

Fallstudien zur Kolkbildung

Scour Case Studies

GEORGE W. ANNANDALE, ENGINEERING & HYDROSYSTEMS, HIGHLANDS RANCH, COLORADO, USA
BRUCE MELVILLE, ASSOCIATE PROFESSOR, CIVIL AND RESOURCE ENGINEERING, UNIVERSITY OF AUCKLAND, NEW ZEALAND
YEE-MENG CHIEW, ASSOCIATE PROFESSOR, SCHOOL OF CIVIL AND STRUCTURAL ENGINEERING, NANYANG TECHNOLOGICAL UNIVERSITY, SINGAPORE, SINGAPORE

1 Introduction

Scour, resulting from an interaction between soil, structure and water, is an international problem affecting infrastructure and concurrently endangering human life and property. Scour occurs when earth material is removed by water, often resulting from increased turbulence and forces that develop in the flowing water due to the presence of structures, such as dams, bridges, spillways, pipeline river crossings, sub-marine pipelines, riverbanks, breakwaters, water conveying tunnels and other infrastructure exposed to the interaction between flowing water and earth.

Although the cost of repair of damaged infrastructure is often significant, the indirect costs of such events can be even greater. Using the Schoharie Creek Bridge failure and other bridges damaged during the 1987 flooding in New York as examples, the Federal Highway Administration (FHWA) of the United States of America estimates that the indirect costs suffered by the general public, business, and industry because of long detours and lost production time can be five times greater than the direct costs of bridge repair (Lagasse & Richardson 2001).

The prediction of scour and the design of measures to protect infrastructure against scour requires expertise and experience in geotechnical engineering, hydraulic and hydrologic engineering, and engineering geology. Analysis of the interaction between structure, earth and water demands knowledge pertaining to the behaviour of the flow of water and the forces that it exerts on structure and earth. It also requires knowledge of how the earth on which a structure may be founded will respond to the combined forces imposed by the structure and the flow of water.

Some advances to understand these problems have been made, but satisfactory integration of the disciplines of geotechnical engineering, engineering geology, and hydraulic and hydrologic engineering to fully address the complexity of scour problems is still required. This paper briefly summarizes the types of scour that engineers conventionally deal with, and then presents three case studies to illustrate scour at bridges, water conveying tunnels and submarine pipelines.

1 Einführung

Kolke, die infolge einer Wechselwirkung von Boden, Bauwerk und Wasser entstehen, sind international ein Problem, das die Infrastruktur beeinflusst und gleichzeitig menschliches Leben und Eigentum gefährden kann. Ein Kolk entsteht, wenn Bodenmaterial durch Wasser verlagert wird, häufig infolge verstärkter Turbulenz und von Strömungskräften, die im fließenden Wasser entstehen infolge des Vorhandenseins von Bauwerken wie Dämmen, Brücken, Schussrinnen, Rohrleitungskreuzungen in Flüssen, Rohrleitungen im Meeresboden, Ufersicherungen in Flüssen, Wellenbrechern, Abflusstollen und anderen Infrastrukturbauwerken, die der Wechselwirkung zwischen Boden und Wasser ausgesetzt sind.

Obwohl schon die reinen Reparaturkosten von beschädigten Infrastrukturbauwerken häufig eine bemerkenswerte Summe erreichen, können die indirekten Kosten solcher Versagensfälle sogar noch größer sein. Auf der Basis des Brückeneinsturzes über den Schoharie Creek und anderer Versagensfälle während der Überflutung in New York 1987, schätzte die Straßenbauverwaltung der Vereinigten Staaten von Amerika die indirekten Kosten, die der Öffentlichkeit, dem Geschäftsleben und der Industrie infolge langer Umwegzeiten und verlorener Produktionszeiten entstanden sind, bis zu fünf Mal größer ein als die direkten Reparaturkosten der Brücke (Lagasse & Richardson 2001).

Die Vorhersage von Kolkbildung und die Bemessung von Maßnahmen, um die Infrastruktur gegen Kolk zu schützen, erfordert Wissen und Erfahrung in der Geotechnik, der Hydraulik, der Hydrologie und der Ingenieurgeologie. Die Analyse der Wechselwirkung zwischen Bauwerk, Boden und Wasser erfordert Kenntnis über die Strömungsvorgänge im Wasser und die Kräfte, die davon auf Bauwerk und Boden ausgeübt werden. Sie erfordert ebenfalls Kenntnis darüber, wie der Boden, auf dem ein Bauwerk gegründet ist, auf die vereinte Belastung von Bauwerk und fließendem Wasser reagiert.

Im Verständnis dieser Zusammenhänge wurden einige Fortschritte gemacht. Dennoch ist eine verstärkte Integration der Disziplinen Geotechnik, Geologie, Hydraulik und Hydrologie erforderlich, um die Komplexität der

2 Types of Scour

Scour can be defined as the flow- or wave-induced lowering of a sediment bed that could result in damage to the natural or built environment. For the purposes of this paper, scour is classified as **generally** occurring in coastal and river environments, or **locally** in the vicinity of, and as a consequence of, the presence of various types of hydraulic structures. As such, the extent of scour is determined by the interaction between the flow of water, the presence of hydraulic structures, and the response of earth material to the applied forces.

2.1 Scour in Rivers

General scour occurs in rivers, irrespective of the presence of human imposed structure. The fluvial and geomorphic processes giving rise to general scour occur over a wide range of space and time scales. For example, instabilities within a catchment, which can occur over a range of spatial and temporal scales, are important factors in most cases of general scour in rivers. Also, land-use changes, such as deforestation and urbanization, can induce significant scour in river systems. The types of general scour that can occur in rivers include general degradation; scour at bends and confluences; and lateral erosion, including channel bank erosion, channel widening and channel shift.

General scour in rivers can influence the stability of bridge foundations, bank protection, dam structures, channel control structures, and the safety of pipeline crossings.

2.1.1 Degradation

Degradation is the general lowering of bed levels over a significant length of the river channel and typically over relatively long time periods, contrasting the kind of scour that often occurs over shorter reaches during individual floods. Degradation can proceed in upstream and/or downstream directions. There are various causes of degradation, including the lowering of a downstream control; gravel and sand extraction from a riverbed or floodplain, and reduction in sediment transport as the result of sediment deposition behind dams. Degradation at a bridge in Taiwan caused by gravel extraction from the river is illustrated in Figure 1.

The extent of general degradation can be predicted using empirical relationships (e.g. Neill, 1973), limited analytical solutions involving the sediment continuity equation and a sediment transport equation (e.g. de Vries, 1981), or computer software used for river modelling.

Kolkentwicklung voll zu erfassen. Der Beitrag fasst die Arten von Kolken, mit denen der Ingenieur üblicherweise zu tun hat, zusammen und zeigt dann an drei Fallstudien die Kolkentwicklung an Brücken, an wasserführenden Stollen und an Pipelines im Meeresboden.

2 Kolkarten

Ein Kolk kann beschrieben werden als der strömungs- oder wellenbedingte Abtrag der wasserbenetzten Sedimente, der zu Schäden an dem natürlichen oder künstlichen Umfeld führen kann. Im Folgenden wird Kolk als **global** bezeichnet, wenn er im Flussbett oder an der Küste auftritt, und **lokal**, wenn er in der Nähe von Bauwerken oder als eine Folge vom Vorhandensein beliebiger Arten von hydraulischen Bauwerken entsteht. Daraus ergibt sich, dass das Ausmaß der Kolkbildung bestimmt wird durch die Wechselwirkung von Wasserströmung, Vorhandensein eines hydraulischen Bauwerkes und Verhalten des anstehenden Bodens unter der entsprechenden Auflast.

2.1 Flusskolke

Globale Kolke entstehen in Flüssen unabhängig vom Vorhandensein von zusätzlich errichteten Bauwerken. Die morphologischen Prozesse, die zu globalen Kolken führen, entstehen in großen Raum- und Zeitbereichen. Zum Beispiel sind Instabilitäten innerhalb einer Haltung, die über einen großen räumlichen und zeitlichen Bereich auftreten können, in den meisten Fällen wichtige Faktoren für globale Kolke in Flüssen. Auch die Umnutzung der umgebenden Landschaft, wie z. B. Abholzung und Besiedelung, kann erhebliches Kolken in einem Flusssystem bewirken. Die Arten von globalen Kolkvorgängen, die in Flüssen auftreten können, umfassen globalen Abtrag, Kolke in Krümmungen und an Zusammenflüssen, seitliche Erosion einschließlich Ufererosion, Aufweitung und Verlagerung des Flussbettes.

Solche globalen Kolkerscheinungen in Flüssen können die Stabilität von Brückengründungen, Uferschutzmaßnahmen, Dämmen, Bauwerken zur Flusslenkung und die Sicherheit von querenden Rohrleitungen beeinträchtigen.

2.1.1 Abtrag

Unter Abtrag wird die generelle Eintiefung des Flussbettes über eine bestimmte Flusslänge verstanden, die sich über eine relativ lange Zeit entwickelt. Er steht damit im Gegensatz zu der Art von Kolken, die häufig in kürzeren Haltungen während eines einzelnen Hochwassers auftritt. Abtrag kann sich sowohl flussab- als auch flussaufwärts entwickeln. Es gibt verschiedene Ursachen für diesen Abtrag, z.B. die Erniedrigung eines flussabwärts liegenden Bauwerks zur Flusslenkung,

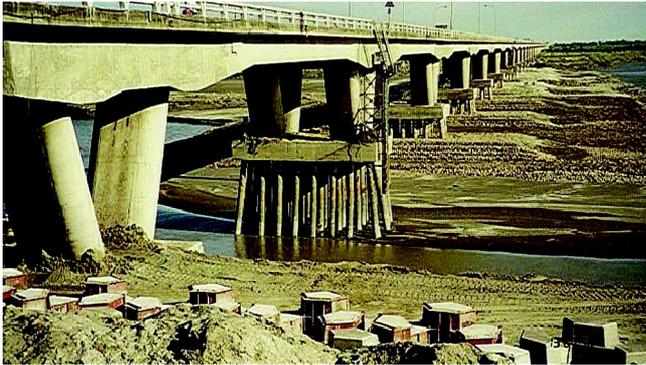


Figure 1: The impact of river degradation at a bridge in Taiwan resulting from gravel mining

Bild 1: Einfluss der Sohlrosion eines Flusses auf eine Brücke in Taiwan infolge Kiesentnahme

2.1.2 Bend scour

At river bends, the interaction between the vertical gradient of streamwise velocity and the curvature of the primary flow produces secondary currents leading to larger flow depths, velocities and shear stresses at the outside (concave) of the bend. These in turn lead to increased scour at the outside of the bend. Estimates of the depth of scour at the concave sides of bends can be made with Maynard's equation (Maynard 1996).

2.1.3 Confluence scour

Confluence scour is a feature that typically occurs in braided rivers, where channel shift can result in the confluence of individual channels of a river. Helicoidally secondary currents form at the confluence of the two channels, due to the meeting of the two flow streams at an angle. Deep scour holes, up to five times the mean flow depth in the approach channels, can develop at the confluence. The flow in a confluence resembles that for two bends, placed back to back to form a single channel, the confluence scour hole resembling that occurring at the outside of these bends. Methods to estimate confluence scour are given by Ashmore and Parker (1983) and Amofo (1985).

Kies- oder Sandentnahme aus dem Flussbett oder aus dem Vorland und die Verringerung des Sedimenttransportes als Ergebnis einer Sedimentablagerung oberhalb von Talsperren. Bild 1 zeigt die Sohlrosion eines Flusses in Taiwan infolge von Kiesentnahme.

Das Ausmaß eines generellen Abtrags kann mit Hilfe von empirischen Zusammenhängen (z. B. Neill 1973) vorausberechnet werden, wie auch im begrenzten Umfang mit analytischen Lösungen, die eine Sediment-Kontinuitätsgleichung und eine Sedimenttransportgleichung enthalten (z. B. de Vries 1981), oder mit numerischen Flussmodellen.

2.1.2 Krümmungskolke

Im Flussbett werden durch die Wechselwirkung zwischen dem vertikalen Gradienten der Strömungsgeschwindigkeit und der Krümmung des Primärstroms Sekundärströmungen hervorgerufen, die zu größeren Strömungstiefen, höheren Geschwindigkeiten und Schubspannungen an der Außenseite der Krümmung führen. Diese wiederum führen zu einer verstärkten Kolkbildung an der Außenseite der Krümmung. Abschätzungen über die Kolkentiefe an der Außenseite von Krümmungen können mit der Maynard-Gleichung (Maynard 1996) getroffen werden.

2.1.3 Vereinigungskolke

Vereinigungskolke entstehen typischerweise in mäandrierenden Flüssen, wo die Veränderung des Flussbettes zum Zusammenfluss einzelner Flussarme führen kann. Beim Zusammenfluss zweier Flussarme bilden sich spiralförmige Sekundärströmungen infolge des Zusammentreffens von zwei Strömungen unter einem bestimmten Winkel. An der Vereinigungsstelle können tiefe Kolke mit einer gegenüber den Zuflussarmen fünf Mal größeren Wassertiefe entstehen. Die Strömung an einer Vereinigung ähnelt derjenigen von zwei mit dem Rücken aneinander liegenden Krümmungen, die ein einziges Bett bilden, sodass der Vereinigungskolk dem Kolk an einer Außenkrümmung ähnelt. Verfahren um die Auswirkung von Vereinigungskolken abzuschätzen, werden von Ashmore und Parker (1983) und Amofo (1985) angegeben.

2.1.4 Scour due to sediment-dune migration

General sediment motion in rivers is associated with sediment dunes, which migrate through river reaches. The magnitude of these dunes influences scour at a particular location, because dune troughs lower bed elevations as they propagate through the site. Yalin (1992) and van Rijn (1984) present methods for estimation of the dimensions of sediment dunes.

2.1.5 Lateral erosion

River channels are dynamic with shifting banks, shifting areas of flow concentration, meanderchannel migration both laterally and downstream, and braided streams having many variable interacting channels. This variability can lead to significant problems for hydraulic structures, e.g. bridges. This type of scour includes bank erosion, channel widening and channel shift. Bank erosion is caused by current flow, seepage effects, wave action, surface runoff and sediment mass-failure mechanisms. Lawler et al. (1997) categorizes bank failure mechanisms as surface erosion, and cantilever, slab and rotational failure. Various empirical methods are available to quantify lateral erosion. For example, Odgaard (1989) gives a method for predicting lateral bank erosion. Brice (1982) presents data for median bank erosion rate as a function of channel width for different stream types. Hickin and Nansen (1984) give a method to estimate bend migration rate in terms of the bend curvature.

2.2 Scour in the Coastal Environment

Scour in the coastal environment is caused by currents and waves and may be either short-term or long-term. The short-term changes are associated with variations in the wave size and approach angle. Significant scour typically arises only under extreme conditions and is normally temporary, the beach profile reverting to its pre-storm conditions. For longer time scales there is usually a long-shore transport of sediment, due to various causes such as wave attack or prevailing coastal currents. The long-term scour is a progressive process and can lead to significant scour in the absence of storms.

Scour induced by wave and current action can influence the stability of pipelines, piles, breakwaters, coastal-defence structures, and other submerged or semi-submerged structures.

2.1.4 Geschiebeinduzierte Kolke

Die generelle Sedimentbewegung in Flüssen ist verbunden mit Sedimentdünen, die durch einen Flussabschnitt wandern. Die Größe dieser Dünen beeinflusst die Kolkbildung an einer bestimmten Stelle, da die Dünentäler das Flussbett eintiefen, wenn sie diese Stelle passieren. Yalin (1992) und van Rijn (1984) zeigen Verfahren zur Abschätzung der Größe solcher Sedimentdünen auf.

2.1.5 Seitliche Erosion

Ein Flussbett ist dynamisch mit sich verändernden Ufern, wechselnden Bereichen von Strömungskonzentrationen, Mäandervorgängen, sowohl seitlich als auch flussabwärts, und verzweigenden Flussarmen mit wechselnden Betten, die sich gegenseitig beeinflussen. Diese Veränderungen können zu erheblichen Problemen für Wasserbauwerke, wie z. B. Brücken, führen. Diese Kolkart schließt Ufererosion, Flussbettverbreiterung und Flussbettverlagerung ein. Ufererosion wird hervorgerufen durch Strömung, Sickerwasserzufluss, Wellenangriff, Zufluss von Oberflächenwasser über das Ufer und Bruchvorgänge im Sediment. Lawler et al. 1997 unterteilen Bruchmechanismen an Ufern in Oberflächenerosion, Kragbruch, Plattenbruch und Rotationsbruch.

Es gibt verschiedene empirische Verfahren, um seitliche Erosion abzuschätzen. Z. B. gibt Odgaard (1989) ein Verfahren an, mit dem Ufererosion berechnet werden kann. Brice (1982) liefert Daten für eine mittlere Ufererosionsrate in Abhängigkeit von der Flussbettbreite für verschiedene Strömungsverhältnisse. Hickin und Nansen (1984) geben ein Verfahren an, um die Entwicklung von Krümmungskolken in Abhängigkeit von der Krümmung abzuschätzen.

2.2 Küstenkolke

Kolkbildung an der Küste wird durch Strömungen und Wellen hervorgerufen und kann sowohl kurz- als auch langfristig sein. Kurzfristige Veränderungen sind verbunden mit den Schwankungen in Wellenhöhe und Anströmwinkel. Erhebliche Kolke entstehen meist nur unter extremen Bedingungen und sind zeitlich begrenzt, sodass das Strandprofil wieder den vorhergehenden Zustand annimmt. Längerfristig ist üblicherweise der Sedimenttransport entlang der Küste, der infolge verschiedener Einwirkungen, wie Wellenangriff oder dominierende Küstenströmungen, hervorgerufen wird. Solche Langzeitkolkentwicklungen verlaufen progressiv und können auch ohne Sturmwirkung erhebliche Folgen haben.

Kolke infolge von Wellen oder Strömungen können auch die Stabilität von Pipelines, Pfählen, Wellenbrechern, Uferschutzbauwerken und anderen Bauwerken beeinträchtigen, die ganz oder halb im Wasser stehen.

2.3 Scour at Hydraulic Structures

Hydraulic structures that obstruct the flow pattern in the vicinity of the structure may cause local scour. The scour occurs because of the interaction between the flow of water, and the structure and earth material below. The increased turbulence caused by the interaction between the structure and the flow of water introduces elevated forces that impact the earth material on the riverbed and around the structure. If the resistance offered by the earth material against scour is inadequate, the elevated forces will dislodge the material and remove it, thus forming a scour hole. A new equilibrium may eventually be reached as hydraulic conditions are adjusted, turbulence is reduced concomitantly with the forces it causes and these forces are eventually resisted by the inherent strength of the earth material.

Local scour occurs under "clear-water" or "live-bed" conditions. Clear-water scour occurs when the bed material upstream of the scour area is at rest. The maximum local scour depth is reached when the flow can no longer remove bed material from the scour area. Live-bed scour occurs when there is general sediment transport in the vicinity of the structure. The equilibrium scour depth is attained when the time-averaged transport of bed material into the scour hole equals that removed from it.

Scour is a significant problem at many hydraulic structures. Some of these are discussed below.

2.3.1 Scour at bridge foundations

Bridge foundations are amongst the most vulnerable hydraulic structures with respect to scouring. The costs of scour damage to bridge foundations are significant. In an extensive study of bridge failures in the U.S.A., Brice and Blodgett (1978) reported that damage to bridges and highways from floods in 1964 and 1972 amounted to about US\$100 million per event.

Scour at bridge piers and bridge abutments are caused by the strong vortices that establish in the vicinity of the structures. These have become known as the horseshoe vortex at bridge piers and the principal vortex at bridge abutments.

The bridge scour literature is extensive. Melville and Coleman (2000) present a comprehensive treatment of bridge scour, which present detailed predictive methodologies for all types of scour at bridges. Other recent references of note include Richardson and Davis (1995), Lagasse et al (1995) and Hoffmans and Verheij (1997).

2.3 Kolke an Wasserbauwerken

Wasserbauwerke, die die Abflussverhältnisse in ihrer Nachbarschaft beeinträchtigen, können lokale Kolkbildungen auslösen. Der Kolk entsteht auf Grund der Wechselwirkung zwischen der Strömung, dem Bauwerk und dem Boden. Die verstärkte Turbulenz infolge der Interaktion zwischen Bauwerk und Abfluss führt zu erhöhten Kräften, die auf das Bodenmaterial des Flussbettes einwirken. Wenn der Widerstand des Bodenmaterials gegen Kolkung nicht ausreichend ist, werden diese erhöhten Kräfte Material verlagern und abtransportieren und damit zu einem Kolk führen. Gegebenenfalls kann ein neues Gleichgewicht erreicht werden, wenn sich die hydraulischen Bedingungen angepasst haben, die Turbulenzen und die damit verbundenen Kräfte verringert sind und diesen Kräften durch die Festigkeit des Erdstoffes ausreichend Widerstand entgegengesetzt werden kann.

Lokale Kolke entstehen bei Strömungen ohne und mit Sedimentfracht. Die einen entstehen, wenn das Sohlmaterial oberhalb des Kolkbereiches stabil ist. Die maximale Kolkentiefe ist erreicht, wenn die Strömung kein weiteres Sohlmaterial mehr aus dem Kolk abtransportieren kann. Die anderen entstehen, wenn im Bereich des Bauwerks ein genereller Sedimenttransport stattfindet. Die Gleichgewichtstiefe eines Kolkes ist erreicht, wenn der mittlere Antransport von Sediment der abtransportierten Menge entspricht.

Kolkbildung ist bei vielen Wasserbauwerken ein erhebliches Problem. Einige Fälle werden im Folgenden behandelt.

2.3.1 Kolke an Brückengründungen

Brückengründungen sind vermutlich die empfindlichsten Wasserbauwerke im Hinblick auf Kolkbildung. Die Kosten infolge von Kolk Schäden an Brückengründungen sind erheblich. In einer umfangreichen Studie zu Brückenschäden in den USA zeigen Brice und Blodgett (1978), dass die Schäden an Brücken und Schnellstraßen infolge der Überschwemmungen von 1964 und 1972 jedes Mal ca. 100 Mill. US-\$ erreichten.

Kolke an Brückenpfeilern und Brückenwiderlagern werden durch starke Wirbel hervorgerufen, die sich im Bereich dieser Bauwerke bilden. An Brückenpfeilern hat sich dafür der Begriff „Hufeisenwirbel“ und an Widerlagern „Prinzipalwirbel“ eingebürgert.

Es gibt zahlreiche Veröffentlichungen über Brückenkolke. Melville & Coleman (2000) behandeln Brückenkolke ausführlich und beschreiben detailliert Verfahren zur Vorausberechnung aller Arten von Kolkbildungen an Brücken. Andere jüngere Quellen sind Richardson & Davis (1995), Lagasse et al. (1995) und Hofmanns und Verheij (1997).

2.3.2 Culverts and drop structures

Scour at culverts and drop structures arises when the water jet exiting the structure is able to lift the sediment particles and transports those particles downstream of the impacted area. The jet impact area is transformed into an energy dissipater and a scour hole is formed. In some cases jet-type flow can produce severe local scouring in the streambed immediately downstream of the structure and can lead to failure by undermining of the structure.

Methods to analyse this type of scour is presented by Abida and Townsend (1991), Bormann and Zeller (1993), Doehring and Abt (1994) and Lim (1995).



Figure 2: Lined spillway channel failure commences (Source: Hidroven)

Bild 2: Ausgekleideter Überlaufkanal – Beginn des Versagens (Quelle: Hidroven)

2.3.2 Durchlässe und Überfälle

Kolke an Durchlässen und Überfallbauwerken entstehen, wenn der Wasserstrahl im Unterwasser dieser Bauwerke Sedimente lösen und stromabwärts transportieren kann. An der Auftreffstelle des Wasserstrahls entsteht ein Kolk zur Energiedissipation. In einigen Fällen kann der strahlartige Abfluss erhebliche lokale Kolke im Flussbett unmittelbar unterhalb des Wasserbauwerks erzeugen und kann durch Unterspülung zum Einsturz des Bauwerks führen.

Verfahren, um diese Kolkart zu berechnen, werden von Abida & Townsend (1991), Bormann & Zeller (1993), Döhning & Abt (1994) und Lim (1995) genannt.



Figure 3: Close up view of principal failure area (Source: Hidroven)

Bild 3: Ansicht auf den Hauptbereich des Versagens (Quelle: Hidroven)



Figure 4: Advanced level of failure, showing headcutting mechanism (Source: Hidroven)

Bild 4: Fortgeschrittenes Stadium des Versagens, headcutting Mechanismus (Quelle: Hidroven)

2.3.4 Spillway failure

Failure of lined and unlined spillways often occurs because of head-cutting. An example of the failure of a lined spillway is shown in Figures 2, 3 and 4. Overtopping of this spillway channel caused scour of the earth supporting it, which was followed by failure of the concrete channel. Once the concrete lined channel failed, erosion by head-cutting occurred, eventually completely removing the spillway.

2.3.5 Dam Foundations and Plunge Pools

Dam foundation erosion and plunge pool formation normally occurs when dams are overtopped or when flows from spillway channels impinge on earth material. When concrete arch dams are overtopped, the impinging jet introduces significant erosive forces onto the earth material it interacts with often causing significant scour. Jets exiting from ski jumps off spillway channels impinge onto the downstream earth material in a similar manner, causing it to scour. Annandale et al (2000), Rice et al (1993), and by Mason and Arumugam (1985) discuss this type of scour.

Of particular interest in these kinds of problems is the ability to predict the erodibility of earth materials like rock. When most of the dams around the world were constructed in the decades spanning the period 1960 to 1970, it was believed that rock would generally not scour. However, this was found to be untrue, as has been experienced at a number of dams around the world, including Tuttle Creek and Milford Dams, Kansas and Bartlett Dam, Arizona, United States of America; Kariba Dam, between Zimbabwe and Zambia, Africa; Caborra Bassa Dam, Mozambique, Africa; Srisaïlam Dam, Andhra Pradesh, India; and Tarbela Dam, Pakistan.

2.3.6 Breakwaters

Scour in front of a break-water results from wave attack at right angles to the breakwater. The key mechanism in this case is the action of standing waves, leading to a steady streaming pattern in the vertical plane, resulting in distinct scour and deposition areas lying parallel to the breakwater. The mechanism regarding the scour around the head of a breakwater consists of separation vortices forming at the lee side of the breakwater.

The scour processes around and in front of a breakwater are similar to the scour processes at bridge abutments. The down-flow and vortex flows generated by the wave action erode a groove adjacent to the front of the breakwater. This type of scour is discussed in Fredsoe and Sumer (1997), Sumer and Fredsoe (1997) and Sumer et al (1994).

2.3.4 Zerstörung von Überläufen

Ausgekleidete oder nicht ausgekleidete Überläufe werden häufig durch rückschreitende Unterspülung zerstört. Ein Beispiel für das Versagen eines ausgekleideten Überlaufs zeigen die Bilder 2, 3 und 4. Durch die über die Abflussrinne tretenden Wassermassen wurde das stützende Erdreich weggespült und als dessen Folge die Betonrinne zerstört. Nach deren Zerstörung entwickelte sich eine rückschreitende Erosion, die ggf. das ganze Überlaufbauwerk erfassen kann.

2.3.5 Talsperrengründungen

Erosion an Talsperrengründungen und Strahlkolke entstehen, wenn die Talsperre überströmt wird oder wenn der Abfluss aus Überlaufrinnen auf den Untergrund trifft. Wenn Betonbogenstaumauern überströmt werden, erzeugt der auftreffende Wasserstrahl erhebliche erosive Kräfte und führt meist zu erheblicher Kolkbildung. Der Strahl von Sprungschanzen trifft stromabwärts in ähnlicher Weise auf den anstehenden Boden und führt zur Kolkbildung. Annandale et al. (2000), Rice et al. (1993) und Mason & Arumugam (1985) behandeln diese Kolkart.

Bei dieser Kolkproblematik ist die Möglichkeit, die Erosionsfähigkeit von Fels vorherzubestimmen, von besonderem Interesse. Als in der Zeit zwischen 1960 und 1970 die meisten Talsperren der Welt gebaut wurden, glaubte man, dass Fels grundsätzlich keine Kolkerscheinungen zeigen würde. Dies erwies sich jedoch als falsch, wie sich an einigen Talsperren gezeigt hat, darunter Tuttle-Creek und Milford in Kansas, Bartlett in Arizona, Kariba zwischen Simbabwe und Sambia, Kabora Bassa in Mosambik, Srisaïlam in Andhra Pradesh und Tarbela in Pakistan.

2.3.6 Wellenbrecher

Kolke vor einem Wellenbrecher entstehen durch den Wellenangriff im rechten Winkel auf den Wellenbrecher. Der Hauptmechanismus in diesen Fällen ist die Einwirkung von stehenden Wellen, was zu einem stationären Strömungszustand in der vertikalen Ebene führt, mit deutlichen Kolk- und Ablagerungsbereichen parallel zum Wellenbrecher. Der Mechanismus der Kolkbildung um den Kopf eines Wellenbrechers besteht in Trennungswirbeln, die sich auf der Lee-Seite des Wellenbrechers entwickeln.

Die Kolkvorgänge um und vor Wellenbrechern sind ähnlich den Kolkvorgängen an Brückenwiderlagern. Die abwärts gerichtete Strömung und die Wirbel, die durch die Welleneinwirkung erzeugt werden, erodieren eine Rinne vor dem Wellenbrecher.

2.3.7 Submerged pipelines

Scour in the vicinity of a pipeline is due to the disturbance of the flow caused by the presence of the pipeline. In the case of scour around a pipe exposed to a steady current, the scour profile is characterised by a steep upstream slope and a gentler downstream slope. The asymmetric shape is due to the difference in the flow pattern upstream and downstream of the pipe. The scour beneath a pipeline caused by wave action differs from that caused by uni-directional current, because the wake system now occurs on both sides of the pipeline. Strong wake erosion gives a much gentler (downstream) slope on both sides of the pipe.

Scour at submerged pipelines is described by Cevik and Yuksel (1999), Chiew (1990, 1991), Moncada et al (1990) and Sumer and Fredsoe (1990). Arzamendi and Smith (1998) present a case history of this type of scour.

3 Case Studies

3.1 Bridge Pier Failure

3.1.1 Bridge Site Description

The Wairoa River Road Bridge was situated on the east coast of the North Island, New Zealand. The bridge structure, shown in Figure 5, comprised a reinforced-concrete deck supported by 10 plate-girder spans of 18.3 m with a 12.2 m steel-beam span at each end.

The bridge effectively bisected the township of Wairoa and carried essential services, such as water, sewerage, and power and telephone cables. The majority of the township residents were located south of the bridge,

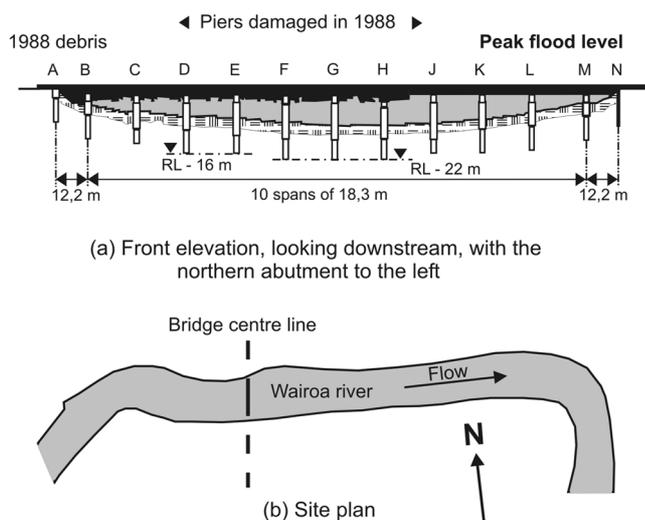


Figure 5: The Wairoa River Road Bridge, after Melville and Coleman (2000)

Bild 5: Die Straßenbrücke am Wairoa-Fluss, nach Melville und Coleman (2000)

Diese Art von Kolkbildung wird behandelt von Fredsoe & Sumer (1997), Sumer & Fredsoe (1997) und Sumer et al. (1994).

2.3.7 Rohrleitungen unter Wasser

Kolke in der Nachbarschaft von Rohrleitungen entstehen infolge der Störung einer Strömung durch das Vorhandensein dieser Rohrleitung. Im Falle eines Kolkes um ein Rohr, das einem stationären Zustrom ausgesetzt ist, wird das Kolkprofil charakterisiert durch eine steile Oberwasserböschung und eine flachere Unterwasserböschung. Die asymmetrische Form entsteht durch die Unterschiede im Strömungszustand oberhalb und unterhalb der Rohrleitung. Der Kolk unter einer Rohrleitung infolge von Welleneinwirkung unterscheidet sich von dem, der durch eine gleichgerichtete Strömung erzeugt wird, da der Sog nun auf beiden Seiten des Rohres entsteht. Die Erosion infolge des Sogs führt zu viel flacheren Böschung auf beiden Seiten der Rohrleitung.

Kolke an Unterwasserrohrleitungen werden von Cevik & Yuksel (1999), Chiew (1990, 1991), Moncada et al. (1990) und Sumer & Fredsoe (1990) beschrieben. Arzamendi & Smith (1998) haben eine Fallstudie zu dieser Kolkart veröffentlicht.

3 Fallstudien

3.1 Versagen von Brückenpfeilern

3.1.1 Beschreibung des Brückenstandortes

Die Wairoa River Road Bridge liegt an der Ostküste von North Island, Neuseeland. Das Brückenbauwerk, dargestellt auf Bild 5, umfasst eine Fahrbahn aus bewehrtem Beton über 10 Öffnungen, getragen von Plattenbalken von 18,3 m Länge und Stahlträgern von 12,2 m Länge an den beiden Enden.

Die Brücke verband die beiden Teile der Stadt Wairoa und trug auch Transportleitungen für Wasser, Entwässerung, Telefon und Strom. Die Mehrzahl der Bevölkerung wohnte südlich der Brücke, während die meisten Arbeitsstätten zu jener Zeit nördlich der Brücke lagen.

Bild 6 zeigt die zerstörte Brücke. Die Pfeiler bestanden aus Betonplatten auf jeweils 1,8 bis 2,1 m dicken Betonsäulen. Die Säulen reichten ca. 6 m unter das ursprüngliche Flussbett und waren auf Pfahlgruppen aus jeweils fünf Betonpfählen gegründet. Diese Pfähle hatten einen Durchmesser von 0,35 m. Die Pfähle für die Pfeiler D und E reichten bis zu 16 m, die Pfähle der Pfeiler F bis H ca. 22 m unter den mittleren Wasserspiegel.

Die Brücke lag in einem relativ geraden Flussabschnitt und unterhalb einer Krümmung, wie in Bild 5 dargestellt.

while the principal employer at the time was located north of the bridge.

Figure 6 shows the damaged bridge. The piers comprised a barbell-shaped concrete slab supported on twin 1.8 to 2.1 m diameter concrete cylinders. The cylinders extended about 6 m below the original bed levels, and were founded on clusters of five octagonal concrete piles. The piles were 0.35 m diameter. The piles for Piers D and E extended to about 16 m below mean sea level, while the piles for Piers F to H extended to about 22 m below mean sea level, as shown.

The bridge was located in a relatively straight reach of the river and downstream from a bend, as shown in Figure 5. The bed sediment at the site is characterised as follows: $d_{16} = 0.2$ mm, median size $d_{50} = 0.35$ mm, and $d_{84} = 0.55$ mm. Bed investigations in 1988 (for the replacement bridge) showed the riverbed to be at about 5 m below MSL, with about 38 m of silty sands and gravels overlying siltstone.

3.1.2 Bridge Failure

The bridge failed on 8 March 1988 during flooding caused by Cyclone Bola, a tropical cyclone which resulted in sustained, high intensity rainfall in the catchment. Rainfall in the upper reaches of the Wairoa River catchment was reported to be of the 100-year event level.

At the bridge site, a 30-year-event peak discharge of 4,300 m³/s was recorded for the bridge failure. The mean annual flood peak at the bridge site has been estimated at 1,860 m³/s, while the 100-year return period flood has been estimated to be of a peak flow of 5,380 m³/s.

Forestry operations in the Wairoa catchment have led to increased volumes of debris being carried by the Wairoa River. The storm event dislodged large quantities of forest debris that were carried down the river.

Also, the bar at the river mouth was removed by storm surges. This bar, which was situated 5.6 km downstream from the bridge site, controlled flow at the bridge site. Before it was washed out, the bar maintained high water levels at the bridge site, up to about 0.4 m below the bridge beams during the flood. It is thought that the loss of the downstream control was associated with reports of debris some 5 km upstream from the bridge site flowing at speeds equalling traffic driving beside the river at 30 km/hr to 50 km/hr.

Due to the high flood level and the short bridge spans, the large volume of debris being carried by the river could not pass the bridge. The debris formed an extensive raft against the piers and bridge superstructure, as shown in Figure 7. It is postulated that the raft diverted the flow towards the riverbed, thereby increasing scour



Figure 6: The damaged Wairoa River Road Bridge, flow from left to right, after Melville and Coleman (2000)

Bild 6: Die beschädigte Straßenbrücke am Wairoa-Fluss, von links nach rechts fließend, nach Melville und Coleman (2000)

Das Flussbettmaterial ist durch die folgenden Korngrößen charakterisiert: $D_{16} = 0,2$ mm, $D_{50} = 0,35$ mm und $D_{84} = 0,55$ mm. Untersuchungen des Flussbettes im Jahr 1988 für einen Brückenneubau ergaben, dass die Flusssohle ca. 5 m unter NN lag und ca. 38 m schluffige Sande und Kiese über Schluffstein anstanden.

3.1.2 Einsturz der Brücke

Die Brücke stürzte am 8. März 1988 infolge der Überschwemmung beim Zyklon „Bola“ ein. Dieser tropische Zyklon führte zu lang anhaltenden starken Niederschlägen im Einzugsgebiet des Flusses. Im oberen Flussabschnitt erreichte der Regen die 100-jährliche Niederschlagsmenge.

Im Brückenbereich wurde ein 30-jähriger Abfluss mit 4300 m³/s zum Zeitpunkt des Einsturzes gemessen. Der mittlere jährliche Hochwasserabfluss lag bei 1860 m³/s, während das 100-jährliche Ereignis zu 5380 m³/s errechnet wurde.

Waldarbeiten im Einzugsbereich des Wairoa-Flusses haben zu einer Zunahme von Geschwemmsel im Fluss geführt. Infolge des Sturms wurden große Mengen von Überresten der Forstarbeiten den Fluss hinabtransportiert.

Außerdem war durch Sturmflut eine Schwelle an der Flussmündung abgetragen worden. Diese Schwelle, die 5,6 km unterhalb der Brücke lag, bestimmte den Abfluss in Höhe der Brücke. Vor der Zerstörung hielt diese Schwelle bei Überschwemmungen den Hochwasserstand in Höhe der Brücke bei ca. 0,4 m unter dem Brückenträger. Vermutlich war die Zerstörung der Schwelle der Grund, dass ca. 5 km oberhalb der Brücke das Schwemmmaterial mit Geschwindigkeiten von 30 bis



Figure 7: The bridge failure, flow from left to right, after Melville and Coleman (2000)

Bild 7: Das Versagen der Straßenbrücke am Wairoa-Fluss, von links nach rechts fließend, nach Melville und Coleman (2000)

around the foundations. The failure of the bridge can be attributed to this scour, as well as the loads due to the debris raft.

Six spans of the bridge collapsed, with Pier D being swept downstream. Piers E to H, which were also damaged, were separated from the respective cylinders. Four of the dislodged spans were not located. The bridge failure severed the roadway link, along with all services carried by the bridge.

3.1.3 Impact of the Failure

The bridge failure caused significant impacts for the local economy, due to the residential sections of the community being separated from the industrial sectors. The nearest bridge crossing was some 20 km upstream. Visitors to the district chose to bypass Wairoa. The community carried significant costs associated with crossing the river prior to the construction of a replacement bridge, for example running a ferry service across the river and the construction of a footbridge. A new bridge was built at the same site (15 m upstream) in 1989 at a cost of NZ\$ 4,200,000. The socio-economic costs of the failure have been estimated to be at least as much as the cost of bridge replacement. The new bridge has more clearance above river levels, longer spans and deeper foundations.

3.2 Submarine Pipeline Scour

3.2.1 Project Description

A 250-mm diameter oil pipeline and a 350-diameter gas pipeline were installed beneath the seabed in the East China Sea. The 300-km long pipelines were buried and transported hydrocarbon from the offshore gas and oil

50 km/h transportiert wurde.

Infolge des hohen Wasserspiegels und der schmalen Brückenöffnungen konnte die große Menge von Schwemmmaterial die Brücke nicht passieren. Das Schwemmgut formte eine Stauwand vor den Pfeilern und dem Überbau der Brücke, wie auf Bild 7 zu erkennen ist. Es ist zu vermuten, dass diese Stauwand die Strömung zum Flussbett hin ablenkte, wodurch die Kolkbildung um die Pfeilergründung zunahm. Der Einsturz der Brücke kann sowohl dieser Kolkbildung als auch der Belastung durch die Stauwand aus Schwemmmaterial zugerechnet werden.

Sechs Felder der Brücke stürzten ein, Pfeiler D wurde stromab fortgespült. Die Pfeiler E bis H, die auch zerstört wurden, wurden von ihrem Unterbau getrennt. Vier der abgetriebenen Überbauten wurden nicht mehr gefunden. Dieser Brückeneinsturz unterbrach die Straßenverbindung und alle Leitungen, die von dieser Brücke getragen wurden.

3.1.3 Auswirkungen des Einsturzes

Der Brückeneinsturz verursachte erhebliche Einschränkungen für die örtliche Industrie, da die Wohngebiete von den Industriegebieten durch den Fluss getrennt waren. Die nächste Brücke lag ca. 20 km flussaufwärts. Besucher mieden Wairoa. Der Gemeinde entstanden erhebliche Kosten schon vor dem Bau einer Ersatzbrücke, z. B. durch die Einrichtung eines Fährbetriebes und den Bau einer Fußgängerbrücke. Eine neue Brücke wurde 1989 ca. 15 m flussaufwärts gebaut und kostete 4.200.000 NZ\$. Die sozioökonomischen Kosten dieses Einsturzes wurden in derselben Größenordnung wie der Brückenneubau eingeschätzt. Die neue Brücke liegt höher über dem Flusswasserspiegel, hat längere Spannweiten und tieferreichende Gründungen.

3.2 Kolk an einer Unterwasserrohrleitung

3.2.1 Ausgangszustand

Im Meeresboden des ostchinesischen Meeres wurden eine Ölpipeline mit 250 mm Durchmesser und eine Gaspipeline mit 350 mm Durchmesser gebaut. Die 300 km langen Rohrleitungen waren eingegraben und transportierten Kohlenwasserstoff von dem Offshore-Gas- und Ölfeld zum Festland. Da die Strecke besonders während der Taifun-Zeiten hohen Wellenbelastungen und Tidedrömungen ausgesetzt war, wurden besondere Vorsichtsmaßnahmen getroffen, um die Pipeline zu sichern. Die geschätzte maximale Tidedrömgeschwindigkeit wurde auf bis zu 6 Knoten geschätzt.

Um die Pipeline gegen Kolkbildung zu schützen, entschieden sich die Planer, eine Lage Steine über die Pipe-

field to the mainland. As the site experiences high waves and tidal currents, especially during the typhoon seasons, special precautions were taken to enhance the integrity of the pipeline. The estimated maximum tidal current velocity can be as high as 6 knots.

In order to protect the buried pipeline against scouring, the designer decided to place a layer of rock over the pipeline. This rock layer forms a rigid boundary on the erodible seabed. Introduction of a hard layer on top of the movable seabed had unintended consequences, causing significant damage to the pipeline.

3.2.2 Failure

With time, erosion on the seabed took place, causing a highly undesirable effect on the pipeline, defeating the intent of the designer. Figure 8 shows the cross-section of a portion of the pipeline that has experienced severe erosion. The section in the figure was measured approximately 12 months after the rock layer was installed. The figure shows the formation of two scour holes, with a maximum depth close to about 12 m, on either side of the pipelines. This is due to the reversal of tidal current direction.

The formation of these two scour holes appears to be a direct consequence of the rock bunk that was placed over the pipeline. Ironically, this action was undertaken to protect the pipeline against scouring.

Figure 9 shows another section of the pipeline (not far from that in Figure 8) where the two large scour holes are no longer present. Instead the pipeline is completely exposed and the rock layer appears to have been washed away too. When subjected to the hydrodynamic forces caused by both wave and current, tunnel scour (Chiew 1990, 1991) can form beneath the pipeline in Figure 9. When this occurs, spanning may develop causing the pipeline to vibrate. This would seriously undermine the integrity of the pipeline, for example, it may cause spalling of the concrete over the pipeline. It is anticipated that the large scour holes in Figure 8 is a prelude to the pipeline exposure shown in Figure 9.

3.2.3 Impact of Failure

Not long after the measurement of these data in Figures 8 and 9, the portion of the pipeline in the vicinity of the two sections above was ruptured. The cause of the failure was attributed to vortex-induced vibration, a phenomenon that can only occur when tunnel scour beneath a pipeline has taken place.

line zu legen. Diese Steinschicht bildete eine starre Schwelle auf dem erodierbaren Meeresboden. Dieser Bau einer „harten“ Schicht auf einem mobilen Meeresgrund hatte unerwartete Konsequenzen, die zu erheblichen Beschädigungen der Pipeline führten.

3.2.2 Versagen

Mit der Zeit wurde der Meeresgrund erodiert, wodurch ein höchst unerwünschter Effekt für die Pipeline entstand, der dem Vorhaben der Planer vollständig widersprach. Bild 8 zeigt den Querschnitt eines Pipelineabschnittes, an dem erhebliche Erosion aufgetreten war. Dieser Querschnitt war ca. 12 Monate nach Einbau der Steinlage vermessen worden. Das Bild zeigt die Bildung zweier Kolke auf beiden Seiten der Pipeline mit einer Maximaltiefe von fast 12 m, entstanden durch die wechselnde Richtung des Tidestromes.

Die Bildung dieser zwei Kolke war eine direkte Auswirkung der Steinlage, die über die Rohrleitung gelegt worden war. Ironischerweise war diese gebaut worden, um die Rohrleitung gegen Kolkbildung zu schützen.

Bild 9 zeigt einen anderen Abschnitt der Pipeline (nicht weit von dem auf Bild 8), wo die beiden großen Kolke nicht vorhanden sind. Dafür ist die Rohrleitung vollständig freigelegt und die Steinlage scheint fortgespült worden zu sein. Wird eine Rohrleitung den hydrodynamischen Kräften aus Wellen und Strömungen ausgesetzt, kann ein „Tunnelkolk“ (Chiew 1990, 1991) unter der Rohrleitung wie im Bild 9 entstehen. Tritt dies ein, kann das Freiliegen der Pipeline zu Vibrationen führen. Das würde den Zustand der Rohrleitung erheblich beeinträchtigen, z. B. kann es zum Abplatzen des Betons über der Rohrleitung führen. Es ist naheliegend, dass die großen Kolke in Bild 8 eine Vorstufe zum Freiliegen der Pipeline in Bild 9 darstellen.

3.2.3 Auswirkungen

Nicht lange nach den in Bild 8 und 9 dargestellten Messungen brach die Pipeline in der Nähe dieser Querschnitte. Der Grund für den Bruch wurde in wirbelinduzierten Vibrationen gesehen, einem Phänomen, das nur auftreten kann, wenn sich ein Tunnelkolk unter einer Rohrleitung ausgebildet hat.

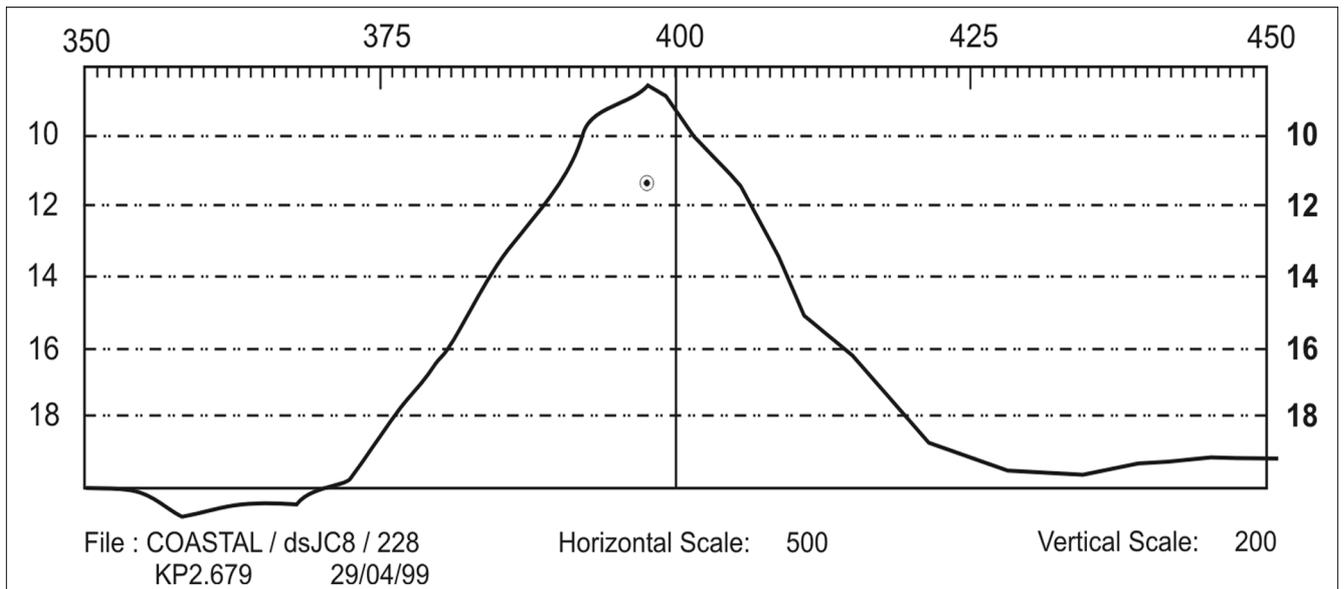


Figure 8: Formation of two scour holes around the buried pipelines

Bild 8: Bildung zweier Kolke auf beiden Seiten der mit Steinen bedeckten Pipelines

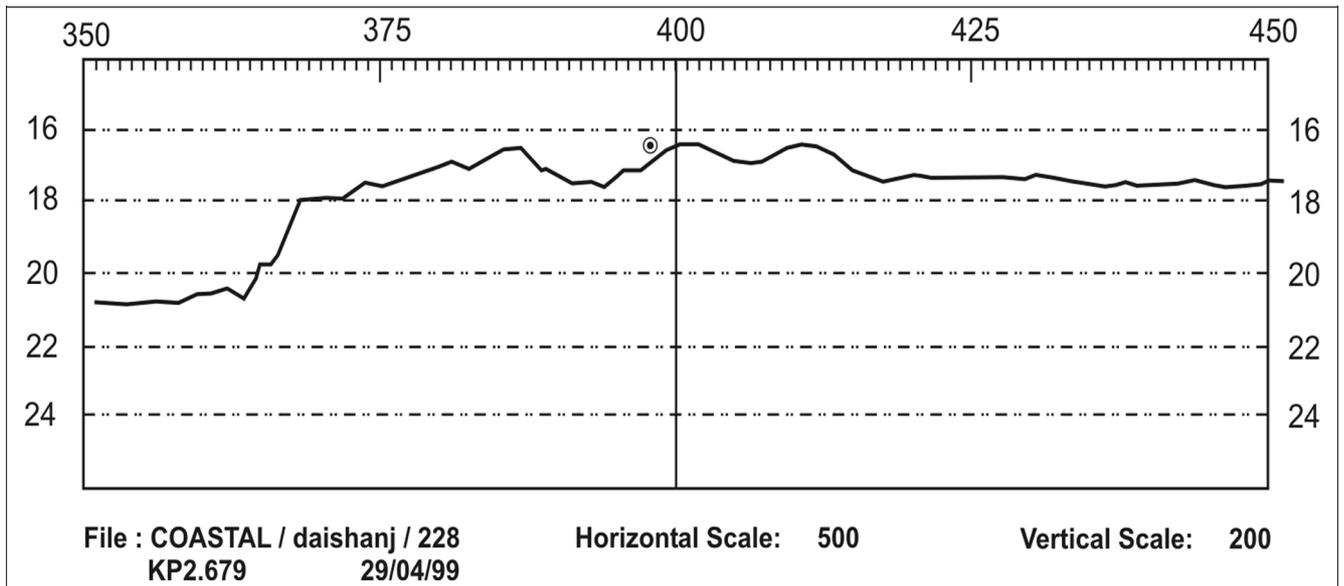


Figure 9: Exposure of buried pipeline

Bild 9: Freiliegen der eingebetteten Pipeline

3.3 Tunnel Scour

3.3.1 Project Description

San Roque Dam in the Philippines was one of the largest dams under construction during the year 2000. Three diversion tunnels were provided to divert flow around the area where the dam was being constructed. The dimensions of the tunnels are shown in Table 1. It was originally intended to line the tunnels with concrete to protect them against the erosive power of water. However, at the point when the walls and roof of the tunnel were lined with concrete, the contractor was lagging behind schedule. It was determined that the contractor

3.3 Kolke in Stollen

3.3.1 Baubeschreibung

Die San Roque-Talsperre auf den Philippinen gehörte zu den größten Sperrern, die im Jahr 2000 im Bau waren. Es waren drei Umleitungsstollen vorgesehen, um den Abfluss um die Baustelle herum zu gewährleisten. Die Abmessung der Stollen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Es war ursprünglich geplant, die Tunnel mit Beton auszukleiden, um sie gegen Erosion zu schützen. Als jedoch Firste und Ulmen der Stollen mit Beton ausgekleidet waren, geriet die Baufirma in Zeitverzug. Der Zeitverzug könnte wettgemacht werden, wenn auf die Be-

could make up for lost time if the floors of the tunnels could be left without concrete lining. In order to determine whether such an approach would be feasible, it was required to investigate the erodibility of the rock and assess whether it would scour under flood conditions. The erodibility of the rock in the tunnels were determined by means of Annandale's Method (Annandale 1995), and recommendations were made as to which portions of the tunnel had to be lined, and which portions could remain unlined. By advancing the construction schedule, the contractor was able to save approximately US\$ 1 million in interest charges every four days.

3.3.2 Erodibility of Tunnel

In general it was determined that the entrances to and exits from the tunnels had to be lined, but that the remainder of the rock within the tunnels was strong enough to resist the erosive power of the water. Six classes of rock were identified, i.e. the rock at the entrances to and exits from the tunnels, and four other types that were named Type I, Type II – High strength, Type II-Low strength, and Type III. Type I was identified as erosion resistant rock, and Type III as not erosion resistant. The recommendations as shown in Table 2 and 3.

tonauskleidung der Sohle verzichtet würde. Um herauszufinden, ob solch eine Bauweise möglich ist, sollte die Erodierbarkeit des Fels untersucht und abgeschätzt werden, ob beim Durchströmen Kolke zu erwarten sind. Die Erodierbarkeit des Fels wurde nach dem Verfahren von Annandale (1995) ermittelt. Daraus wurden Empfehlungen abgeleitet, welche Teile des Tunnels ausgekleidet werden mussten und welche unausgekleidet bleiben konnten. Durch die Beschleunigung des Baufortschritts konnte der Unternehmer ca. 1 Mill. \$ je vier Tage einsparen.

3.3.2 Erodierbarkeit des Stollens

Grundsätzlich wurde festgestellt, dass die Stollenein- und Ausgänge ausgekleidet werden mussten, dass jedoch auf der verbleibenden Strecke der Fels fest genug war, um der Erosionswirkung des Wassers zu widerstehen. Der Fels wurde in sechs Klassen eingeteilt, d. h. Fels an den Ein- und Ausgängen des Stollens und vier weitere Felsarten mit den Bezeichnungen Typ I, Typ II/hohe Festigkeit, Typ II/geringe Festigkeit und Typ III. Typ I war erosionsfester Fels, Typ III war nicht erosionsfest. Die entsprechenden Empfehlungen sind in Tabelle 2 und 3 aufgelistet.

Tunnel No.	Width / Breite (m)	Height / Höhe (m)	Length / Länge (m)	U/S invert / Oberwassersohle (m)	D/S invert / Unterwassersohle (m)
1	10.4	14.5	852.5	115	104.55
2	10.4	14.5	888.3	115	104.5
3	6	6	816.8	110	104.55

Table 1: Tunnel dimensions

Tabelle 1: Tunnelabmessungen

Rock Type / Felstyp	Entrance / Eingang	Exit / Ausgang	Straight / Gerade	Bend / Krümmung	Flare / Erweiterung
U/S / Oberwasser	Scour / Kolk				
D/S / Unterwasser		Scour / Kolk			
I			No Scour / kein Kolk	No Scour / kein Kolk	No Scour / kein Kolk
II-high / II-hoch			No Scour / kein Kolk	No Scour / kein Kolk	No Scour / kein Kolk
II-low / II-niedrig			Scour / Kolk	Scour / Kolk	Scour / Kolk
III			Scour / Kolk	Scour / Kolk	Scour / Kolk

Table 2: Scour potential in Tunnels 1 and 2

Tabelle 2: Kolkpotenzial in den Tunneln 1 und 2

Rock Type / Felstyp	Entrance / Eingang	Exit / Ausgang	Straight / Gerade	Bend / Krümmung	Flare / Erweiterung
U/S / Oberwasser	Scour / Kolk				
D/S / Unterwasser		Scour / Kolk			
I			No Scour / kein Kolk	No Scour / kein Kolk	No Scour / kein Kolk
II-high / II-hoch			No Scour / kein Kolk	No Scour / kein Kolk	No Scour / kein Kolk
II-low / II-niedrig			No Scour / kein Kolk	No Scour / kein Kolk	Potentially scour resistant ¹⁾ Potenzieller Kolkwiderstand ²⁾

¹⁾ Potentially scour resistant up to 100 year flood. However, scour could occur for flood magnitudes greater than the 30 year flood.
²⁾ Potenzieller Kolkwiderstand bis zum 100-jährlichen Abfluss. Mögliche Kolkbildung bei mehr als 30-jährlichem Abfluss.

Table 3: Scour potential in Tunnel 3

Tabelle 3: Kolkpotenzial im Tunnel 3

3.3.3 Observations

During the course of construction floods occurred that substantially filled the tunnels with water, up to 3,500 m³/s, which is equivalent to approximately the 10-year flood. Observations after the floods confirmed the recommendations. No significant scour of the tunnel floors was observed, with the tunnels remaining intact to perform their function. Figure 10 shows the inside of the tunnel and its exit during flooding, and its floor after the floods respectively. Figure 11 shows the floor of the tunnel after the flood event, remaining essentially intact.



Figure 10: Interior view of tunnel entrance and flood passing at exit

Bild 10: Innenansicht des Stolleneingangs und Abfluss am Stollenausgang

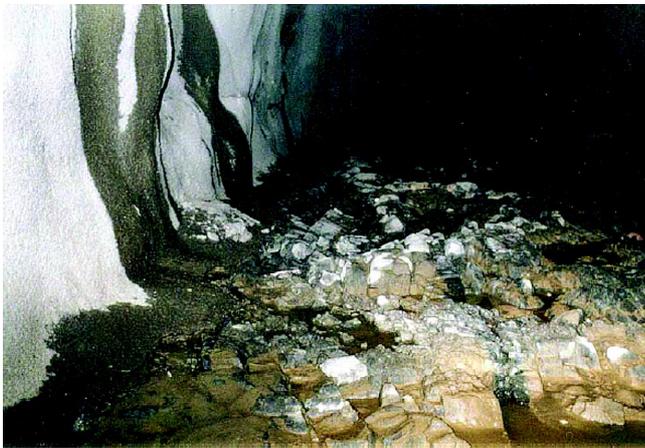


Figure 11: Unlined rock floor of tunnel after flood, remaining essentially intact

Bild 11: Tunnelsohle nach dem Hochwasser, im Wesentlichen unzerstört

3.3.3 Beobachtungen

Während der Bauzeit traten Abflüsse auf, die die Stollen mit Abflüssen bis zu 3500 m³/s beanspruchten, was fast dem 10-jährlichen Abfluss entsprach. Die Beobachtungen nach diesen Hochwässern bestätigten die Empfehlungen. Am Tunnelboden wurde keine signifikante Kolkbildung beobachtet, die Stollen blieben intakt und erfüllten ihre Aufgabe. Bild 10 zeigt eine Innenansicht des Stollens und des Stollenausgangs unter Wasserbelastung und den Boden nach dem Abfluss. Bild 11 zeigt die Tunnelsohle nach dem Hochwasser, die im Wesentlichen unzerstört blieb.

4 Zusammenfassung

In dem Beitrag werden die Kolkarten, mit denen der Ingenieur üblicherweise konfrontiert ist, zusammengefasst. Es zeigt sich, dass eine zufriedenstellende Beurteilung von Kolken und die Bemessung von Schutzmaßnahmen gegen Kolkbildung Erfahrungen in Geotechnik, Ingenieurgeologie, Hydraulik und Hydrologie erfordern. Fachwissen und Erfahrung in Geotechnik und Ingenieurgeologie sind erforderlich, um die Widerstandsfähigkeit von Bodenmaterial gegen die erosiven Kräfte des Wassers zu bestimmen, während Hydraulik und Hydrologie erforderlich sind, um die Größe der Erosionskraft des Wassers zu ermitteln. Die meisten Verfahren, die gegenwärtig angewendet werden, berücksichtigen die Widerstandsfähigkeit von Bodenmaterial gegen Erosion nicht ausreichend.

Drei Fallstudien werden in dem Beitrag vorgestellt: Versagen von Brückenpfeilern, Kolk an einer Unterwasserpipeline und Kolk in Umleitungsstollen in Fels. Der Beitrag zeigt, dass die ökonomischen Auswirkungen von Kolkbildungen immens sein können. Im Falle eines Brückeneinsturzes in den USA werden mittlere Kosten von 100 Mill. \$ geschätzt, wobei die indirekten Kosten ca. fünfmal so hoch sind wie die direkten Kosten des Einsturzes. Schäden an Unterwasserpipelines sind infolge der schwierigen Arbeitsbedingungen bei Reparaturen sehr teuer. Die Fallstudie über Umleitungsstollen belegt den Wert eines Ansatzes, um die Erosionsfähigkeit eines Bodens abschätzen zu können, in dem vorliegenden Fall die Erodierbarkeit von Fels. Mit dem Verfahren von Annandale konnte bestimmt werden, welche Stollenbereiche ausgekleidet werden müssen und welche ohne Auskleidung bleiben können. Dadurch konnten Mill. \$ Baukosten eingespart und der Bauzeitplan eingehalten werden.

4 Summary

The types of scour that engineers generally deal with are summarized in the paper. It is concluded that satisfactory analysis of scour and design of protection measures to protect against scour require expertise in geotechnical engineering, engineering geology, and hydraulic and hydrologic engineering. Expertise and experience in geotechnical engineering and engineering geology are required to determine an earth material's ability to resist the erosive power of water, whereas expertise and experience in hydrologic and hydraulic engineering are required to quantify the magnitude of the erosive power of water. Most methods that are currently used in practice do not adequately address the ability of earth material to resist erosion. Three case studies are presented in the paper, dealing with bridge pier failure, submarine pipeline scour, and scour in water conveyance tunnels in rock. The paper points out that the economic impact of scour could be immense. In the case of bridge pier failure, the average cost per failure in the United States of America is estimated to be on the order of US \$100 million, with the indirect cost approximately five times the direct cost of failure. Failure of submarine pipelines is very expensive, because of the difficult conditions to work in when repairing a failure. The case study that dealt with tunnel scour illustrates the value of having the ability to accurately predict the erodibility of earth materials, in this case the erodibility of rock. Annandale's Method (Annandale 1995) was used to determine which parts of the tunnel could remain unlined. This saved the contractor millions of dollars by not having to line the tunnel floor and concurrently advancing the construction schedule.

5 References / Literatur

- Abida, H. and Townsend, R. D. (1991) "Local scour downstream of box-culvert outlets," University of Ottawa, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 117(3), 425-440
- Annandale, G. W. (1995), "Erodibility", Journal of Hydraulic Research, Vol. 33, No. 4, pp. 471-494
- Annandale, G. W., Wittler, R. and Scott, G. A. (2000), "Scour Downstream of Dams", Scour Symposium, ISSMGE GeoEng2000 Conference, Melbourne, Australia
- Arzamendi, M. and Smith, T. (1998) "Tijuana river crossing using horizontal directional drilling a case history," Proceedings of the 1998 Pipeline Division Conference, ASCE, San Diego, CA, 47-56
- Ashmore, P. and Parker, G. (1983) "Confluence scour in coarse braided streams," Water Resources Research, 19(2), 392-402
- Bormann, N. E. and Zeller, M. (1993) "Variations encountered in design analysis of local scour at drop structures," Proceedings of the National Conference on Hydraulic Engineering, ASCE, San Francisco, CA, 391-1396
- Brice, J. C. (1982) "Stream channel stability assessment," Report No. FHWA-RD-82-021, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington D. C., U. S. A., 45pp
- Brice, J. C. and Blodgett, J. C. (1978) "Countermeasures for hydraulic problems at bridges," Vols. 1 and 2, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington D. C., U. S. A
- Cevik, E. and Yuksel, Y. (1999) "Scour under submarine pipelines in waves in shoaling conditions," Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 125(1), 9-19
- Chiew, Y. M. (1990) "Mechanics of local scour around submarine pipelines," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 116(4), 515-529
- Chiew, Y. M. (1991) "Prediction of maximum scour depth at submarine pipelines," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 117(4), 452-466
- de Vries, M. (1981) "Morphological computations," Lecture notes f 10a, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, Netherlands, 70pp
- Doehring, F. K. and Abt, S. R. (1994) "Drop height influence on outlet scour," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 120(12), 1470-1476
- Fredsoe, J. and Sumer, B. M. (1997) "Scour at the round head of a rubble-mound breakwater," Coastal Engineering, 29(3-4), Elsevier Science B. V., Amsterdam, Netherlands, 231-262
- Hickin, E. J. and Nanson, G. C. (1975) "The character of channel migration on the Beaton River, Northwest British Columbia, Canada," Bulletin of the Geological Society of America, Vol. 86, 487-494
- Hoffmans, G.J.C.M. and Verheij, H.J. (1997) "Scour manual," A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 205pp
- Lacey, G. (1930) "Stable channels in alluvium," Paper 4736, Minutes of the Proc., Institution of Civil Engineers, Vol. 229, William Clowes and Sons Ltd., London, Great Britain, 259-292
- Lagasse, P. F. and Richardson, E. V. (2001) "ASCE Compendium of Stream Stability and Bridge Scour Papers," Forum Article, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 127(7), 531-533

- Lagasse, P. F., Schall, J. D., Johnson, F. M., Richardson, E. V. and Chang, F. (1995) "Stream stability at highway structures," Hydraulic Engineering Circular No. 20 (HEC-20), Report No. FHWA-IP-90-014, Federal Highway Administration, U. S. Department of Transportation, Washington, D. C., U. S. A
- Lawler, D. M., Thorne, C. R. and Hooke, J. M., (1997), "Bank Erosion and Instability", in Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management, John Wiley & Sons
- Lim, S. Y. (1995) "Scour below unsubmerged fullflowing culvert outlets," Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water Maritime and Energy, 112(2), Thomas Telford Services Ltd., London, 136-149
- Mason, P.J. and Arumugam, K. (1985) "Free jet scour below dams and flip buckets," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 111(2), 220-235
- Maynard, S. T., (1996), "Toe-Scour Estimation in Stabilized Bendways", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 8, pp. 460 – 464
- Moncada, M., Alix, T. and Aguirre-Pe, J. (1990) "Scour below pipeline in river crossings," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 125(9), 953-958
- Neill, C. R. (1973) (Ed.) "Guide to bridge hydraulics," Roads and Transportation Assoc. of Canada, University of Toronto Press, Toronto, Canada, 191pp
- Odgaard, A. J. (1989a) "River-meander model. I: Development," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 115(11), 1433-1450
- Rice, C. E. and Kadavy, K. C. (1993) "Protection against scour at SAF stilling basins," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 119(1), 133-139
- Richardson, E. V. and Davis, S. R. (1995) "Evaluating scour at bridges," Report No. FHWAIP- 90-017, Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC-18), Third Edition, Office of Technology Applications, HTA-22, Federal Highway Administration, U. S. Department of Transportation, Washington, D. C., U. S. A., November, 204pp
- Sumer, B. M., Fredsoe, J., Christiansen, N. and Hansen, S. B. (1994) "Bed shear stress and scour around coastal structures," Proceedings of the 24th International Conference on Coastal Engineering, Part 2, ASCE, Kobe, Japan, 1595-1609
- Sumer, B. M. and Fredsoe, J. (1990) "Scour below pipelines in waves," Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 116(3), 307-323
- Sumer, B. M. and Fredsoe, J. (1997) "Scour at the head of a vertical-wall breakwater," Coastal Engineering, 29 (3-4) Elsevier Science B. V., Amsterdam, Netherlands, 201-230
- van Rijn, L. C. (1984) "Sediment transport, Part III: Bed forms and alluvial roughness," Journal of Hydraulic Engineering, 110(12), December, 1733- 1754
- Yalin, M. S. (1992) "River mechanics," Pergamon Press, New York, U. S. A