



Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

RIZA Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling

# Bed Level changes and sediment budget of the Rhine near the German - Dutch border

## Summary



# Flussbettentwicklung und Feststoffhaushalt des Rheins im Deutsch - Niederländischen Grenzbereich

## Zusammenfassung

**BFG**

RIZA report 2001.044

# **Bed level changes and sediment budget of the Rhine near the German - Dutch border**

## **Summary**

## **Flussbettentwicklung und Feststoffhaushalt des Rheins im Deutsch - Niederländischen Grenzbereich**

## **Zusammenfassung**

RIZA report 2001.044  
ISBN 9036954002

Authors: Dr. W.B.M. ten Brinke  
Prof. Dr. E. Götz

September 2001

Brinke, W.B.M. ten and E. Götz (2001)

Bed level changes and sediment budget of the Rhine near the German – Dutch border. National Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment (RIZA), The Netherlands, and Federal Institute of Hydrology (BfG), Germany. Report RIZA 2001.044.

Photo cover: bifurcation of the Bovenrijn into the Waal (right) and Pannerdensch Kanaal (left), looking upstream towards the German Border. Rijkswaterstaat, Survey Department.

## Preface

This report is the integration of studies on changes in bed level and sediment budget that have been conducted simultaneously by German and Dutch researchers for parts of the lower Niederrhein and upper Dutch Rhine branches, respectively. These studies have been carried out by Utrecht University for the Dutch contribution and the Technische Hochschule Aachen for the German contribution. The studies have been supervised by the Dutch National Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment (RIZA) and the German Federal Institute of Hydrology (BfG).

This report is the result of a collaboration between the Dutch National Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment (RIZA) and the German Federal Institute of Hydrology (BfG). On behalf of these institutes the projects have been supervised by dr. W.B.M. ten Brinke (RIZA), Dipl.-Ing. B. Dröge and Prof. Dr. E. Gözl (BfG).

The Dutch study has been carried out by drs. H. Schans from Utrecht University. This report is entitled 'Bed level development in Bovenrijn, Pannerdensch Kanaal and the upstream part of the Waal' (Report ICG 98/16). The German study has been carried out by Dipl.-Ing. T. Baur from the Technische Hochschule Aachen. This report is entitled 'Rhein: Flussbettentwicklung und Sedimenthaushalt im Grenzgebiet. Teilprojekt Niederrhein Rhein- km 845 bis 865'. The overall supervision and the integration of the results into this report has been carried out by Dr. Ten Brinke (RIZA).

## Vorwort

Der vorliegende Bericht ist eine Synthese von Untersuchungen über Flussbettentwicklung und Feststoffhaushalt des unteren Niederrheins und des oberen niederländischen Rheindeltas, die gleichzeitig von deutscher und niederländischer Seite durchgeführt wurden. Die Untersuchungen wurden für die Niederlande von der Universität Utrecht, und für die Bundesrepublik Deutschland von der Technischen Hochschule Aachen durchgeführt. Die Beaufsichtigung erfolgte vom niederländischen Staatlichen Amt für Integralverwaltung der Binnengewässer und Abwasserreinigung (RIZA) und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

Dieser Bericht ist das Ergebnis einer Zusammenarbeit des niederländischen Staatlichen Amt für Integralverwaltung der Binnengewässer und Abwasserreinigung (RIZA) und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in der Bundesrepublik Deutschland. Die Projekte wurden von Dr. W. B. M. Ten Brinke (RIZA), Dipl.-Ing. B. Dröge und Prof. Dr. E. Gözl (BfG) betreut.

Die Untersuchung auf niederländischer Seite wurde von Dr. H. Schans an der Universität Utrecht durchgeführt. Der Bericht trägt den Titel: „Bed level development in Bovenrijn, Pannerdensch Kanaal and the upstream part of the Waal“ (Bericht ICG 98/16). Die deutsche Untersuchung wurde durchgeführt von Dipl.-Ing. T. Baur an der Technischen Hochschule Aachen. Der Titel des Berichtes lautet: „Rhein: Flussbettentwicklung und Sedimenthaushalt im Grenzgebiet. Teilprojekt Niederrhein Rhein- km 845 bis 865“. Die Federführung und das Zusammenfügen der Ergebnisse für diesen Bericht wurde von Dr. Ten Brinke (RIZA) übernommen.

## Introduction

The German Niederrhein and connecting Dutch Rhine branches is an example of a river in a densely populated area where many man-induced changes in the river system have taken place over the last centuries. In the end, these changes may all have a certain effect on river morphology. The combined effect of all these influences is an overall degradation which took place at least since the beginning of the 20<sup>th</sup> century and is still going on (Visser, 2000; Taal, 1994; Dröge et al., 1993).

This project aims at *'quantifying river bed development, water level changes and sediment budget changes of a part of the river Rhine, being 40 km of Niederrhein, Bovenrijn, Waal and Pannerdensch Kanaal, as well as analysing the influence of natural processes and human interference on river bed development'*.

Besides, it is a start to coordinate German and Dutch approaches of data gathering and data analysis within a project.

It was decided that the part of the Rhine to be studied should be at least 40 km long over the longest time span possible. This time span depends on availability of data gathered simultaneously in Germany and The Netherlands. Therefore, the analysed data set is 20 years long, starting in 1975. Data before 1975 is available but is gathered neither simultaneously in both countries nor on a regular basis. Differences and similarities between Dutch and German data and their way of data handling have been studied in detail in the border area between Rhine-km 857.4-865.4. In that area both German and Dutch data are available.

## Einleitung

Der deutsche Niederrhein und das anschließende niederländische Rheindelta sind ein Beispiel für einen Fluss in einem dicht besiedelten Gebiet, in dessen Regime der Mensch in den letzten Jahrhunderten stark eingegriffen hat. All diese anthropogenen Veränderungen dürften die flussmorphologische Entwicklung beeinflusst haben. Das Resultat dieser Eingriffe ist eine Flussbetteintiefung, die mindestens seit dem Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts nachgewiesen ist und weiter andauert (Visser, 2000; Taal, 1994; Dröge et al., 1993).

Ziel des Projektes ist es, *Flussbettentwicklung, Veränderungen des Wasserspiegels und Veränderungen des Feststoffhaushalts eines Teils des Rheins, nämlich insgesamt 40 km von Niederrhein, Bovenrijn, Waal und Pannerdensch Kanaal, zu quantifizieren, sowie den Einfluss der natürlichen Prozesse und anthropogenen Eingriffe auf die Flussbettentwicklung zu analysieren.*

Außerdem ist es ein erster Schritt, um deutsche und niederländische Methoden der Datenbeschaffung und -auswertung in einem Projekt zu koordinieren.

Es wurde festgelegt, dass der zu untersuchende Teil des Rheins mindestens 40 km lang, und der Zeitraum, für den niederländische und deutsche Daten gleichzeitig zur Verfügung stehen, so groß wie möglich sein sollte. Deswegen umfasst der Zeitraum, aus dem die Daten stammen, 20 Jahre und beginnt 1975. Daten vor 1975 sind zwar vorhanden, wurden aber weder gleichzeitig von beiden Ländern noch regelmäßig erhoben. Unterschiede und Übereinstimmungen zwischen niederländischen und deutschen Daten sowie deren Handhabung wurden in der Grenzregion zwischen Rhein- km 857,4 und 865,4, wo sowohl niederländische als auch deutsche Daten vorliegen, im Detail untersucht.

---

Based on the foregoing, the following research questions have been formulated:

- How did the river bed develop during the last 20 years?
- Which factors are responsible for the observed river bed development?
- To what extent can human interference be recognized in river bed development?
- How does dredging affect river bed development?
- Is the way of data gathering and data handling in Germany and The Netherlands comparable?

Darauf aufbauend wurden folgende Fragestellungen formuliert:

- Wie hat sich das Flussbett in den vergangenen 20 Jahren verändert?
- Welche Faktoren sind für die beobachtete Flussbettentwicklungen verantwortlich?
- In welchem Ausmaß kann man menschliches Eingreifen in der Flussbettentwicklung erkennen?
- Wie beeinflusst Baggern die Flussbettentwicklung?
- Ist die Art und Weise der Datenbeschaffung und Datenhandhabung in der Bundesrepublik Deutschland und den Niederlanden vergleichbar?

## Study area

The study area is that part of the river Rhine where the river 'Niederrhein-Bovenrijn' bifurcates into the river Waal and Pannerdensch Kanaal. The study area begins at km 845 (river Niederrhein) and ends at respectively 887 (river Waal) and 878 (Pannerdensch Kanaal) (figure 1). The border between Germany and The Netherlands is between Rhine-km 857.5 and 865.4. This border represents the part of the study area of which an overlap between German and Dutch data is available.

## Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfaßt den Abschnitt des Rheins, an dem der „Niederrhein-Bovenrijn“ sich in die Mündungsarme Waal und Pannerdensch Kanaal aufteilt. Es beginnt bei km 845 (Niederrhein) und endet bei km 887 (Waal) beziehungsweise km 878 (Pannerdensch Kanaal) (Abb. 1). Die Grenze zwischen der Bundesrepublik Deutschland und den Niederlanden befindet sich zwischen Rhein-km 857,5 und Rhein-km 865,4. Dieser Abschnitt repräsentiert den Teil des Untersuchungsgebietes, an dem sowohl niederländische als auch deutsche Daten vorhanden sind.

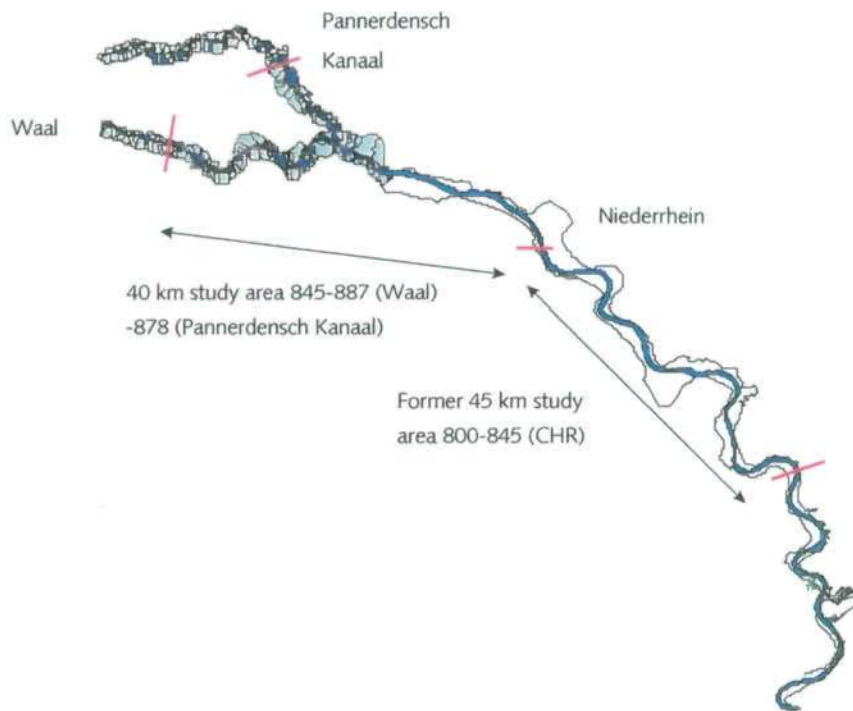


Figure 1. The study area of the 40 km reach near the German-Dutch border and the study area of the preceding CHR-report 45 km upstream.

Abbildung 1. Das Untersuchungsgebiet mit der 40 km-Strecke im Bereich der deutsch-niederländischen Grenze und dem 45 km langen Untersuchungsabschnitt des vorangegangenen CHR-Berichts

---

In addition to the original analyses on the 40 km reach, some of these results were combined with the results of an earlier study on the 45 km reach from Rhine-km 800 to Rhine-km 845 (figure 1), and even results of the Waal downstream of the original study area. This was done in order to get a better insight into the sediment budget of a relatively large part of the Rhine. More specifically, combining data over a 85 km reach enables a better comparison of net bed degradation with downstream changes in sediment transport. Especially since this reach starts immediately downstream of a part of the Rhine that has been subject to extreme lowering due to mining activities. This part has functioned as a large sediment trap over the last years. The results immediately downstream of this part, therefore, refer to a process of increasing sediment load by net erosion of the bed.

Um auch einen Einblick in den Feststoffhaushalt eines größeren Rheinabschnitts zu gewinnen, wurden zusätzlich zur Analyse der 40 km-Strecke die dort erhaltenen Resultate mit Ergebnissen einer früheren Untersuchung im 45 km langen Abschnitt von Rhein- km 800 bis Rhein- km 845 (Abb. 1), und sogar mit Ergebnissen, die in der Waal unterstrom des Untersuchungsgebietes gewonnen wurden, verknüpft. Daten über eine Strecke von 85 km sind eine bessere Grundlage, um beobachtete Sohleneintiefungen mit Veränderungen im Feststofftransport in Zusammenhang zu bringen, besonders auch deswegen, weil der Abschnitt genau unterhalb des Bergsenkungsgebietes beginnt. Dieses Senkungsgebiet wirkt seit Jahrzehnten als eine große Feststofffalle. Daraus resultiert eine starke Erosion und ansteigende Feststofffrachten in der unterstrom anschließenden Strecke.



---

## Results

### Comparability of data

The cross-sectionally averaged bed level according to Dutch and German data do not compare very well. According to the results shown in this study comparability of Dutch data ('Jaarlijkse DwarsPeilingen') with the two different German data sets ('Gesamtquerschnitte' and 'abflusswirksame Querschnitte') is similarly bad. This may be due to differences in the times within a year when the echo soundings have been done, differences in the method of echo sounding (instruments, way of sailing) or differences in the method for calculating cross-sectionally averaged values. Knowing this, one should be careful when combining German and Dutch data in analyses. In the border area, where German and Dutch data are available, complete different cumulative sediment losses were calculated over 5 years time intervals. This was to be expected since differences between the methodology of two datasets is likely to dominate short time interval differences over small parts of the river. One might expect that, when studying longer river reaches, over longer time spans, local differences in bed level data contribute less to the outcomes of the analyses. Indeed, studying changes over a 20 years interval gives the same trends for the Dutch and German datasets. Thus it is concluded that reliable reconstructions of morphological processes can be made with the combined Dutch-German dataset by taking care that this dataset spans over a sufficiently large interval in time and space.

German and Dutch water levels are quite comparable, though minor corrections with respect to different defined characteristic low discharges have to be made. One should be aware that the Dutch linear interpolation of water levels at mean lowest discharge (following the Dutch definition of OLA) is based on a wrong water level at

## Ergebnisse

### Vergleichbarkeit der Daten

Die querschnittsgemittelten Sohlenhöhen, aus niederländischen und deutschen Peilungen, stimmen nicht gut überein. Ebenso schlecht zu vergleichen sind, wie die Ergebnisse dieser Studie belegen, die Daten der niederländischen („Jaarlijkse DwarsPeilingen“) mit den beiden deutschen Datensätzen („Gesamtquerschnitte“ und „abflusswirksame Querschnitte“). Unterschiede in den Datensätzen können daher rühren, dass die Echolotpeilungen zu verschiedenen Zeitpunkten im Jahr durchgeführt wurden, die Methoden der Peilungen anders sind (Geräte, Art der Schiffsführung) oder dass querschnittsgemittelte Sohlenhöhen mit unterschiedlichen Methoden berechnet werden. Aufgrund dieser Tatsachen, sollte man deutsche und niederländische Daten in der Analyse nur mit entsprechender Vorsicht zusammenfügen. In der Grenzregion, in der sowohl niederländische als auch deutsche Daten vorhanden sind, wurden für Intervalle von fünf Jahren komplett unterschiedliche Gesamtmassenverluste ermittelt. Dies war zu erwarten, weil die Unterschiede in den beiden Datensätzen bezogen auf den kurzen Zeitraum und den kurzen Flussabschnitt zu groß waren. Untersuchungen über größere Zeiträume und längere Flussabschnitte sollten trotz lokaler Unterschiede zu einem besseren Ergebnis führen. Tatsächlich zeigt der Langzeitvergleich über 20 Jahre den gleichen Trend für niederländische und deutsche Datensätze. Daraus lässt sich folgern, dass sich zuverlässige Rückschlüsse auf morphologische Prozesse aus der Kombination von niederländischen und deutschen Daten dann ergeben, wenn sie eine ausreichend große Zeitspanne und Strecke abdecken.

Die aus deutschen und niederländischen Messungen abgeleitete Wasserspiegelentwicklung ist recht gut vergleichbar, obwohl kleine Korrekturen aufgrund eines unterschiedlich definierten maßgebenden Niedrigwasserabflusses notwendig waren. Dazu ist anzumerken, dass die in den Niederlanden übliche lineare

---

Emmerich (derived from the German GIQ).

Interpolation der Wasserstände zwischen den Bezugspegeln auf einem falschen Wasserstand in Emmerich basiert, der von der deutschen (GIQ) und nicht der niederländischen (OLA) Definition des maßgebenden Niedrigwasserabflusses abgeleitet wird.

### Long-term bed degradation

The bed level of the Bovenrijn, upper Waal and Pannerdensch Kanaal has been degrading since 1934 at least (figure 2). On the basis of analyses in 20 years time steps, this degradation seems to have increased in time up till now. The yearly net degradation in the Bovenrijn – upper Waal during 1995-1999 was about equal to the yearly net degradation during 1975-1995. This does not mean that bed degradation has been at a maximum since 1975. Results show that the relatively large bed degradation during 1975-1995 is an average over periods with relatively little degradation (1975-1980 and 1990-1995) and a period with relatively much degradation (1980-1990). Thus, bed degradation in the Bovenrijn – upper Waal during 1990-1999 has reduced quite strongly with respect to the foregoing 10 years.

Whereas during 1985-1990 bed degradation in the Dutch part of the study area was at a maximum, it was relatively minor in the German part (figure 3). Thus, in this period local bed gradient in this Niederrhein – Bovenrijn area has changed dramatically.

### Langjährige Sohlenerosion

Die Sohle des Bovenrijn, der oberen Waal und des Pannerdensch Kanaal senkt sich seit mindestens 1934 ab (Abb. 2). Aufgrund der Analysen in Zwanzigjahres-Schritten, scheint sich diese Absenkung bis heute zu verstärken. Die jährliche Nettoeintiefung am Bovenrijn – oberer Waal war 1995- 1999 fast gleich mit der zwischen 1975 und 1995. Dies bedeutet aber nicht, dass damit das Maximum der Sohleintiefung seit 1975 erreicht war. Vielmehr zeigen die Ergebnisse, dass sich die Eintiefung zwischen 1975 und 1995 aus Perioden geringer Erosion (1975-1980 und 1990-1995) und sehr starker Erosion (1980- 1990) zusammensetzt. Somit hat sich die Sohleentiefung am Bovenrijn – oberer Waal in den letzten 10 Jahren eher verringert.

Während zwischen 1985 und 1990 die Eintiefung auf der niederländischen Strecke am höchsten war, fiel sie auf der deutschen Seite relativ gering aus. (Abb. 3). Somit hat sich in dieser Zeit das Sohlgefälle in der Niederrhein- Bovenrijn Strecke dramatisch verändert.

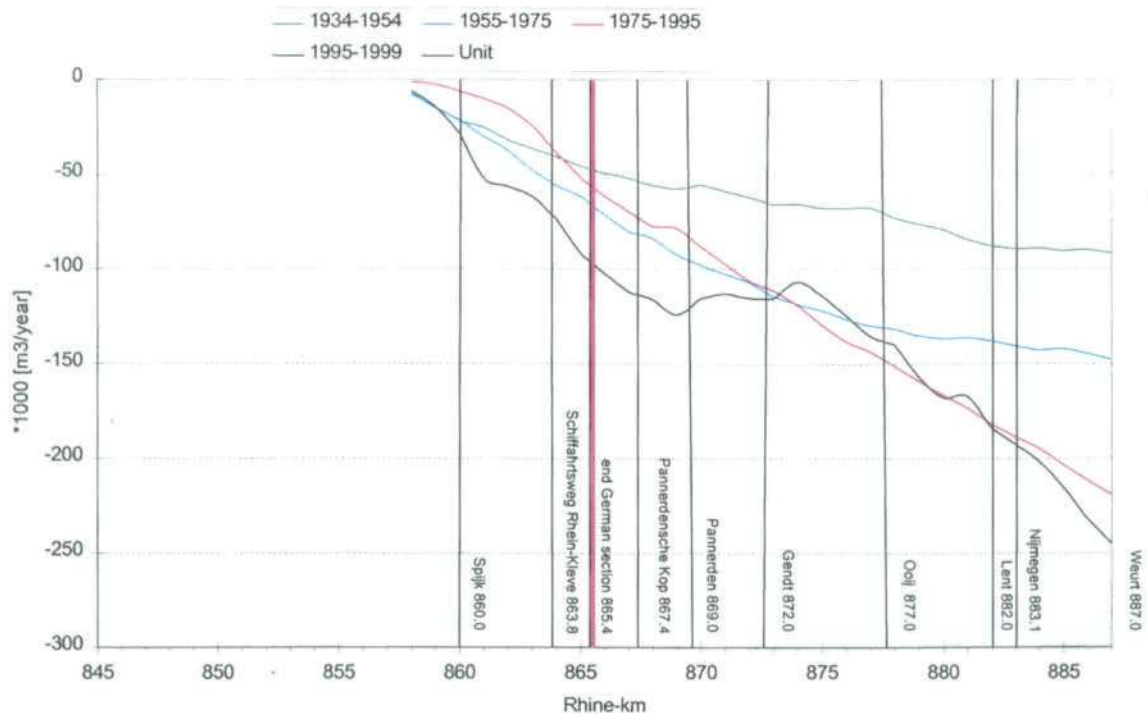


Figure 2. Cumulative net sediment loss per year from the bed along the Bovenrijn – upper Waal due to erosion from the bed during 1934-1999.

Abbildung 2. Kumulativer jährlicher Sohlenvolumenverlust infolge Erosion entlang von Bovenrijn und Waal im Zeitraum 1934-1999

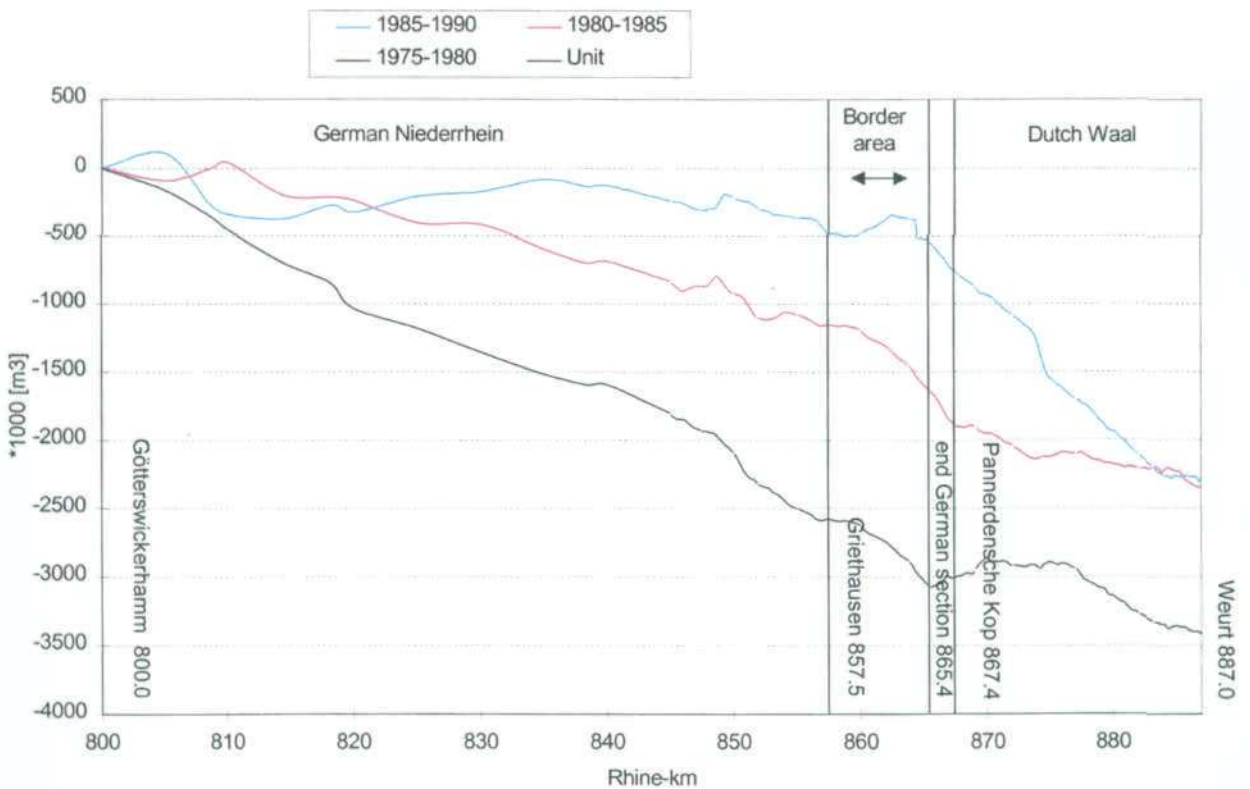


Figure 3. Cumulative net sediment loss per year from the bed along the Niederrhein – Bovenrijn – upper Waal due to erosion from the bed during 1975-1990.

Abbildung 3. Kumulativer jährlicher Sohlenvolumenverlust infolge Erosion entlang von Niederrhein – Bovenrijn – oberer Waal im Zeitraum 1975-1990

## Human interference

Generally, bed degradation in the Niederrhein and the Dutch Rhine branches is related to two major human interferences: (1) dredging, and (2) normalisation works (river training).

According to the available data on dredging, the bed degradation in the study area can only for a small part directly be contributed to dredging in the study area. Indirectly, however, dredging both up- and downstream of the study area may, and most likely will be a major cause for the observed bed degradation. Dredging downstream, which was very extensive in the beginning of the last century in the Waal (figure 4), probably caused erosion upstream due to the artificially dredged nick point migrating upstream. Dredging upstream may have caused some erosion downstream due to the entrapment of sediment in dredged parts of the river bed. With respect to the aspect of sediment being trapped upstream, however, the presence of depressions in the bed due to mining activities is probably more important.

## Anthropogene Einflüsse

Im Allgemeinen ist die Sohlenerosion am Niederrhein und den niederländischen Rheinarmen auf zwei anthropogene Eingriffe zurückzuführen: Strombaggerungen und Regulierungsmaßnahmen.

Ausgehend von den zur Verfügung stehenden Daten kann die Sohlenerosion nur zu einem kleinen Teil mit den Baggerungen im Untersuchungsgebiet selbst in Verbindung gebracht werden. Indirekt jedoch ist und wird den Baggerungen ober- und unterstrom des Gebietes die Verantwortung für einen wesentlichen Teil der Sohlenerosion angelastet. Das Baggern unterstrom, das an der Waal zu Beginn des letzten Jahrhunderts sehr intensiv betrieben wurde (Abb. 4), verursachte wahrscheinlich Erosion weiter oberstrom durch den künstlich geschaffenen Gefälleknick der allmählich nach oberstrom wandert. Baggerungen oberstrom haben wahrscheinlich, durch das Abfangen der Feststofffracht in den gebaggerten Sohlabschnitten eine Erosion unterstrom verursacht. Noch wesentlich stärker dürften sich in dieser Hinsicht die durch Bergbauaktivitäten entstandenen Senkungswannen an der Sohle ausgewirkt haben.

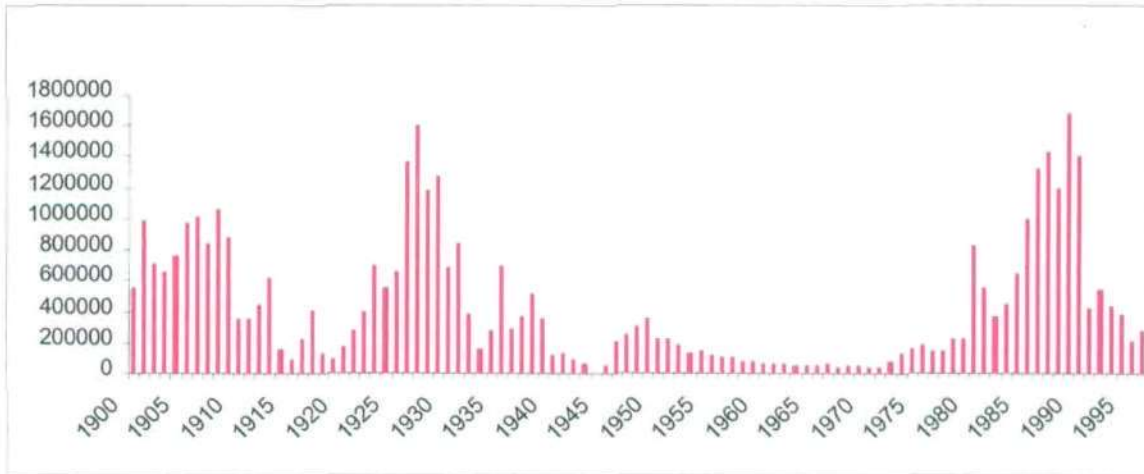


Figure 4. Yearly dredged volumes in the Waal (in  $m^3$ /year) during the last century  
Abbildung 4. Jährliche Baggermengen in der Waal (in  $m^3$ /Jahr) im Lauf des letzten Jahrhunderts

Normalisation works have taken place in the Niederrhein and the Dutch Rhine branches for centuries. In the Dutch Rhine river system especially the normalisation works carried out since 1850 are considered to

Am Niederrhein und den niederländischen Rheinarmen fanden über Jahrhunderte hinweg Flussregelungsarbeiten statt. Besonders die am niederländischen Rheinsystem um 1850 durchgeführten

---

have initiated large-scale bed degradation that is probably still going on at this moment. These normalisation works such as groynes and river straightening have resulted in smaller rivers with steeper gradients. The river morphology will respond by deepening its bed and adjusting its gradient. The time scale of these adjustments depends on the length of the river reach and the amount of sediment transport, and is in the order of a few to several centuries for the Dutch Rhine branches and the Niederrhein. This adjustment will have been accelerated by large-scale dredging (figure 4). A recent study on bed degradation in the Dutch Rhine river system indicates that a large part of the adaptation of the Rhine morphology to the normalisation works has probably already taken place (Visser, 2000). Recent echo soundings, however, point at a bed degradation that is still going on in the border area.

Maßnahmen haben eine Sohlenerosion ausgelöst, die bis heute anhalten dürfte. Bühnenbau und Begradigungen haben zu einer Einengung des Mittelwasserbettes und zu einer Verstärkung des Gefälles geführt, worauf der Fluss mit Eintiefen der Sohle und Neueinstellung des Gefälles reagiert. Die Dauer dieser morphologischen Anpassung hängt von der Länge des Flusses und vom Feststofftransport ab, und liegt für den Niederrhein und die niederländischen Rheinarme in der Größenordnung von mehreren Jahrhunderten. Der Anpassungsprozess kann durch großräumiges Baggern beschleunigt werden (Abb. 4). Eine neue Studie über die Sohlenerosion des niederländischen Rheinsystems hat ergeben, dass sich dort die Rheinmorphologie zum großen Teil schon an die Regelungsmaßnahmen angepasst hat (Visser, 2000). Vor kurzem durchgeführte Echolotpeilungen zeigen jedoch, dass die Sohleintiefung in der Grenzregion weiter fortschreitet.

## Lowering of the water level

For the entire study area a more or less continuous lowering of the water level at the characteristic low discharges is observed. The lowering amounts up to 1.5 m in 60 years. Except for 1991-1992, the German and Dutch data seem to connect quite well. The influence of the building of three weirs in the Nederrijn-Lek and the closure of the Haringvliet is observed in the period 1962-1972 when the characteristic low water level increased in the Bovenrijn - Waal and Bovenrijn - Pannerdensch Kanaal area.

## Wasserspiegelsenkung

Für das gesamte Untersuchungsgebiet ist ein mehr oder weniger kontinuierliches Absinken des Wasserspiegels bei dem maßgebenden Niedrigwasserabfluss zu beobachten. Die Absenkung beträgt bis zu 1,5 m in sechzig Jahren. Die deutschen und niederländischen Daten passen, bis auf die Jahre 1991-1992, gut zusammen. Der Einfluss des Baus von drei Wehren im Nederrijn-Lek und die Schließung der Haringvliet lässt sich in der Periode von 1962-1972 beobachten, als sich der maßgebende Niedrigwasserstand (MLW) in der Bovenrijn- Waal und Bovenrijn-Pannerdensch Kanaal Strecke erhöhte.

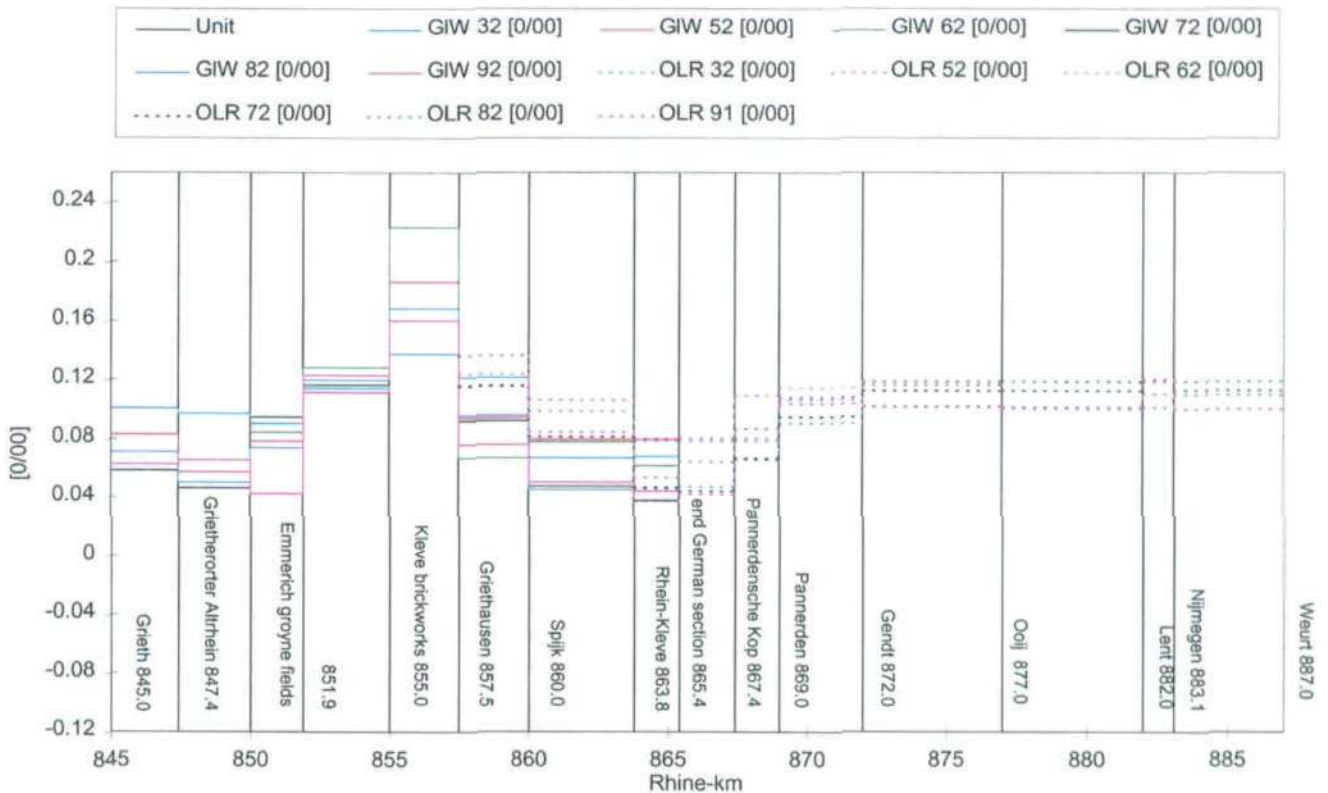


Figure 5. Water level gradient at the characteristic low discharges GIQ, 1020 m<sup>3</sup>/s (German) and OLA, 984 m<sup>3</sup>/s (Dutch), averaged per regional unit. Reach Niederrhein - Bovenrijn - Waal.

Abbildung 5. Wasserspiegelgefälle bei den maßgebenden Niedrigwasserabflüssen GIQ, 1020 m<sup>3</sup>/s (Deutschland) und OLA, 984 m<sup>3</sup>/s (Niederlande) gemittelt über Regionaleinheiten im Bereich Niederrhein - Bovenrijn - Waal

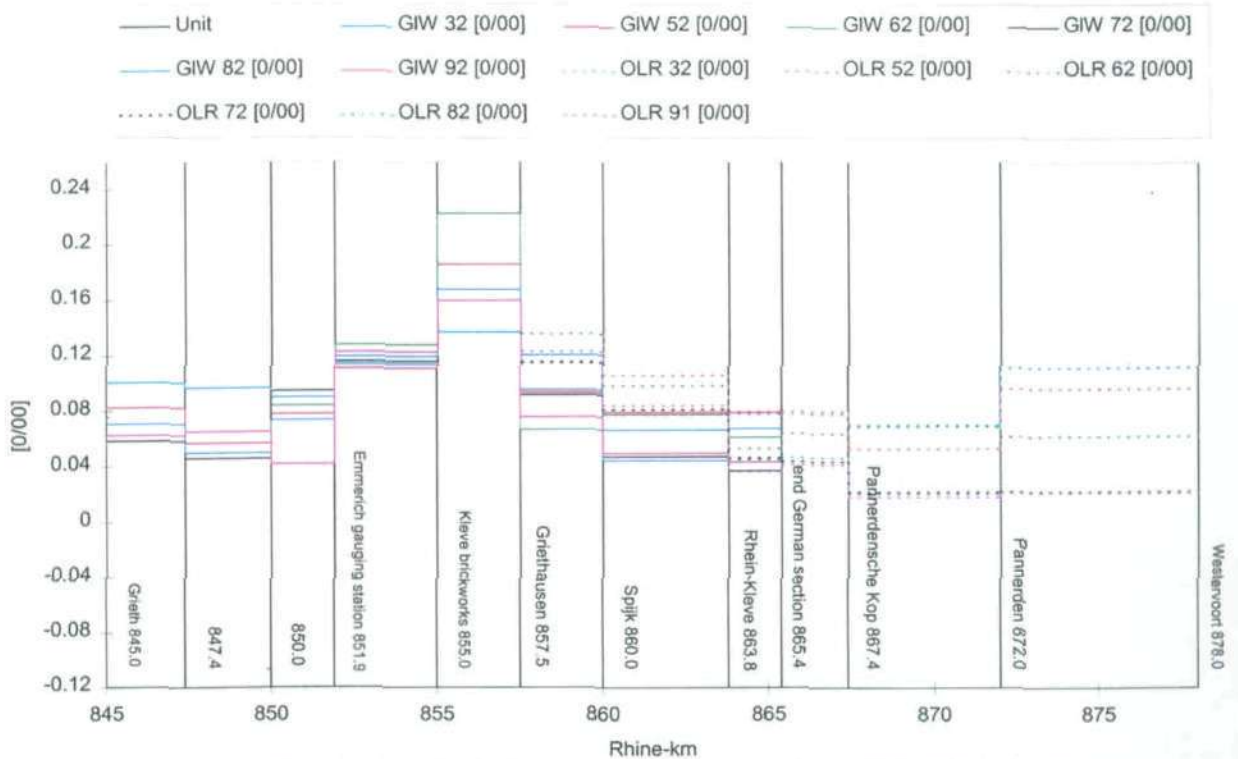


Figure 6. Water level gradient at the characteristic low discharges GIQ, 1020 m<sup>3</sup>/s (German) and OLA, 984 m<sup>3</sup>/s (Dutch), averaged per regional unit. Reach Niederrhein – Bovenrijn – Pannerdensch Kanaal.

Abbildung 6. Wasserspiegelgefälle bei den maßgebenden Niedrigwasserabflüssen GIQ, 1020 m<sup>3</sup>/s (Deutschland) und OLA, 984 m<sup>3</sup>/s (Niederlande) gemittelt über Regionaleinheiten im Bereich Niederrhein – Bovenrijn – Pannerdensch Kanaal.

The water level drops relatively sharp near Rhine-km 853-857. At this point water level gradient is relatively high (figures 5 and 6). Downstream Rhine-km 857 water level gradient reduces again until the bifurcation near Rhine-km 867.4. Further downstream water level gradient changes in time were different for the upper Waal (figure 5) and the Pannerdensch Kanaal (figure 6), respectively. For the Bovenrijn – Waal section water level gradient increased until Rhine-km 872 and then remained more or less constant. This spatial variation did not change much during 1932-1991. For the Bovenrijn – Pannerdensch Kanaal section the initial increasing water level gradient at MLW downstream reduced in time. Thus, in 1999 the water level gradient at MLW in the Bovenrijn – Pannerdensch Kanaal section was far less than the water level gradient in the Bovenrijn – Waal section.

Der Wasserspiegel fällt bei Rhein- km 853-857 relativ abrupt ab. Entsprechend hoch ist an diesem Punkt das Wasserspiegelgefälle (Abb. 5 und 6). Unterstrom von Rhein- km 857 reduziert sich das Wasserspiegelgefälle erneut bis zur Verzweigung bei Rhein- km 867,4. Rückblickend hat sich weiter unterstrom das Wasserspiegelgefälle über die Zeit unterschiedlich für den oberen Waal (Abb.5) und den Pannerdensch Kanaal (Abb. 6) entwickelt. In der Bovenrijn-Waal Strecke erhöhte sich das Wasserspiegelgefälle bis Rhein- km 872, um dann mehr oder weniger konstant zu bleiben. An dieser räumlichen Aufteilung hat sich zwischen 1932 und 1991 nicht viel verändert. In der Bovenrijn-Pannerdensch Kanaal Strecke reduzierte sich das anfänglich steigende Wasserspiegelgefälle bei MLW im Lauf der Zeit nach unterstrom. Infolgedessen war 1999 das Wasserspiegelgefälle bei MLW in der Bovenrijn-Pannerdensch Kanaal Strecke sehr viel geringer als in der Bovenrijn-Waal Strecke.

Table 1. Average bed degradation and water level lowering rate (cm/year) for parts of the study area (regional units combined) and more or less comparable periods of time, and the ratio between these values.

Tabelle 1. Durchschnittliche Sohleneintiefungs- und Wasserspiegelsenkungsraten (cm/Jahr) für ausgewählte Teilbereiche des Untersuchungsgebiets (mehrere Regionaleinheiten zusammengenommen) und für mehr oder weniger vergleichbare Zeiträume einschließlich dem Verhältnis beider Werte.

|                                |                      | Reach               | 1934-1954   | 1955-1974   | 1975-1985   | 1985-1995   |
|--------------------------------|----------------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Bed level                      | Km800-845            | Niederrhein         |             |             | -1.91       |             |
| Water level                    | Km800-845            | Niederrhein         |             |             |             |             |
| <b>bed level / water level</b> | <b>Km800-846</b>     | <b>Niederrhein</b>  |             |             |             |             |
| Bed level                      | km845-857.5          | Niederrhein         |             |             | -2.91       | -1.37       |
| Water level                    | km845-857.5          | Niederrhein         | -2.59       | -2.71       | -2.05       | -1.52       |
| <b>bed level / water level</b> | <b>km845-857.6</b>   | <b>Niederrhein</b>  |             |             | <b>1.42</b> | <b>0.90</b> |
| Bed level                      | km857.5-867.4        | Bovenrijn           | -1.63       | -2.35       |             | -1.38       |
| Water level                    | km857.5-867.4        | Bovenrijn           | -2.79       | -1.93       | -2.17       | -1.30       |
| <b>bed level / water level</b> | <b>km857.5-867.5</b> | <b>Bovenrijn</b>    | <b>0.59</b> | <b>1.22</b> |             | <b>1.06</b> |
| Bed level                      | km867.4-887          | Upper Waal          | -0.78       | -1.41       | -2.60       | -4.00       |
| Water level                    | km867.4-887          | Upper Waal          | -2.93       | -0.52       | -1.36       | -3.40       |
| <b>bed level / water level</b> | <b>km867.4-888</b>   | <b>Upper Waal</b>   | <b>0.27</b> | <b>2.73</b> | <b>1.91</b> | <b>1.17</b> |
| Bed level                      | km867.4-878          | Pann. Kanaal        |             |             | -5.54       | -2.05       |
| Water level                    | km867.4-878          | Pann. Kanaal        | -3.11       | -0.65       | -1.90       | -2.01       |
| <b>bed level / water level</b> | <b>km867.4-879</b>   | <b>Pann. Kanaal</b> |             |             | <b>2.91</b> | <b>1.02</b> |

### Bed degradation versus Water level lowering

In order to be able to compare the results, bed level degradation rate and water level lowering rate were averaged over nearly the same periods of time (table 1). In this table the ratio between bed degradation rate and water level lowering rate was quantified as well. Under the assumption that the lowering of the bed is reflected in the lowering of the water level, this ratio should be near 1. Generally, however, this is not the case. Only for the period 1985-1995 this ratio does not deviate too much from 1. The apparent discrepancies are probably mainly due to the fact that water level lowering represents an average process on a much longer spatial scale than the local bed degradation per regional unit.

### Sohlenerosion und Wasserspiegelsenkung in Vergleich

Um die Ergebnisse vergleichen zu können, wurden die Sohleintiefung und die Wasserspiegelabsenkung ungefähr über gleiche Zeitabschnitte gemittelt (Tab.1). In dieser Tabelle sind auch Werte für das Verhältnis zwischen Sohleintiefung und Wasserspiegelabsenkung enthalten. Unter der Annahme, dass die Absenkung der Sohle sich in der Absenkung des Wasserspiegels widerspiegelt, müsste das Verhältnis bei 1 liegen. Dies ist im allgemeinen nicht der Fall. Nur in der Periode von 1985- 1995 weicht das Verhältnis nicht stark von 1 ab. Die festgestellten Abweichungen haben ihre Ursache wahrscheinlich darin, dass die Wasserspiegelabsenkung einen Ausgleichsprozess repräsentiert, der sich über einen größeren Stromabschnitt erstreckt als die lokale Sohlabsenkung einer Regionaleinheit.



## The sediment budget

A sediment budget is a balance between input and output terms and erosion and sedimentation terms. In the study area the erosion and sedimentation terms refer to exchange with the bed and the sandy banks for the German data ('Gesamtquerschnitte') whereas these terms refer to exchange with the bed only for the Dutch data. In the sediment budget it is therefore implicitly assumed that exchange with the banks (erosion and deposition in the groyne fields mainly) is negligible.

In the sediment budget of the study area the amount of dredging is relatively small relative to the erosion of the bed, both for the German and the Dutch part of the study area. The sediment input into the study area was derived from measurements. In this sediment input the 2/3 of the suspended sand load that is not assumed to exchange with the bed of the Niederrhein is also included. This is done because part of this load will exchange with the bed further downstream in the study area. When making a sediment budget over a relatively large part of the river one should consider total sediment load (bed load plus suspended load) since the part of the sediment load that exchanges with the bed will not be constant.

By combining the results of the study area with the results of a previous CHR-study for a 45 km reach immediately upstream of the study area, a balanced budget could be made for a relatively long reach of the German-Dutch Rhine, starting at Rhine-km 800 on the Niederrhein and ending some kilometres downstream the bifurcation near Pannerden in both the Waal and the Pannerdensch Kanaal. The beginning at Rhine-km 800 is of particular interest since this is just downstream a part of the

## Feststoffbilanz

Bei einer Feststoffbilanz werden die Beträge von Feststoffeintrag und Feststoffaustrag den Erosions- und Sedimentationsbeträgen gegenübergestellt. Im Untersuchungsgebiet beziehen sich Erosion und Sedimentation, was die deutschen Daten („Gesamtquerschnitte“) betrifft, auf den Bereich der Sohle und der sandigen Ufer, hingegen nur auf die Sohle bei den niederländischen Daten. Für die Aufstellung der Feststoffbilanz wird deswegen implizit angenommen, dass die Prozesse im Uferbereich (hauptsächlich Erosion und Ablagerung in den Bühnenfeldern) vernachlässigbar sind.

Im gesamten Untersuchungsgebiet, sowohl im deutschen als auch im niederländischen Teil, spielen aktuelle Baggerungen im Vergleich zum Erosionsprozess eine untergeordnete Rolle. Der Feststoffeintrag in das Untersuchungsgebiet wurde aus Feststoffmessungen hergeleitet. In diesem Feststoffeintrag sind auch die zwei Drittel der suspendierten Sandfracht enthalten, von denen angenommen wird, dass sie nicht mit der Sohle in Wechselwirkung stehen. Dies war notwendig, weil dieser Teil der Feststofffracht sehr wohl weiter unterstrom im Untersuchungsgebiet im Austausch mit der Sohle steht. Es muss die Gesamtfracht (Geschiebefracht plus suspendierte Sandfracht) betrachtet werden, wenn man eine Feststoffbilanz über einen relativ langen Flussabschnitt aufstellen will, denn der Anteil des suspendierten Sandes, der mit der Sohle in Wechselwirkung steht, bleibt nicht konstant.

Indem die Ergebnisse dieser Studie mit den Ergebnissen einer früheren CHR-Studie über den 45 km-Abschnitt direkt oberstrom des Untersuchungsgebietes kombiniert wurden, konnte eine ausgewogene Bilanz über einen relativ großen Abschnitt des deutsch-niederländischen Rheins erstellt werden, die bei Rhein-km 800 am Niederrhein beginnt und einige Kilometer unterstrom der Gabelung bei Pannerden endet. Der Beginn bei Rhein-km 800 ist deshalb von besonderem Interesse, weil er am Ende eines

Niederrhein that is characterized by a substantial lowering of the bed in past decades due to mining activities. These areas act as sediment traps and the input of sediment into the budget at Rhine-km 800 is relatively low

Abschnitts des Niederrheins liegt, der aufgrund des Kohlebergbaus seit einigen Jahrzehnten im Senken begriffen ist. Da dieser Bereich als Feststofffalle fungiert, ist der Feststoffeintrag bei km 800 relativ gering.

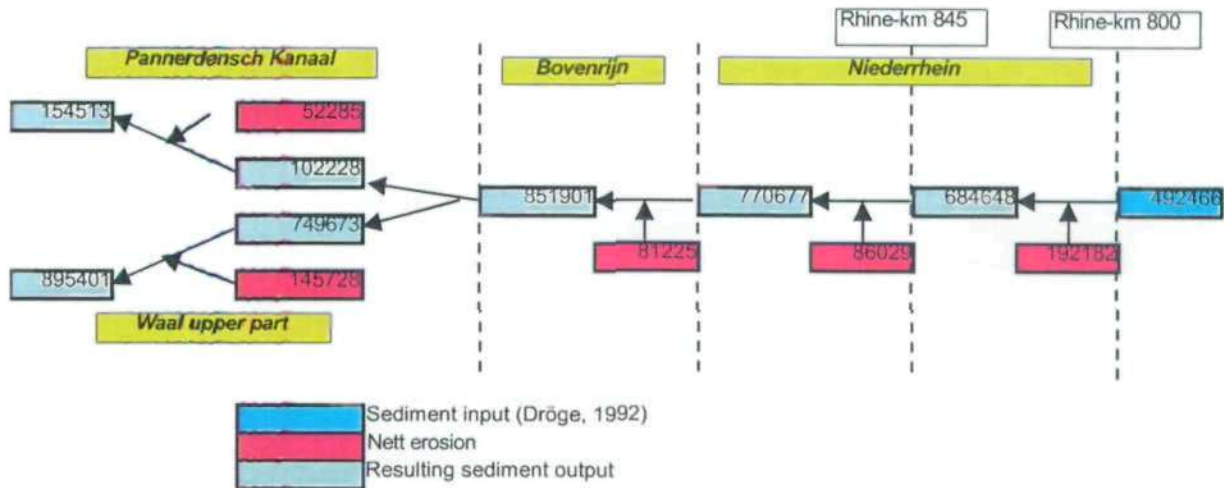


Figure 7. The budget of sand and gravel in between Rhine-km 800 and 887 (Waal) and 878 (Pannerdensch Kanaal) for the period 1975-1995.

Abbildung 7. Feststoffbilanz für Sand und Kies zwischen Rhein-km 800 und 887 (Waal) bzw. 800 und 878 (Pannerdensch Kanaal) für den Zeitraum 1975-1995

A sediment budget is presented for the Rhine in between Rhine-km 800 and Rhine-km 887 (Waal) and 878 (Pannerdensch Kanaal) for the period 1975-1995 (figure 7). Net erosion was quantified for 5 parts of this study area: the previous studied reach in between Rhine-km 800 and 845, the German part of the study area (Niederrhein), the Bovenrijn, and the upstream parts of the Waal and the Pannerdensch Kanaal, respectively. Starting with the sediment input upstream, the throughput of sediment load between the 5 parts of the study area and the output downstream is calculated by combining the erosion terms downstream step by step. The realistic value of this budget can be evaluated by comparing the throughput in the German part with the results of sediment transport measurements, and by comparing the results further downstream with the sediment budget of the Dutch Rhine river system for the period 1970-1990. The sediment output out of the study area is about 150,000 m<sup>3</sup>/year larger than the input of the sediment budget for

In Abb. 7 ist die Feststoffbilanz für Rhein- km 800 bis Rhein- km 887 (Waal) und Rhein- km (878) Pannerdensch Kanaal zwischen 1975 und 1995 dargestellt. Die Nettoerosion wurde für 5 Abschnitte des Untersuchungsgebietes quantifiziert: den früher untersuchten Abschnitt zwischen Rhein- km 800 und 845, den deutschen Abschnitt des Untersuchungsgebietes, den Bovenrijn und die oberen Abschnitte der Waal und des Pannerdensch Kanaal. Beginnend mit dem Feststoffeintrag von oberstrom wurden der Durchgang der Feststofffracht in den 5 Abschnitten und der Austrag nach unterstrom berechnet, indem die Erosionsbeträge Schritt für Schritt nach unterstrom hinzuaddiert wurden. Die Qualität dieser Bilanz kann abgeschätzt werden, indem man den Feststoffdurchgang im deutschen Abschnitt mit den Ergebnissen der Feststofftransportmessungen vergleicht, und indem man die Ergebnisse weiter unterstrom mit der Bilanz des niederländischen Rheins von 1970- 1990 vergleicht. Der Feststoffaustrag aus dem

the Dutch Rhine river system. Probably, the output out of the study area is overestimated since the budget for the Dutch Rhine river system is well balanced and the input upstream into the Dutch Rhine is substantiated by independent German measurements. The overestimation for the budget in figure 7 may be due to an overestimation of the input of the wash load sand transport at Rhine-km 800. A comparison between the sediment load increase of bed load plus the suspended load that exchanges with the bed agrees very well with the cumulative net erosion along the Niederrhein. The latter components of the sediment load, therefore, seem to be realistic. Other possible causes for the overestimation of sand and gravel output, such as an overestimation of erosion, or an underestimation of dredging and sediment losses to the levees and the floodplain, may also play a role. But these causes seem less likely since these terms in the sediment budget have been substantiated quite well.

Untersuchungsgebiet ist ungefähr 150.000 m<sup>3</sup>/a größer als der Feststoffeintrag, den die niederländische Bilanz aufweist. Wahrscheinlich wird der Austrag aus dem Untersuchungsgebiet überschätzt, denn die Bilanz für das niederländische Rheinsystem ist gut ausgeglichen und der Eintrag in den niederländischen Rhein ist durch unabhängige deutsche Messungen bestätigt. Die Überschätzung in Abb. 7 kommt möglicherweise durch eine Überbewertung des Eintrags des ständig in Suspension befindlichen Sandes bei Rhein-km 800 zustande. Die Frachterhöhung des Geschiebes und des suspendierten Sandes, der sich mit der Sohle austauscht, passt sehr gut zur gesamten Nettoerosion längs des Niederrheins. Diese Komponenten der Feststofffracht scheinen deswegen realistisch bewertet zu sein. Möglicherweise spielen für die Überschätzung des Sand- und Geschiebeausstrags aber auch andere Faktoren eine Rolle, wie die Überschätzung der Erosion, die Unterschätzung der Baggerungen oder Feststoffverluste durch Ablagerungen im Bereich der Uferwälle und der Überschwemmungsflächen. Allerdings scheinen diese Ursachen weniger plausibel zu sein, weil die entsprechenden Glieder der Feststoffbilanz gut belegt sind.

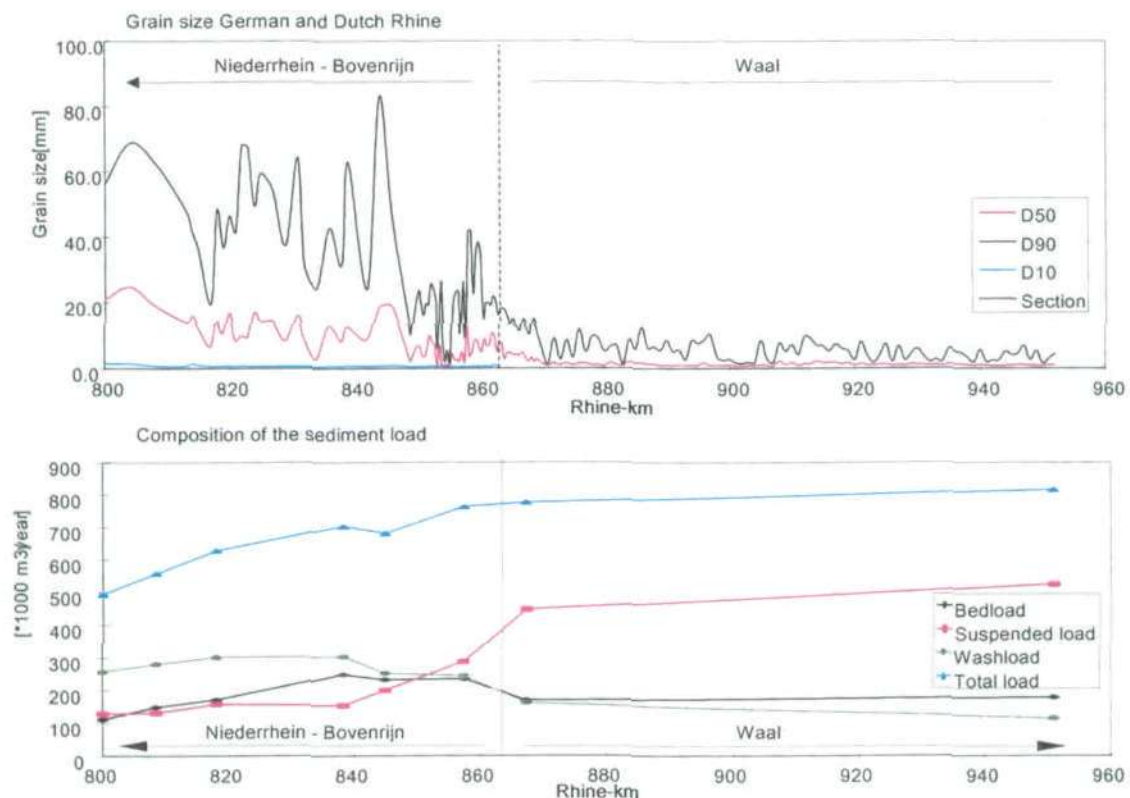


Figure 8. Grain size variation and composition of the sediment load along the Niederrhein - Bovenrijn - Waal.

Abbildung 8. Veränderung der Korngrößen und der Zusammensetzung des Feststofftransports entlang von Niederrhein und Bovenrijn-Waal.

---

## The composition of the Sediment load

The results show that the composition of the sediment load changes quite drastically in the lower Niederrhein and the Bovenrijn. Both the amount of bed load and the sand fraction of the wash load diminish in favour of an increase of the suspended sand load that exchanges with the bed. This change coincides with a strong decrease of grain size of the bed (figure 8). Such a strong decrease of grain size indeed should result in a relatively stronger contribution of suspended sand load to the total sand load. These outcomes are also in line with the results of sediment transport measurements near the bifurcation at Pannerden, carried out during floods in 1997 and 1998. Along the Waal the relatively small reduction of bed grain size is in line with a more or less constant composition of the sediment load. Besides, previous Dutch research has shown that the outcomes of sediment transport measurements, i.e. the ratio of suspended – bed load, for measurements in the upper and middle parts of the Waal were not significantly different from one another and that these measurements could be treated as one dataset.

## Zusammensetzung der Feststofffracht

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Zusammensetzung der Feststofffracht am unteren Niederrhein und am Bovenrijn drastisch verändert. Sowohl die Geschiebefracht als auch die Sandfracht in Dauersuspension verringern sich zugunsten des suspendierten Sandes, der mit der Sohle in Wechselwirkung steht. Diese Änderung fällt zusammen mit einer starken Abnahme der Korngröße des Sohlenmaterials (Abb. 8). Solch ein starker Abfall der Korngröße sollte sich in der Tat durch einen höheren Anteil der suspendierten Sandfracht an der Gesamtsandfracht bemerkbar machen. Dieses Ergebnis stimmt mit den Resultaten von Sedimenttransportmessungen nahe der Gabelung bei Pannerden überein, die 1997 und 1998 bei Hochwasser durchgeführt wurden. Die relativ geringe Abnahme der Korngröße der Sohle entlang der Waal paßt zu der mehr oder weniger konstanten Kornzusammensetzung der Feststofffracht. Außerdem haben frühere niederländische Untersuchungen gezeigt, dass die Ergebnisse der Feststofftransportmessungen, z.B. das Verhältnis der suspendierten Sandfracht zur Bodenfracht, sich am oberen und mittleren Abschnitt der Waal nicht signifikant voneinander unterscheiden und beide Messungen als ein Datenpaket behandelt werden können.