension	326
8.6 Modelle mit Transportkörpern	327
8.7 Zeitmaßstäbe	329
8.8 Litorale Prozesse	329
8.9 Zusammenfassung	332
 9. STABILE FLÜSSE UND KANÄLE	
9.1 Stabile Gerinne	334
9.1.1 Statisch stabile Gerinne	335
9.1.2 Dynamisch stabile Gerinne	340
9.1.3 Natürliche Gerinne mit erodierbaren Ufern	346
 10. KOLKE	
10.1 Allgemeines	347
10.2 Berechnung der Kolkentwicklung	
10.2.1 Zweidimensionaler Kolk	348
10.3 Dreidimensionaler Kolk am Kreiszyylinder	
10.3.1 Zeitliche Entwicklung	353

	Seite
10.3.2 Endkolktiefen	357
10.3.3 Hochrechnung auf einen angenommenen Naturfall	360
10.3.4 Kolkbildung bei Wellen (kurz- und langperiodisch)	
10.3.4.1 Maximale Kolktiefen	360
10.3.4.2 Zeitliche Kolkentwicklung unter Welleneinfluß	364
10.3.4.3 Einfluß des wellenbedingten Druckgradienten im Boden auf Kolke	365
10.4 Kolkschutz	
10.4.1 Allgemeines	367
10.4.2 Steinschüttungen als Kolkschutz	367
11. ABKÜRZUNGEN	372
12. SCHRIFTTUM	378
13. NAMENVERZEICHNIS	396
14. STICHWORTVERZEICHNIS	400