

**Morphologische Reaktion
der Waal auf
Baggermaßnahmen**

**Diplomarbeit
Alexander Siegfried**

August 2000

Danksagung

Diese Arbeit entstand in den Niederlanden während meines Aufenthaltes in Arnheim und Delft als Teil eines Projektes, dass von der Abteilung für Flussbau bei Rijkswaterstaat, Directie Oost-Nederland in Arnheim, zusammen mit RIZA (Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling) und Delft Hydraulics bearbeitet wurde. An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich für hervorragende Zusammenarbeit aller Beteiligten bedanken.

Mein Besonderer Dank geht an: Gerrit Klaassen von Delft Hydraulics und NCR (Netherlands Centre for River Research), für die Eröffnung der Möglichkeit, an einer so interessanten Arbeit mitzuwirken, für die wertvolle fachliche Hilfe und Diskussionen und für die zuvorkommende Betreuung während der gesamten Zeit, Marco Taal und Roelof Smedes für die überaus freundliche Betreuung in Arnheim und die interessanten fachlichen und organisatorischen Einblicke bei Rijkswaterstaat, Klaas-Jan Douben für wertvolle fachliche Hinweise und Ratschläge, sowie Frieke Schepman für die freundliche Zusammenarbeit. Ferner möchte ich mich bei Prof. H. J. de Vriend für die organisatorische Hilfestellung bedanken, und bei Dr. Dittrich für die Betreuung in Karlsruhe.

Das Projekt wurde durch Rijkswaterstaat, Directie Oost-Nederland und das Sokrates-Programm gefördert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Morphologische Prozesse in der Waal.....	3
2.1	Einleitung.....	3
2.2	Die Fahrrinne.....	3
2.3	Abfluss.....	5
2.4	Sedimenttransport.....	6
2.5	Morphologische Ursachen für Engstellen.....	7
2.5.1	Geometrisch bedingte morphologische Entwicklung.....	8
2.5.1.1	Biegungen.....	8
2.5.1.2	Kurvenübergänge.....	9
2.5.1.3	Künstliche Eingriffe.....	10
3	Baggerarbeiten in der Waal.....	15
3.1	Einleitung.....	15
3.2	Das Baggergerät.....	15
3.3	Durchführung der Arbeiten.....	16
3.3.1	Problemstellenerkennung.....	16
3.3.2	Instandhaltungsbaggern.....	18
3.3.3	Profilbaggern.....	18
3.4	Motivation für die gestellten Fragen.....	20
4	Datengrundlage.....	22
4.1	Einleitung.....	22
4.2	Das Messverfahren.....	22
4.3	Postprocessing.....	24
4.4	Überblick über die gemessenen Daten.....	24
4.5	Die Messstrecken.....	25
4.5.1	Ewijk.....	25
4.5.2	Winssen.....	27
4.5.3	Dodewaard-Druten.....	28
4.5.4	Beneden-Leuwen.....	30
4.6	Datenüberprüfung.....	31
4.7	Datenaufbereitung.....	32
4.7.1	Einteilung in 100m – Querschnitte.....	32
4.7.2	Einteilung in morphologische Einheiten.....	32

4.8	Abflussdaten.....	33
5	Analyse der Kanalbreitenentwicklung.....	35
5.1	Einleitung.....	35
5.2	Ewijk.....	36
5.3	Winssen.....	41
5.4	Dodewaard-Druten	44
5.5	Beneden-Leeuwen	47
5.6	Analyse der Breitenentwicklung	49
5.6.1	Morphologische Einheiten.....	49
5.6.2	Unterteilung in Anfang – Mitte – Ende	51
5.6.3	Unterteilung in feste Längen von 600 m	53
5.7	Änderung der Breite	56
5.8	Schlussfolgerungen.....	57
6	Analyse der Wirkungsweise des wiedereingebrachten Materials	60
6.1	Einleitung.....	60
6.2	Slijk-Ewijk	61
6.3	Winssen.....	63
6.4	Beneden-Leeuwen	66
6.5	Schlussfolgerungen.....	69
7	Potenzielle Speichervolumen für ausgebagertes Material.....	70
7.1	Einleitung.....	70
7.2	Konventionelle Methode zur Berechnung des Speichervolumens	70
7.3	Ziel der Untersuchung	70
7.4	Berechnung der Speichervolumina.....	71
7.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	74
8	Ausblick	76
9	Literatur	77
	Abbildungsverzeichnis	78
	Tabellenverzeichnis	80

I Einleitung

Der Rhein (Abbildung 1) teilt sich in den Niederlanden in drei Flüsse auf: die Waal, den Niederrhein und der Lek. Die Waal ist eine der wichtigsten Gütertransportwege für die Niederlande und verbindet den weltgrößten Seeschiffahrtshafen Rotterdam mit dem weltgrößten Binnenhafen Duisburg. Auf dieser Achse werden jährlich über 150 Mio. t transportiert. Das Verkehrsaufkommen besteht zur Zeit in 165.000 Schiffen pro Jahr, d.h. alle drei Minuten passiert ein Schiff die niederländisch-deutsche Grenze, 24 Stunden am Tag, sieben Tage die Woche. Es wird damit gerechnet, dass die Menge der zu transportierenden Güter in den kommenden zehn Jahren auf 200 Mio. t anwächst. Um diesen bevorstehenden Veränderungen gerecht zu werden, wurde das „Waalprojekt“ ins Leben gerufen.



Abbildung 1 – Der Rhein bei Lobith mit Schiffsverkehr

Dabei hat eine Expertenkommission in einer Studie einen Plan für die Erhöhung der Breite und Tiefe der Fahrrinne ausgearbeitet. Randbedingungen waren dabei die unbedingte Hochwasserneutralität und die Verhinderung einer Beeinträchtigung des ökologischen Systems. Strukturelle Änderungen dürfen daher nur innerhalb des Flussbettes vorgenommen werden (Abbildung 2). Das niederländische Ministerium für Verkehr, Wasser und Transport (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Direktorat Generaal Rijkswater-

staat) hat die Aufgabe, bis 2005 die Vorschläge in die Tat umzusetzen. Dabei gilt es, die derzeitige Fahrrinnenbreite von 150 m auf 170 m zu erweitern und die Tiefe von 2,50 m auf 2,80 m zu erhöhen. Diese Anpassung wird es dem Schiffsverkehr ermöglichen, dass zwei Schubverbände mit jeweils sechs Schubeinheiten und ein Schiff mit Doppelmotoranlage einander auf der gesamten Länge der Waal passieren können. Die strukturellen Verbesserungen des Verkehrsweges Waal in den Niederlanden machen jedoch nur dann Sinn, wenn sie im Einklang mit dem Nachbarn Deutschland vorgenommen werden. So ist man auch auf der deutschen Seite gleichfalls bemüht für Verbesserung

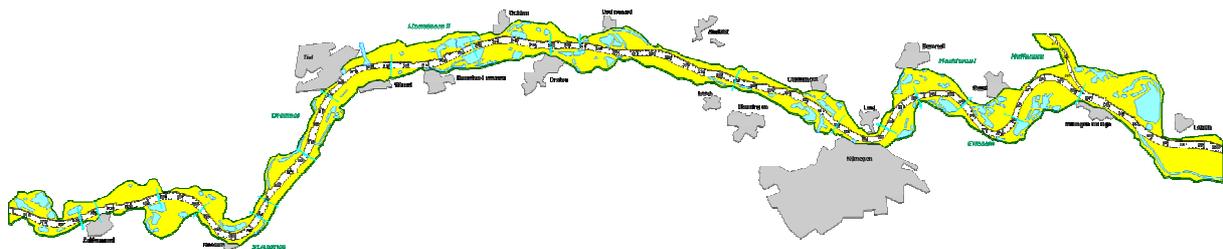


Abbildung 2 – Die Waal

zu sorgen: Die Fahrrinne wird von der Grenze bis Duisburg ebenfalls auf 2,80 m vertieft bei einer Breite von 150 m.

Als Ausgangsniveau für die Veränderungen wird dabei der gleichwertige Wasserstand (GIW, bzw. niederländ.: OLR „overeengekomen laagwater-referentieniveau“) verwendet, der als das Referenzniveau definiert ist, welches 95 % des Jahres vom Wasserstand überschritten wird [6], [8], [9]. Obwohl der GIW - je nach Abflusssituation - von Jahr zu Jahr unterschiedliche Werte annimmt, wurden die Daten, auf die sich diese Untersuchungen beziehen, alle auf das Niveau des GIW von 1998 referenziert.

Zur Durchsetzung der anvisierten Ziele, der Einhaltung der erforderlichen Breite und Tiefe, stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Um schneller auf eventuell auftretende ungünstige morphologische Entwicklungen reagieren zu können, wurde flexiblen Eingriffen mittels Baggermaßnahmen gegenüber dauerhaften baulichen Veränderungen den Vorzug gegeben. Zuständig für die Durchführung der beschlossenen Maßnahmen in den Niederlanden ist Rijkswaterstaat, Directie Oost-Nederland. Diese Behörde überwacht seit März 1998 einige Abschnitte in der Waal zur Überprüfung der Baggerarbeiten und zur Überwachung der Flusssohle. Um zukünftige Planungen der Baggermaßnahmen zu erleichtern, soll in Zusammenarbeit mit RIZA (Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling) und Delft Hydraulics ein Entscheidungshilfesystem erstellt werden, das dazu dient, Baggermaßnahmen in der Waal und deren Auswirkungen auf die Morphologie einschätzen zu können [3]. In diesem Kontext, ausgehend von praktischen Fragestellungen, entstand diese Diplomarbeit.

2 Morphologische Prozesse in der Waal

2.1 Einleitung

Die Waal ist ein von Menschenhand veränderter Fluss. Seit dem elften Jahrhundert ist die Schifffahrt von großer Bedeutung für den Transport. Daher stammen auch die ersten wasserbaulichen Eingriffe aus dieser Zeit. Die Römer begannen, kleinere Mäander zu durchtrennen und Deiche und Buhnen zu bauen [2]. Dabei war es besonders wichtig, einen Einstau des Flusses durch Eisbarrieren zu verhindern. Größere Flussregulierungen wurden erst von 1850 bis 1870 ausgeführt. Dabei wurden Leitwerke installiert und Seitenkanäle geschlossen, wodurch es nun möglich war, die Waal auch bei niedrigen Abflüssen schiffbar zu halten. Die Schifffahrt gewann

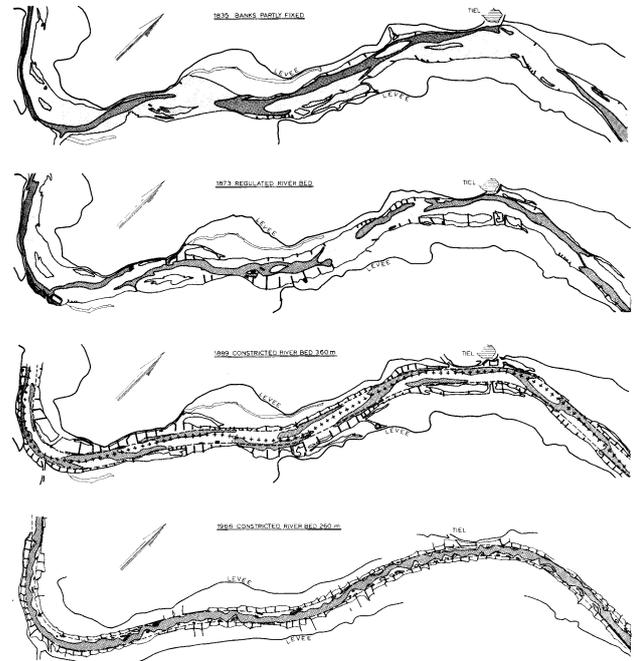


Abbildung 3 – Geschichte der Verbesserungen des Abschnitts von km 910 bis km 930 der Waal [4].

noch mehr an Bedeutung. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts und am Anfang des 20. wurden eine zweite und dritte Regulierung vorgenommen, die für eine Verengung des Niedrigwasserbettes auf 260 m sorgten. Heute besteht die Waal aus einer kurvenreichen Strecke zwischen der Aufteilung bei Pannerden Kop und Nijmegen (Abbildung 2). Danach folgt ein langgestreckter Abschnitt mit geringer Krümmung. Nach wie vor geht es darum, Wasserstände zu garantieren, um so Planungssicherheit für die Schifffahrt beim Beladen zu schaffen. Durch die natürliche Entwicklung wird die Fahrrinne jedoch in ihrer Breite und Tiefe mit der Zeit beeinträchtigt. Dieses Kapitel soll einen Einblick in die zugrundeliegenden morphologischen Prozesse geben, welche die Ursachen für diese nachteilige Entwicklung darstellen.

2.2 Die Fahrrinne

Die Normallinien sind der Flusskrümmung angepasste Linien durch die Mittelpunkte der Buhnenköpfe. In der Draufsicht liegt die Fahrrinne mit einer Breite von 170 m innerhalb der

Normallinien im Flussschlauch mit einem Mindestabstand von 30 m zu dieser Berandung (siehe Abbildung 4). Für die Schifffahrt wird der befahrbare Bereich durch die Betonung markiert. [12]

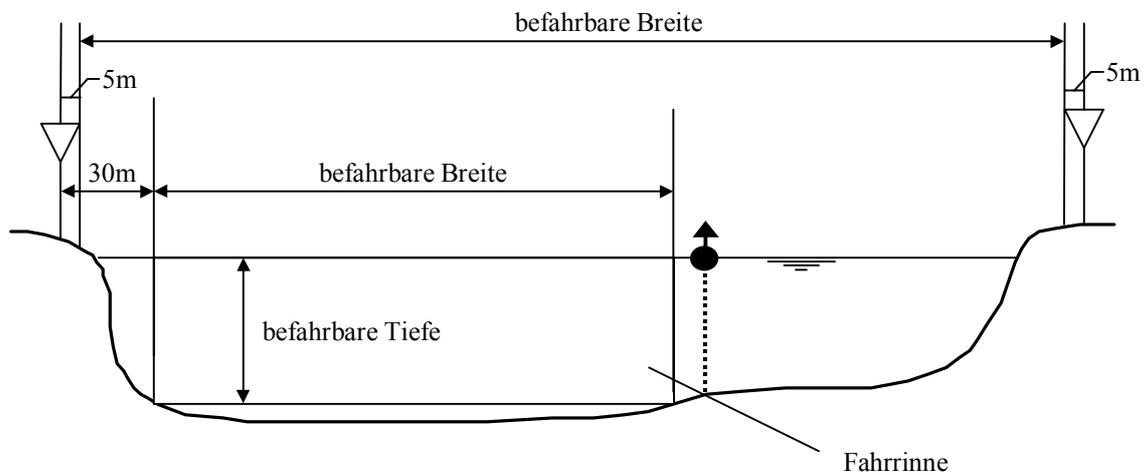


Abbildung 4 – Profil der Fahrrinne

Entsprechend der Vorgabe, dass die Fahrrinne möglichst im tieferen Bereich des Sommerbettes liegen soll, pendelt die Fahrrinne von einer Außenkurve zur nächsten und weicht dabei mitunter stark von der Flussachse ab. Besonders gut ist dies bei Nijmegen zu erkennen (Abbildung 5).

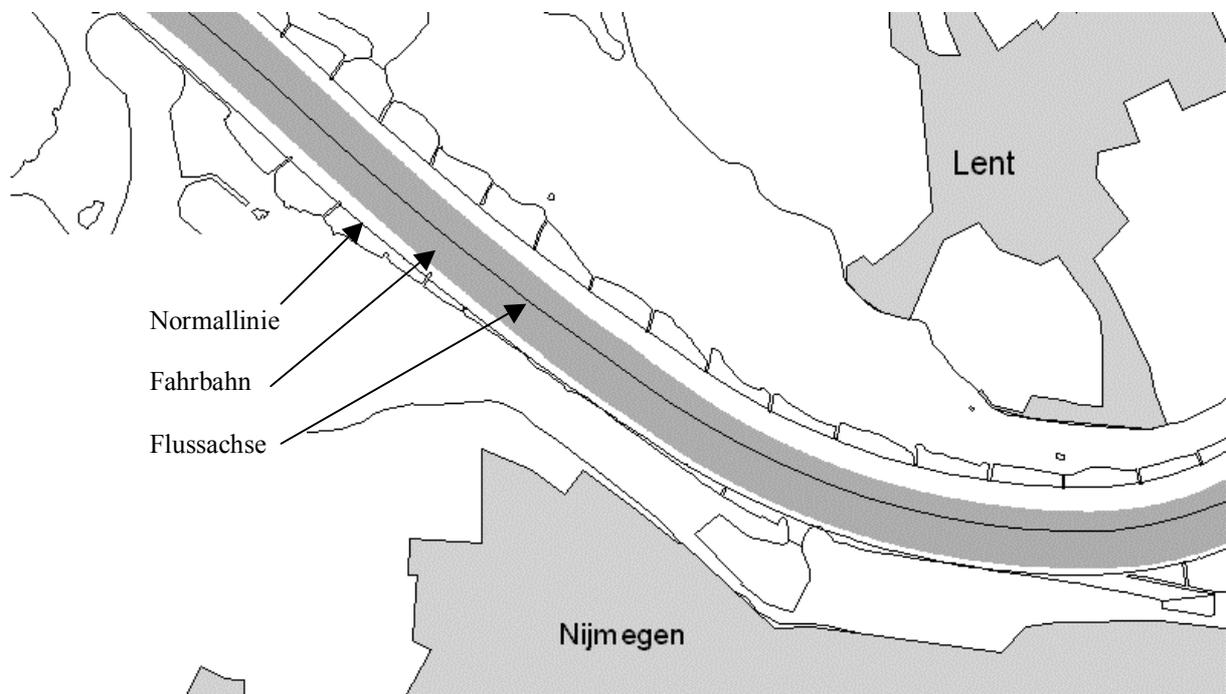


Abbildung 5 – Die Waal bei Nijmegen. Deutlich ist zu sehen, daß die Fahrrinne bei Nijmegen durch die tiefere Außenkurve verläuft, um später wieder in die Mitte zu schwenken.

Breite und Tiefe des Fahrweges sind vom Abfluss abhängig, der über das Jahr sehr verschieden ist. Die Einhaltung der notwendigen Dimensionen kann nur durch ständige Beobachtung erfolgen. Hierzu

werden, falls erforderlich, täglich Messungen vorgenommen, womit die geringsten Tiefen innerhalb einer Flussstrecke ermittelt werden. Diese gemessenen Mindesttiefen (niederländ.: MGD – Minst Gepeilde Diepte) treten bei geringen Abflüssen zwischen Nijmegen und St. Andries auf, bei großen Abflüssen unterhalb von St. Andries, wobei hier noch keine Tiefen unterhalb 2,8 m festgestellt wurden und dieser Bereich sich daher als unproblematisch darstellt.

Die Mindesttiefen abzüglich einer Sicherheitshöhe werden von der Schifffahrt als Empfehlungswerte für den Tiefgang beladener Schiffe genutzt. Eine Erhöhung der Tiefe ist daher von großer Bedeutung. Bei Standard-Schubeinheiten bedeutet jeder cm Tiefgang ein zusätzliches Transportgewicht von etwa 8,2t. Ein Sechs-Einheiten-Schubverband kann nach der Durchführung des Waalprojektes mit einem Gewinn von 30cm Ladetiefe demnach $6 \times 30 \times 8,2 = 1476$ t mehr befördern. Die wirtschaftlichen Einsparungen, die sich aus diesem neuen Potenzial ergeben, werden mit bis zu 200 Mio. Gulden (91 Mio. Euro, 178 Mio. DM) beziffert. Auch die befahrbare Breite ist von wirtschaftlicher Bedeutung. Ist diese zu gering, kommt es an den Engstellen zu Verzögerungen, wodurch eventuelle Überschreitungen von Lieferfristen wirtschaftliche Schäden verursachen. Gleichfalls bedeutet eine kleinere Breite ein größeres Unfallrisiko. [7]

2.3 Abfluss

Der Rhein teilt sich bei Pannerdensch Kop in die Waal und den Pannerden Kanal auf. Etwa ein Drittel des ankommenden Wassers fließen in den Kanal und damit in Niederrhein und Lek, der Rest ergibt den Abfluss der Waal.

Der gleichwertige Wasserstand stellt sich im Rhein bei einem Abfluss von $984 \text{ m}^3/\text{s}$ (Stand: 1996) ein, für die Waal bei $791 \text{ m}^3/\text{s}$. Dieser Abfluss wird 95% der Zeit eines Jahres überschritten. Für die Durchführung von Baggermaßnahmen wird als Erfahrungswert $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Rhein) als Maximalwert für noch effektives Baggern angegeben ($2000 \text{ m}^3/\text{s}$ für die Waal). Tabelle 1 gibt einen Überblick über einige statistische Werte des Rheinabflusses beim Pegel Lobith.

Jährlicher Abfluss	Gemittelt	Standard- abweichung	Maximum über alle Jahre	Minimum über alle Jahre
Jahresmaximum	6591	2067	13000	2790
Jahresmittel	2217	469	3149	1096
Jahresminimum	1028	208	1675	575

Tabelle 1 – Abflussdaten des Rheins

Eine weitergehende statistische Analyse der Abflussganglinien hat ergeben, dass die größten Abflüsse von Dezember bis Januar zu erwarten sind. In den Monaten Oktober und November ist die Wahrscheinlichkeit für einen Abfluss um bzw. unterhalb des GIW-Abflusses am größten, während von Mai bis Juli das Risiko von GIW-Abflüssen gering ist. In der zweitgenannten Periode haben Abflüsse oberhalb von $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ eine große Wahrscheinlichkeit (10%). Daraus wurde geschlossen, dass Baggermaßnahmen sinnvollerweise im Zeitraum Mai bis August durchgeführt werden sollten [12].

Die Waal kann in Hauptbett und Vorländer oder in Sommer- und Winterbett eingeteilt werden. Bei Abflüssen größer als $4500 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel Lobith (entspricht etwa einem Abfluss von $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ in der Waal) dehnt sich der Fluss auf die Vorländer aus.

2.4 Sedimenttransport

Alluviale Flüsse sind dadurch gekennzeichnet, dass ihr Bett aus dem gleichen Material besteht, das sie selbst als Sediment transportieren. Auch die Waal fällt in diese Kategorie. Das transportierte Material besteht vornehmlich aus Sand aber auch Kies, mit einem mittleren Durchmesser von 2 mm [4]. Andere Untersuchungen zeigen einen mittleren Korndurchmesser auf der stromabwärts rechts gelegenen Seite von 1,5 – 2 mm und in der Mitte und der linken Seite von 0,6 – 1 mm. Es wird angenommen, dass der schwere Schiffsverkehr die Ursache für diesen Unterschied ist. [14]

Damit ein Bodenpartikel aus seiner Lage gelöst und in Bewegung gesetzt wird, wenn es sich im Einfluss einer Strömung befindet, muss diese über die nötigen Kräfte verfügen, um das Gewicht des Korns und dessen evtl. schlecht exponierte Lage zu überwinden. Feine Partikel werden dauerhaft in Schwebe gehalten – es ergibt sich eine Suspension. Um Körner mit größeren Durchmessern zu lösen, müssen relativ starke Strömungskräfte vorhanden sein. Sedimentation findet in Zonen mit geringeren Fließgeschwindigkeiten statt. Der gesamte Prozess ist – neben dem transportierten Material – stark von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig, und diese wiederum von Abfluss und Geometrie der Fließrinne. Bei konstantem Abfluss und abnehmender durchströmter Fläche nimmt die Strömungsgeschwindigkeit zu und umgekehrt. An Engstellen in einem Fluss tritt daher verstärkt Erosion auf, an anderen Strecken dominiert die Sedimentation. Die Form des Flussbettes spiegelt einerseits die Natur des Materialtransports wider, auf der anderen Seite beeinflusst die Bettgeometrie den Materialfluss. Diese Wechselwirkung und die stochastische Natur der Transportprozesse, sowie die sich ständig ändernden Wasserstände, sind offenbar für die Schwierigkeiten bei einem Vergleich zwischen theoretischen Berechnungen, Labormessungen und Naturdaten verantwortlich [4], [13]. Für den Fall des Hochwasserabflusses wurde eine ausgeprägte Hysterese-Beziehung zwischen Abfluss und Sedimenttransport festgestellt [5].

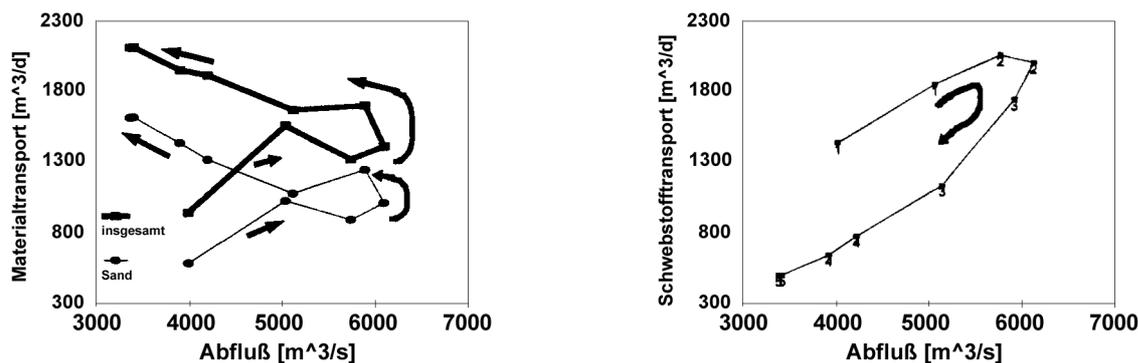


Abbildung 6 – Hysterese-Beziehung zwischen Sedimenttransport und Abfluß [5]. Hier wurde das Hochwasserereignis vom 30. Oktober 1998 bis zum 13. November betrachtet.

In der Waal war die Erosion in den vergangenen Dekaden stets größer als die Sedimentation. Pro Jahr sinkt das Niveau der Waal durchschnittlich um 1 cm ab. Diese Eintiefung wird, falls sie nicht zum Erliegen kommt, bei kontinuierlicher Entwicklung für erhebliche Verlandungsprobleme im Mündungsbereich sorgen. Aus diesem Grund wird das ausgebaggerte Material nicht dem Fluss entzogen, sondern muss wieder in die Fahrrinne eingebracht werden.

2.5 Morphologische Ursachen für Engstellen

Die angestrebten Dimensionen der Fahrrinne von 170 m Breite und 2,8 m Tiefe unter GIW werden sehr oft durch Materialansammlungen beeinträchtigt. In diesem Fall wird von Untiefen gesprochen. Die Gründe dafür sind vielfältig und sehr verschieden. Die Einflüsse auf die Sohlenbildung können in drei verschiedene Arten eingeteilt werden [11]:

- Durch die Geometrie erzwungene Ursachen

Die vorgegebenen geometrischen Randbedingungen ergeben Strömungsmuster, die Untiefen entstehen lassen können. Diese treten vornehmlich bei einer ansteigenden oder abklingenden Hochwassersituation auf: Wechselnde Zu- und Abflüsse aus den Vorländern in das Hauptbett, aufgrund der Sohlenneigung von Bogeninnen- zu Bogenaußenseite, untiefe Übergänge zwischen zwei verschiedenen aufeinanderfolgenden Flusskrümmungen, durch künstliche Bauten wie Hafeneinfahrten, Leitwerke, Bühnen, fixierten Sohlen oder Bodenschwellen. Bedingt durch eine Änderung des Abflusses ergibt sich ein verändertes Strömungsmuster, welches auf die Gestaltbildung der Flusssohle Einfluss nimmt.

- Durch freies Systemverhalten

Untiefen können auch durch Dünen- und Riffelbildung auftreten. Bei Hochwasser entstehen in kurzer Zeit kleine Unterwasserdünen auf den bereits Bestehenden von mehreren Metern Länge und einigen Dezimetern Höhe. Bei abnehmendem Wasserstand bilden diese oft große, meterhohe Konglomerate, die die Fahrrinne blockieren. Zu beobachten ist auch eine Fortpflanzung bzw. Versatz von Untiefen in den befahrbaren Bereich hinein. Besonders bei Kurvenübergängen von zwei aufeinanderfolgenden, gegengerichteten Bögen tritt dies häufig auf.

- Durch den Schiffsverkehr

Der Schiffsverkehr beeinflusst die Morphologie der Fahrrinne ebenfalls. Als Besonderheiten sind hier zu nennen, dass die Schiffe bei Fahrt gegen den Strom im Durchschnitt stärker beladen sind als in der Gegenrichtung. Durch die vorbeifahrenden Schiffe wird Material aus den Bühnenfeldern in die Hauptströmung ausgetragen. Außerdem wird das Verteilen und Ausgleichen von nach dem Baggern wiedereingebrachte Materialvolumen verstärkt und damit zum Teil die Untiefenbildung reduziert.

Oft treten alle drei Einwirkungsarten gemeinsam auf, weshalb eine Engstelle nur selten durch die Beseitigung eines problembildenden Vorgangs aufgelöst werden kann.

2.5.1 Geometrisch bedingte morphologische Entwicklung

Wie oben bereits beschrieben, können die Ursachen für Untiefen in dem Fluss aufgezwungene und freie Phänomene sowie die Einflüsse der Schifffahrt eingeteilt werden. Auch andere Einteilungen sind denkbar; beispielsweise kann die Ausdehnung einer Untiefe als Charakteristikum dienen, oder eine Unterscheidung in natürliche und künstliche Ursachen. Allgemein gilt, dass kleinere Phänomene eine kürzere Anpassungszeit haben und damit schneller auf eine Änderung der Abflusssituation reagieren. Die folgenden Abschnitte zeigen die in der Waal vorkommenden geometrischen Gegebenheiten auf.

2.5.1.1 Biegungen

Die zahlreichen wasserbaulichen Maßnahmen im Laufe der Jahrhunderte haben aus der Waal keineswegs einen Kanal gemacht. Auch an relativ geraden Stellen sind Flussbiegungen zu erkennen. In gekrümmten Gerinnen tritt stets, neben der Hauptströmungsrichtung eine Sekundärströmung auf. Das Wasser wird, bedingt durch die Zentrifugalkraft, zur Außenseite gedrückt und ergibt dort einen

höheren Wasserstand als an der Innenseite. Es stellt sich eine Neigung des Wasserspiegels ein. Das oberseitige Wasser strömt zur Kurvenaußenseite, während unterhalb dessen eine Gegenströmung entsteht (Abbildung 7). Wegen der unterschiedlichen Längen der Innen- und Außenstromlinien ergeben sich innen geringere Strömungsgeschwindigkeiten. Die so entstehende Spiralströmung bewirkt, dass Material an der Kurvenaußenseite erodiert und in der Innenseite wegen der geringeren Geschwindigkeit der Hauptströmung sedimentiert wird. [1]

Je stärker die Hauptströmung oder je größer die Gerinnekrümmung, um so größer die Kraft, welche die Spiral- oder Korkenzieherströmung auf die Flusssohle ausübt. Bei unterschiedlichen Abflüssen stellen sich verschiedene Lagen für die geneigte Sohle von Außen- zur Innenseite ein. Große Werte

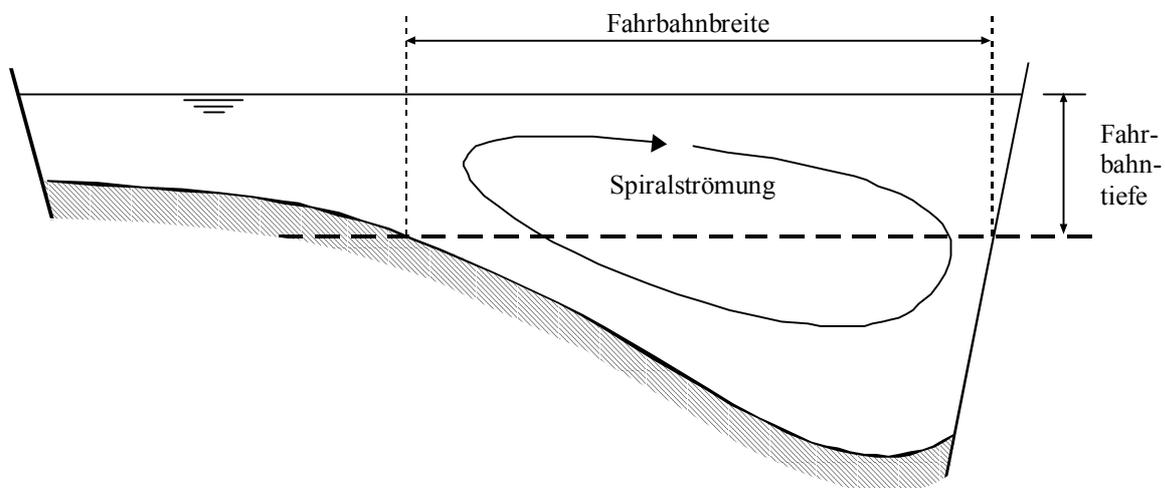


Abbildung 7 – Spiralströmung in einer Flusskrümmung

des Abflusses Q bewirken, dass sich der tiefe Bereich noch mehr eintieft und die Innenkurve durch Sedimentation stärker ausgeprägt wird. Eine zu große Neigung und infolgedessen eine Verlandung wirkt sich nachteilig auf die Fahrrinne aus.

2.5.1.2 Kurvenübergänge

Zwischen zwei entgegengesetzt gekrümmten Flussabschnitten befinden sich Übergänge (engl.: crossings). Diese zeichnen sich im Bereich der Flussachse durch untiefe Stellen aus, die Probleme für die Schifffahrt bedeuten können. Das Wasser, welches aus der Krümmung oberhalb ankommt, nimmt aufgrund der Trägheit nicht sofort, sondern erst nach einer bestimmten Strecke ein neues Strömungsmuster an. Diese Strecke ist um so länger, je weniger rau das Gerinne und um so größer

die Wassertiefe ist. Da sich der Wasserstand mit wechselndem Abfluss ändert, oszilliert diese Strecke und damit auch die Größe der Untiefe.

2.5.1.3 Künstliche Eingriffe

Einige Abschnitte der Waal sind permanente Engstellen. Hier sind dauerhaft konstruktive Maßnahmen sinnvoll, um Kosten für kontinuierliche Baggararbeiten einzusparen. Im folgenden sollen die einzelnen Bauweisen kurz vorgestellt und ihre Auswirkung auf die Morphologie erläutert werden. Obwohl nicht alle Varianten realisiert wurden, sind sie jedoch für die Waal grundsätzlich denkbar.

Feste Sohle

Eine feste Sohle (Abbildung 8) wird in einem gekrümmten Gerinneabschnitt außen angeordnet. Sie besteht aus schweren Steinlagen, die eine Erosion in der Kurvenaußenseite verhindern. Nach der Bauphase ist die Sohle außen höher als zuvor, wodurch die durchströmte Fläche zunächst reduziert wird. Die Strömungsgeschwindigkeit nimmt besonders in Innenseite der Kurve zu und dort tritt Erosion auf. Das Ergebnis ist eine breitere Fahrrinne mit einer stabileren Tiefe. Zusätzlich kann der Abtrag an der Kurveninnenseite durch Baggararbeiten unterstützt werden, um den Vorgang zu beschleunigen und so schneller zum neuen natürlichen Gleichgewicht zu kommen. Ein weiterer Effekt, der sich durch die geänderten Strömungsverhältnisse einstellt, ist eine Eintiefung im Unterstrom der festen Sohle, sowie eine Versandung in der Verlängerung der Kurveninnenseite. In der Waal sind an zwei Stellen feste Sohlen gebaut worden: Bei Nijmegen in einer Länge von 2 km; hier wurden 50 m Breite gewonnen – und bei St. Andries mit 3,1 km Länge und 60 m Breitenzuwachs. Die sehr gute Wirkungsweise bei St. Andries hat mittlerweile dazu geführt, dass die Innenseite der Kurve unter das Niveau der fixierten Sohle gesunken ist, und diese bereits Gefahr läuft, ihre Stabilität zu verlieren.



Abbildung 8 – Feste Sohle und Wirkungsweise (Verlagerung der Hauptströmung in Richtung Innenkurve)

Bodenschwellen

Bodenschwellen (Abbildung 9) sind unter der Wasseroberfläche liegende Buhnen von etwa 200 m Länge, die senkrecht zur Strömungsrichtung liegen. Durch ein Feld von Bodenschwellen wird die weiter oben beschriebene Spiralströmung behindert und unterbrochen. So wird die Erosion am außenseitigen Ufer eingeschränkt. Bodenschwellen finden sich in der Waal bei Erlecom. Auf 2,8 km Länge sind 54 Schwellen von 2,8 m Höhe im Abstand von jeweils 50 m angeordnet.



Abbildung 9 – Bodenschwellen und Wirkungsweise (Verlagerung der Hauptströmung in Richtung Innenkurve)

Bodenleitwände

Bodenleitwände (Abbildung 10) sind aus Stahl und liegen längs der Hauptströmungsrichtung in gekrümmten Flussabschnitten. Sie dienen ebenfalls dazu, die Korkenzieherströmung aufzulösen und sorgen so für eine ebenere Sohle in Kurven. Gebaut werden sie im Normalfall mit einer Länge von

10 m und einem gleichmäßigen Abstand von 7,5 m. Die Anzahl der Wände in einem solchen Feld schwankt zwischen 1 bis 13 und ist an das Platzangebot, und damit die Breite des Gewässers, gebunden. Der Abstand der Leitwandfelder zueinander beträgt zwischen 80 und 120 m. Auf diese Weise kann eine gesamte Flussbiegung mit Leitwänden ausgestattet werden.



Abbildung 10 – Bodenleitwände und Wirkungsweise (Verlagerung der Hauptströmung in Richtung Innenkurve)

Schleifenkorrektur

Hierbei wird die Krümmung eines Mäanders bzw. eines Gerinnebogens verkleinert. Dies kann im Fall der Waal, die fast überall mit Buhnen ausgestattet ist, durch eine Verlängerung der Buhnen, die in der Außenkurve liegen, und einer gleichzeitigen Verkürzung der gegenüberliegenden innerseitigen Buhnen geschehen (Abbildung 11). Das Resultat ist ein weniger starkes Gefälle von Innen- zur Außenseite und ist gleichbedeutend mit einer etwas freieren Fahrrinne. In der Waal wurde diese Methode nicht angewendet, da sie zu hohe Kosten bei zu geringer Wirkung bedeuten würde.

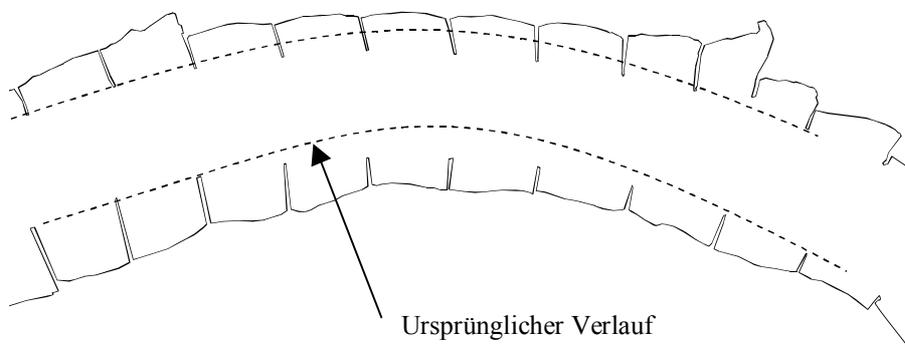


Abbildung 11 – Schleifenkorrektur

Buhnenverlängerung

Buhnen schützen die Ufer gegen die Strömung, indem sie die Strömungsgeschwindigkeit in Ufernähe stark herabsetzen und dort so Erosion vermeiden. Ein weiterer Effekt ergibt sich in der Fließrinne. Hier wird die Strömungsgeschwindigkeit erhöht, und die Ansammlung von Sand nimmt ab. Dazu dürfen die Buhnen jedoch nicht zu weit voneinander entfernt liegen, da sich sonst kein Wirbel in den Buhnenfeldern einstellt. Der Wirbel unterstützt die Hauptströmung und verhindert, dass diese sich in die Buhnenzwischenräume hinein ausbreiten kann, was zu einer Versandung in der Fahrrinne führen würde. Eine Verlängerung der Buhnen (Abbildung 12) unter dieser Randbedingung eignet sich also dazu, eine tiefere Fahrrinne herzustellen. Dies ist jedoch nur dann möglich, wenn durch die Erweiterung der Bauwerke die Mindestbreite von 170 m nicht unterschritten wird. Es ist geplant, je nach Erfahrung mit den Baggerarbeiten, eine Buhnenverlegung bei Dreumel (zwischen Tiel und St. Andries) durchzuführen.



Abbildung 12 – Buhnenverlängerung

Verminderung von seitlichem Ausweichen

An vielen Stellen strömen in der Waal bei höherem Wasserstand große Wassermassen auch außerhalb der eigentlichen Fahrrinne. Durch dieses seitliche Ausweichen großer Teile der Strömung nimmt die Fließgeschwindigkeit im eigentlichen Sommerbett ab, wodurch Sandbänke entstehen können (Abbildung 13). Diese bilden bei zurückgehendem Abfluss Hindernisse in der Fahrrinne. Dieser Vorgang kann mittels Erhöhung der Ufer und Dämme des Sommerbettes erreicht werden, wobei über die Wirkungen solcher Baumaßnahmen wenig Erfahrung besteht. Vorläufig wird daher auf eine Anwendung im größeren Umfang verzichtet, und es sollen zunächst an einem Pilotprojekt Erprobungen stattfinden.



Abbildung 13 – Seitliches Ausweichen der Strömung in das Winterbett

Abtrennen von Bühnenfeldern

In Abschnitten, in denen die Waal wegen eventuell vorliegender Breite langsamer fließt, besteht die Gefahr, dass Sandbänke in der Fahrrinne entstehen. Dies kann besonders in der Mitte zwischen den in diesem Bereich liegenden Bühnen vorkommen. Mit dem Abtrennen der Bühnenfelder durch eine durchgehende Berandung wird dieser Entwicklung begegnet bei einer gleichmäßigeren und stärkeren Hauptströmung. Das Abtrennen der Bühnenfelder hat auch ökologische Vorteile, da in den so entstehenden Gebieten verschiedene Flussorganismen gute Lebensbedingungen vorfinden. 1997 sind bei Beuningen, Ochten und Beneden-Leeuwen einige Bühnenfelder teilweise mit Holzpfeilern geschlossen worden (Abbildung 14). Die Maßnahmen müssen noch bilanziert werden.



Abbildung 14 – Abtrennen von Bühnenfeldern. Links: Schema, Rechts: Anwendung bei Ochten

3 Baggerarbeiten in der Waal

3.1 Einleitung

Neben den bereits erwähnten Methoden des konstruktiven Eingriffs stehen die Baggermaßnahmen an zur Freihaltung der Fahrrinne an vorderster Stelle. Durch sie können sowohl kurzfristig entstandene Untiefen, z.B. durch ein zurückgehendes Hochwasser, als auch die Morphologie eines gesamten Abschnittes geändert werden. Darüber hinaus bleibt die Möglichkeit, in Zukunft auf andere Vorgaben hinsichtlich der Fahrrinnendimension leichter eingehen zu können. Die Flexibilität ist jedoch nicht der einzige Grund: Durch das Baggern werden nur verhältnismäßig kleine Anpassungen vorgenommen, die zwar ihren Zweck erfüllen sollen, jedoch keine grundlegende Änderung der Morphologie herbeiführen. Obwohl von der finanziellen Seite zunächst kostenintensiver, ist dies ein Schritt zu einem der Natur besser angepassten Eingriff. So kann auch auf etwaige ungünstige Entwicklungen schneller reagiert und diese im Extremfall wieder zurückgenommen werden.

Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über das Baggergerät und die verschiedenen Varianten der Arbeiten, die in der Waal ausgeführt werden. Im Anschluss stehen die sich daraus ergebenden praktischen Fragen.

3.2 Das Baggergerät

Es gibt eine große Anzahl von verschiedenen Baggertypen, die für Flüsse und somit für sandige Untiefen geeignet sind. Sie können in vier Kategorien eingeteilt werden [4].

Der Eimerketten-Nassbagger (Abbildung 15 a) holt mit einer Kette aus Kübeln Material aus der Flusssohle heraus und belädt damit Lastkähne, die den entnommenen Sand zur Abladestelle befördern. Der Bagger bewegt sich stufenweise vorwärts, und arbeitet sich von einer Seite des auszubaggernden Kanals zur anderen. Auf diese Weise bildet er bis zum Abschluss der Arbeiten ein großes Hindernis für die Schifffahrt.

Saugbagger lösen Bodenmaterial und holen ein Sand-Wasser-Gemisch durch ein Saugrohr in den Schiffsrumpf. Die drei Varianten, die sich dieser Methode bedienen,

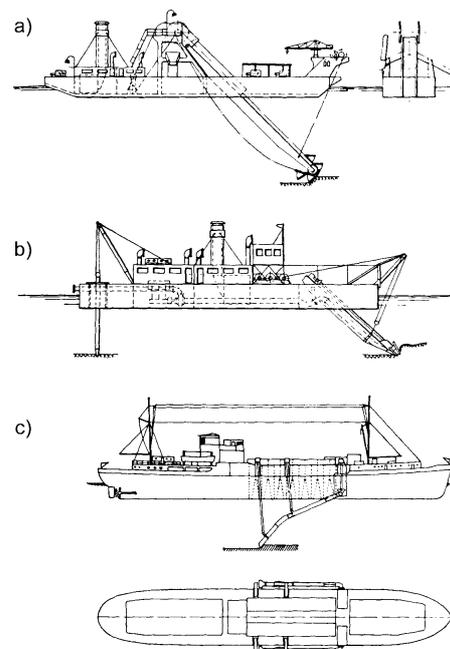


Abbildung 15 – Verschiedene Baggertypen:
a) Eimerketten-Nassbagger, b) Schneidkopfsaugbagger, c) Hopper-Bagger

unterscheiden sich prinzipiell nur durch die Art und Weise, wie die Sohle gelöst wird. Schneidkopfsaugbagger (Abbildung 15 b) haben, wie der Name schon andeutet, eine Fräse vor dem Ansaugrohr. Diese löst Material in relativ großen Schichten, welche sofort über das Rohr entfernt werden. Beim Spülbagger wird das Sediment durch einen Wasserinjektionsstrahl aus der Sohle gerissen und dann abgesaugt. Daher eignet er sich besser für nicht kohäsives Material, das nicht zu grobkörnig sein sollte. Ein solcher Bagger bewegt sich anders als ein Schneidkopfsaugbagger; er fährt in Längsrichtung mehrere Male durch den Fluss, wobei mit jedem Durchgang eine Vertiefung von der Breite der mitunter sehr großen Öffnung des Saugrohres herstellt. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass der entstandene Graben in der Richtung der Strömung liegt und daher länger gegen diese bestehen kann als beim Schneidkopfsaugbagger. Ein Spülbagger kann auch verhältnismäßig dünne Schichten von 30 cm abtragen. Der Hopper-Bagger (Abbildung 15 c) wird bevorzugt zur Entfernung kleinerer Untiefen bzw. Sandbänke benutzt. Das flexible Saugrohr ist am Schiff nach achtern gerichtet und ermöglicht besseres Arbeiten auch unter schwierigeren Bedingungen. Am Ansaugstutzen ist ein Pflug angebracht, der die Sohle löst. Das angesaugte Material gelangt in den Rumpf des Baggerschiffs. Das bedeutet, dass die Arbeiten unterbrochen werden müssen, wenn das vorhandene Volumen ausgelastet ist. Der Nassbagger fährt dann zur Abladestelle und kehrt erst danach wieder zum Arbeitsgebiet zurück. Dadurch wird der gesamte Prozess teurer als bei den anderen Baggertypen. Da dieser Bagger nicht geankert werden muss, sondern bei Fahrt baggert, ist er auch bei viel Schiffsverkehr noch gut geeignet.

3.3 Durchführung der Arbeiten

Die gesamte Waal wird ständig durch Tiefenmessungen beobachtet. An Stellen, an denen häufig Untiefen auftreten, werden mitunter sogar täglich Messungen durchgeführt. So können Probleme schnell angegangen werden, aber auch längerfristige Trends beobachtet werden. Je nach Problemstellung wird dann in unterschiedlicher Weise mit Nassbaggern reagiert. Die „Untersuchung Morphologie“ von Rijkswaterstaat lief 1998 an. In diesem und dem darauffolgenden Jahr wurden, durch präzise Messungen unterstützt, in der Waal Baggerarbeiten vorgenommen.

3.3.1 Problemstellenerkennung

Das Auffinden von Stellen, an denen baggern notwendig ist oder werden wird, geschieht durch ständiges Feststellen der geringsten Tiefe in einem Flussabschnitt. Trägt man die Häufigkeit dieser kleinsten gemessenen Tiefen (niederländ.: Minst Gepeilde Diepte – MGD) über der Flussachse auf, so

ergibt sich ein klares Bild darüber, wo sich dauerhaft Problemstellen finden (Abbildung 16). Mit dieser Information als Basis kann dann leichter über die zu treffenden Maßnahmen entschieden werden. Ebenfalls ist es dann möglich, durch einen Vergleich der jeweiligen Tiefen festzustellen, welchen Umfang die Maßnahme haben muss, um effektiv zu sein. So ist es beispielsweise nicht sinnvoll, einen Gerinneabschnitt um einen Meter einzutiefen, wenn schon eine Vertiefung von 30 cm eine andere Stelle im Fluss zur neuen MGD macht.

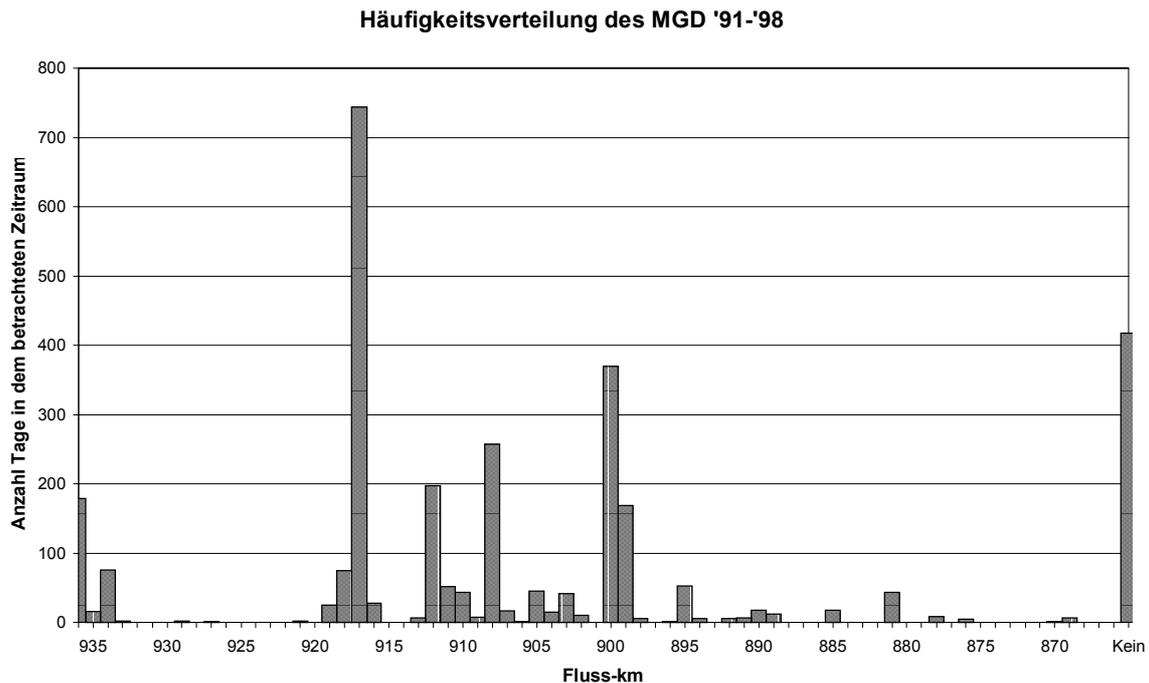


Abbildung 16 – Häufigkeitsverteilung der kleinsten gemessenen Tiefen

Durch eine genauere Analyse der Tiefe der MGD in den Jahren 1991 bis 1998 und des dazugehörigen Abflusses konnten zahlreiche Rückschlüsse und Empfehlungen für das Baggerprogramm aufgestellt werden:

- a) Bei kleineren Abflüssen ist der Wasserstand am Pegel Ruhrort (km 781) in Deutschland maßgebend als kleinste Tiefe; ein Ausbaggern der Waal hat dann keinen Sinn für den internationalen Verkehr, wohl aber für die Binnenschifffahrt.
- b) Bei Abflüssen größer als 2500 m³/s tritt die MGD im unteren Teil der Waal, unterhalb von St. Andries auf, bei Abflüssen unter 2000 m³/s im Abschnitt zwischen Nijmegen (km 884) und St. Andries (km 926).

- c) Unterhalb von St. Andries wurde noch nie eine Mindesttiefe von weniger als 2,80 m festgestellt. Das bedeutet, dass sich die Detailbeobachtungen und Baggermaßnahmen auf den mittleren Abschnitt Nijmegen bis St. Andries konzentrieren können.
- d) 1998 traten die MGDs am häufigsten bei Dodewaard (km 901), Beneden-Leeuwen (km 911 bis km 912) und Dreumel (km 917) auf.
- e) Da sich die morphologische Situation von Jahr zu Jahr ändert, ist es empfehlenswert, nicht nur die notorischen Engstellen und Untiefen zu überwachen, sondern den gesamten Abschnitt.

3.3.2 Instandhaltungsbaggern

Die meiste Zeit des Jahres sind die Dimensionen der Fahrrinne ausreichend, so dass keine Eingriffe nötig werden. Bei zurückgehendem Abfluss und damit sinkendem Wasserstand stellen flachere Stellen Untiefen dar, die für die Schifffahrt ein Hindernis bedeuten. Dabei handelt es sich oft um einzelne Vorkommnisse, in der Regel Unterwasserdünen oder Ansammlungen an Stellen eines Krümmungswechsels.

3.3.3 Profilbaggern

Die andere Art der Baggermaßnahmen stellt das großräumige Herstellen der Fahrrinne dar. Dabei wird über Abschnitte von im Durchschnitt etwa 500 m Länge die Fahrrinne bis zu einer Tiefe von 3,20 m oder tiefer ausgebaggert. Sie wird dadurch gleichmäßiger in ihrer Tiefe. Für die Jahre im Untersuchungszeitraum wurden die Baggerarbeiten nach verschiedenen Vorgehensweisen durchgeführt.

1998 teilten die Baggerpläne die Fahrrinne in zwei gleich große Abschnitte, links und rechts der Flussachse, ein. Die einzelnen Teilstrecken wurden als Arbeitszonen markiert und die jeweils herzustellende Tiefe angegeben. Dabei wurde unterschieden in Bereiche, die auf ihrer vollen Breite oder nur einer Hälfte eine bestimmte Tiefe annehmen sollten (Abbildung 17). Andere Abschnitte dienten als Speicher für das ausgebaggerte Material. Aufgrund der natürlichen Eintiefung der Waal von etwa 1 cm im Jahr wird kein Sand oder Geschiebe dem Fluss entzogen, sondern alles wieder an tieferen Stellen in die Fahrrinne eingebracht.

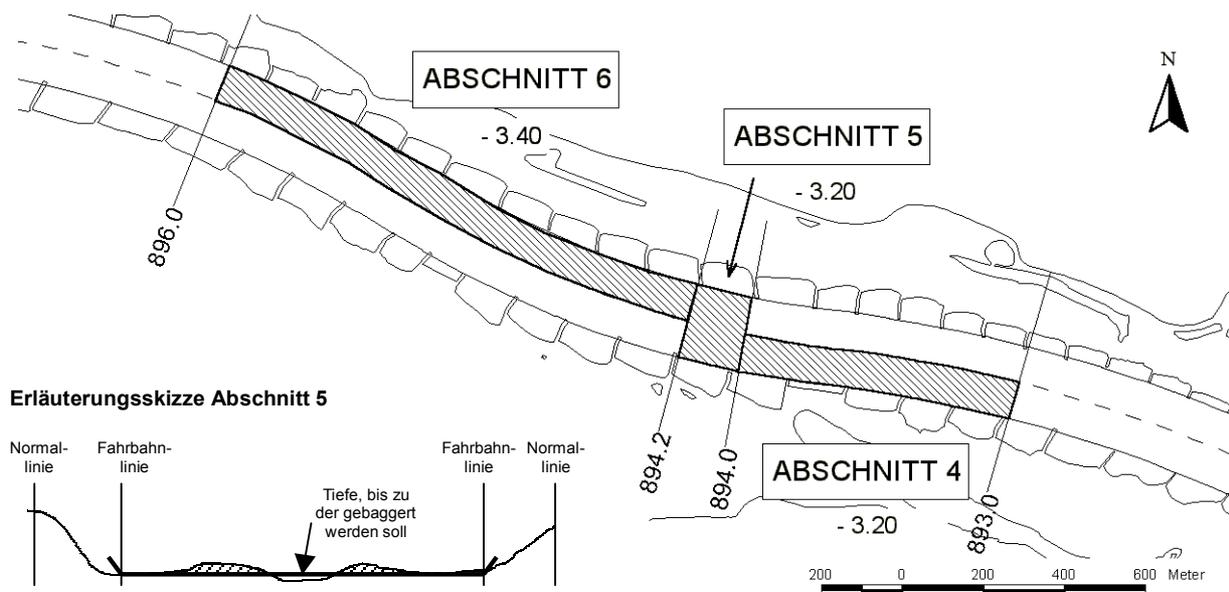


Abbildung 17 – Verschiedene Baggerabschnitte mit den jeweils herzustellenden Tiefen unter GIW. Hier wurden in den Innenseiten der Kurven und im Bereich eines Kurvenübergangs (Abschnitt 5) auf der vollen Breite Baggerarbeiten vorgenommen.

Die Arbeiten fanden fast durchgehend auf der 24 km langen Strecke von Slijk-Ewijk (km 889) bis Wamel (km 913,2) statt. Das entnommene Material durfte an beliebigen Stellen mit Ausnahme der Arbeitsabschnitte und anderen als ungeeignet markierten Positionen wieder in den Fluss zurückgebracht werden. Dabei durfte der abgeladene Sand die Tiefe von 2,80 m unter GIW nicht unterschreiten.

Mit der eigentlichen Ausführung der Arbeiten beauftragte Rijkswaterstaat verschiedene Unternehmen. Die Abrechnung erfolgte 1998 über die gemessenen Volumen des ausgebaggerten Materials. Dazu sind die Baggerschiffe mit geprüften Tabellen ausgestattet. Diese erlauben die einfache Übertragung von Füllstand des Schiffsrumpfes zu geladenem Volumen. Da das Sohlmaterial im Fluss komprimiert vorliegt und nach dem Lösen sein Volumen ändert, wurde ein Korrekturfaktor zur Erfassung der tatsächlichen Volumen herangezogen. Von großer Bedeutung ist auch, dass durch ständigen natürlichen Materialtransport und durch die Strömung Material nachrutscht und so die Baggerzonen zum Teil wieder auffüllt. Es muss folglich dem Fluss stets mehr entnommen werden, als theoretisch im Plan ermittelt wurde. Die Auswertung ergab, dass so etwa 50 % zusätzliches Volumen anfällt. Alle Effekte berücksichtigend, wird für die im Nassbagger gemessenen Volumen ein 1,8 faches der Sohlmaterialvolumen angenommen. Insgesamt waren es 451000 m³, die vom 20. Juli bis zum 14. September 1998 bewegt wurden.

Im Jahr darauf (1999) wurde ein etwas anderes Vorgehen gewählt. Innerhalb des Projektgebietes wurden fünf Abschnitte definiert, in denen Profilbaggern durchgeführt wurde. Dabei dienten die

Abschnitte gleichzeitig auch als Speicherstellen für das gebaggerte Material. Dem Unternehmer war es überlassen, auf welche Art die nötigen Tiefen herzustellen waren. Durch Messungen – vor und nach dem Baggern – war es möglich, die entnommenen Volumen zu bestimmen und danach abzurechnen.

Baggerarbeiten 1999

Abschnitt	von km	bis km	Länge [km]	Volumenmessung		Differenz [m ³]
				vorher [m ³]	nachher [m ³]	
P1	920,5	922,5	2,0	19690	1117	18574
P2	924,4	926,9	2,5	30596	1733	28863
P3	929,6	932,0	2,4	9241	638	8603
P4	933,5	939,0	5,5	42849	3764	39085
P5	942,0	945,9	3,9	15742	869	14874
Summe:						109998

Tabelle 2 – Vorher- und Nachhermessungen der Arbeiten von 1999

Die Baggerarbeiten fanden, je nach Abschnitt, zwischen dem 8. Juli und dem 3. September 1999 statt. Dabei wurde eine Tiefe von 3,2 m unter GIW hergestellt. Neben den „P“-Abschnitten (Tabelle 2) wurden in einem zweiten Arbeitsgang („Q“) vom 16. September bis zum 14. Oktober jeweils nur bis 3,0 m unter GIW ein Instandhaltungsbaggern in den gleichen Abschnitten durchgeführt. Außerdem durfte die neue Abladetiefe von 3,20 m statt wie bisher 2,80 m unter GIW nicht überschritten werden.

3.4 Motivation für die gestellten Fragen

Neben der Planung für die praktische Ausführung und die Arbeitsorganisation spielt stets auch die Evaluation, also die Bewertung der Maßnahmen hinsichtlich der Zielvorgabe, eine bedeutende Rolle. Für die Waal gilt:

- a) Im Vordergrund der Baggerarbeiten steht die Aufrechterhaltung einer genügend breiten und tiefen Fahrrinne. Hierbei ist zu überprüfen, ob die Maßnahmen wirksam sind und ihre Nachhaltigkeit gewährleistet ist.
- b) Es muss geklärt werden, ob die Eingriffe eventuell negative Nebeneffekte provozieren.
- c) Es muss geprüft werden, ob die bisher verwendeten Planungsspielräume richtig angenommen wurden oder eventuell neue Randbedingungen aufgetreten sind.

Die Erfahrung, die durch eine solche Nachher-Prüfung gewonnen werden kann, wird in zukünftige Planungen miteinfließen und diese somit verbessern. Aus den obenstehenden Vorgaben a) bis c) wurden praktische Fragen formuliert:

- **Analyse der Entwicklung der Kanalbreite** – Wie lange dauert es, bis die ausgebaggerte Fahrrinne sich von den Baggermaßnahmen „erholt“ hat und wieder Breiten von z.B. 150, 120 oder 100 m annimmt? Bestehen Unterschiede im Verhalten der verschiedenen Abschnitte der Waal?
- **Analyse der Wirkungsweise des ausgebaggerten und wiedereingebrachten Materials** – Zur Zeit werden die entnommenen Mengen in Erosionszonen nahe den Bühnenköpfen, und/oder direkt im Unterstrom der Baggerstelle zurückgespeichert. Wie lange verblieb das abgeladene Material an diesen Stellen? Führt die einsetzende Erosion des Materials zur Bildung von unerwünschten Untiefen weiter unterhalb?
- **Potenzielles Speichervolumen** – Wie groß ist das Speichervermögen der Waal für wiedereingebrachtes Material?

Die ursprüngliche Planung des Projektes sah noch eine weitere Frage vor:

- **Geeignete Abladestellen** – Gibt es in der Waal bei Niedrigwasser außerhalb der Fahrrinne Stellen, an denen stets Sedimentation auftritt? Diese Orte könnten in begrenztem Umfang als Abladestellen für ausgebaggertes Material dienen, da dann gesichert ist, dass dieses auch über größere Zeiträume dort verbleibt.

Diese letzte Frage wurde aufgrund der noch unzureichenden Daten zurückgestellt. Es sind jedoch für die nahe Zukunft Versuche vorgesehen, um mehr Erfahrungen zu gewinnen.

Für die Baggeraktivitäten in der Waal soll ein Entscheidungshilfesystem (Decision Support System – DSS) erstellt werden. Dabei geht es darum, die planenden Ingenieure in ihrer Tätigkeit wirksam zu unterstützen. Das „WaalBOS“ ist ein Softwarepaket, das über das Internet oder ein lokales Netzwerk den Zugang zu umfangreichem Datenmaterial bietet. Dazu gehören Karten, Abflussdaten und Pegelstände. Anhand der gemessenen Bodenlagen können die Baggervolumen und deren Kosten errechnet werden. Ende 1999 war bereits eine erste Version fertig, welche seit Februar 2000 im Einsatz ist. Das endgültige „WaalBOS“ soll Anfang 2003 in Betrieb gehen. Das Endprodukt wird dann um zahlreiche Funktionen erweitert werden. Dazu werden Entscheidungssysteme für kleinskalige Maßnahmen (Entfernung von einzelnen Engstellen und Untiefen) sowie große Baggermaßnahmen, deren Optimierung und Prioritätseinordnung gehören. Ferner sollen Vorhersagemodelle für die mittelfristige Abflusssituation (vier Wochen im Voraus) und die Bodenentwicklung und Morphologie integriert werden. In diesem Kontext geht die vorliegende Studie nicht nur auf die praktischen Fragen ein, sondern kann auch für das Entscheidungssystem von Bedeutung sein.

4 Datengrundlage

4.1 Einleitung

Dank moderner Messtechnik ist es heute möglich, sich innerhalb sehr kurzer Zeit ein Bild über den Zustand einer Flusssohle zu machen. Dabei kann mit einem kontinuierlichen Messvorgang eine zusammenhängende Karte erzeugt werden, statt wie bisher, aus einzelnen Tiefenmessungen. In diesem Kapitel soll das Messverfahren erläutert werden und die Daten, die für diese Studie zur Verfügung standen, vorgestellt werden.

4.2 Das Messverfahren

Echolote arbeiten mit Sonar, also der Aussendung eines akustischen Signals. Aus der Zeit, die das ausgesendete und reflektierte Signal benötigt, um wieder zum Sender zu gelangen, kann eine Entfernung berechnet werden. Bei einem normalen Echolot wird so nur die kürzeste Entfernung zwischen Sende- bzw. Empfangseinheit zur Flusssohle gemessen. Ein mit einem Echolot ausgestattetes Schiff, das sich über die zu messende Stelle bewegt, wird eine Linie von Tiefenmessungen erzeugen. Dieses Verfahren ist unpraktisch, da auf diese Weise erst nach mehrmaligem Überfahren des Messgebietes ein zusammenhängendes Bild entsteht. Um mehr Informationen mit einer Fahrt zu erhalten, müssen modernere Messverfahren eingesetzt werden. Hierfür eignen sich zwei Gerätetypen:

- Interferometer
- Multi-Beam-Geräte

Interferometer funktionieren nach dem Prinzip, dass wie bei einem normalen Echolot ein Signal ausgesendet wird und dessen Reflektionszeit gemessen wird. Das Signal wird in alle Richtungen ausgesendet, und auch dementsprechend aus verschiedenen Richtungen reflektiert. Durch mindestens zwei Empfangseinheiten kann festgestellt werden, aus welchem Winkel das Echo kam. Durch die zeitliche Differenz zum ausgesendeten Impuls kann die Entfernung bestimmt werden. Aus der Kombination aller Messungen entsteht ein dreidimensionales Bild des Unterwasserbodens.

Beim Multi-Beam-Verfahren (Abbildung 18) werden keine Richtungsinformationen ermittelt. Wie der Name bereits andeutet, handelt es sich dabei um mehrere einzelne Strahlen, die separat die Entfernung

zur Flusssohle messen. Diese sind gerichtet; das ausgesendete Signal wirkt nur in eine definierte Richtung. Ein Multi-Beam-Gerät entspricht daher bis zu etwa 60 einzelnen, gerichteten Echoloten. Bei einer Messfahrt und einem äußersten Strahlwinkel von 120° werden so, je nach Tiefe, eine Breite von 10 bis 20 m aufgenommen. Durch mehrere Fahrten längs der Flussachse, deren Messbereiche nebeneinander liegen (mit einem sinnvollen Überlappungsbereich), kann ein breiterer Flussquerschnitt aufgenommen werden.

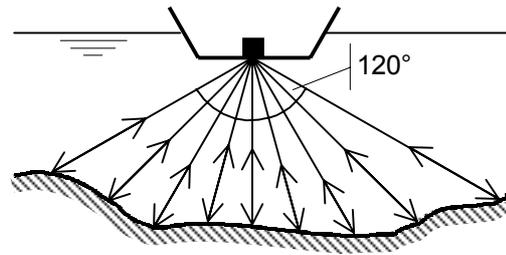


Abbildung 18 – Messen mit einem Multi-Beam Echolot

Eine zusätzliche Methode, das Auswerten von Luftbildinformationen zur Ermittlung der Wassertiefen, wurde in einer Studie an der Waal getestet. Da der Bericht jedoch noch nicht vorlag, ist noch ungewiss, ob dieses Verfahren für die Waal mit ausreichender Genauigkeit angewendet werden kann.

Die Waal wird mit SeaBat-Multi-Beam Echoloten überwacht. Diese eignen sich bei den relativ kleinen Tiefen eines Flusses besser. Der sogenannte „Fußabdruck“ eines Strahls ist klein, und die Tiefenermittlung wird genauer. Da die ausgesendeten Signalstrahlen mehrere Zentimeter Durchmesser haben und dieser sich, je tiefer der Boden liegt, immer mehr aufweitet, wird die kleinste Entfernung zur abgetasteten Fläche als Messwert verwendet. Untersuchungen zufolge haben Multi-Beam Messungen eine Genauigkeit von etwa ± 5 cm. Wichtig für die praktischen Messungen ist auch, mit welcher Geschwindigkeit das Echolot ohne Messfehler über Grund bewegt werden kann. Hersteller geben als Höchstgeschwindigkeit 18 Knoten an, was es ermöglicht, sehr große Bereiche in kurzer Zeit zu vermessen.

Neben der eigentlichen Tiefe ist auch die x,y-Position der Messung sowie die geographische Höhe des Echolotes von entscheidender Bedeutung. Auf der Waal kommt dafür das DGPS System zum Einsatz. Das amerikanische Militär hat mit dem GPS (Global Positioning System) ein weltweit verfügbares Satellitennavigationssystem aufgebaut. Für zivile Nutzer bietet das System eine Genauigkeit von 100 m. Die präziseren Signale für eine Genauigkeit von bis zu 3 m wurden bis vor etwa drei Monaten noch verschlüsselt übertragen. Um diese Signale wieder zu entschlüsseln und damit nutzbar zu machen, musste ein GPS Empfänger an einem genau vermessenen Ort aufgestellt werden. Dieser wurde als Referenzstation verwendet. Die empfangenen Daten und die wirkliche Position wurden miteinander verglichen. Die Differenz wurde an die im mobilen Einsatz befindlichen Geräte weitergegeben, womit diese dann den von den Satelliten empfangenen Wert korrigierten und so ebenfalls eine Genauigkeit von 3 m erreichten. Dieses Verfahren wird DGPS genannt. Die weitere

Steigerung, das „precision DGPS“ (PDGPS) oder auch RTK (Real Time Kinematic), bestimmt die Trägerphase der einzelnen Satellitensignale und erreicht damit eine Genauigkeit bis auf etwa 1 cm.

4.3 Postprocessing

Das Verarbeiten der gemessenen Rohdaten und deren Umwandlung in ein Format, welches der Ingenieur für seine praktische Tätigkeit nutzen kann, wird „Postprocessing“ genannt. Aus den Tiefeninformationen des Echolotes und der Position des Messgerätes, die durch das DPGS bestimmt wurde, werden in einem ersten Schritt 3D-Koordinaten (x, y, z) errechnet. Diese sind georeferenziert und daher zum niederländischen Referenzpunkt ausgerichtet. So wird die Höhe eines gemessenen Punktes relativ zu NAP (das niederländische Normalnullniveau) angegeben. Alle 3D Koordinaten werden in das ARC/Info GIS (Geographisches Informationssystem) Format übertragen. Hier sind ebenfalls viele Möglichkeiten der Datenaufbereitung denkbar. Wegen der besseren Handhabung werden diese Daten generell in Raster umgewandelt, wobei die Größe einer Rasterzelle sinnvoll zu Genauigkeit und Aufnahmegeschwindigkeit der Messung gewählt werden sollte. Die Waal-Daten schwanken in der Rasterzellengröße von 5 m x 5 m bis 1 m x 1 m. Der letzte Schritt beinhaltet die Umwandlung der Höheninformation ausgerichtet zum gleichwertigen Wasserstand (GIW) von 1998 und umgerechnet in Tiefen- statt Höhenwerte. Dieser gesamte Vorgang benötigt zur Zeit noch etwa einen Arbeitstag. Durch Messen bei gleichzeitigem Postprocessing soll hier in Zukunft Zeit eingespart werden.

4.4 Überblick über die gemessenen Daten

Von größtem Interesse für die Lösung der Aufgabe, die Rijkswaterstaat obliegt, ist, wie bereits erwähnt, der Abschnitt der Waal von Nijmegen bis St. Andries. Um einen ersten Überblick zu erhalten, wurde im März 1998 von km 886 bis km 920 bei einer Rasterzellenkantenlänge von 5 m von Nijmegen bis Dreumel vermessen. Die morphologischen Untersuchungen konzentrieren sich nicht auf die volle 40 km lange Strecke, sondern auf vier Teilabschnitte, die aufgrund der Übersichtskarte und Erfahrungswerten ausgewählt wurden (Abbildung 19 und Tabelle 3).

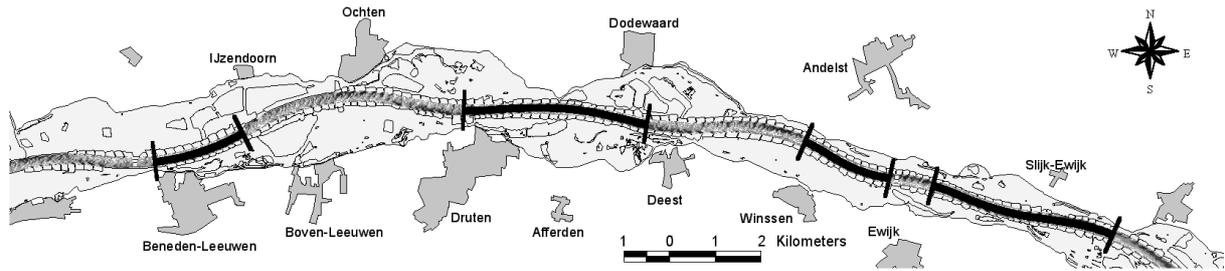


Abbildung 19 – Die vier Abschnitte im Untersuchungsgebiet

Gemessene Abschnitte

Name	Gemessen		Länge [km]
	Von [km]	Bis [km]	
Ewijk	888,8	892,9	4,1
Winssen	893,9	895,9	2,0
Dodewaard-Druten	899,4	903,4	4,0
Beneden-Leeuwen	908,4	910,4	2,0

Tabelle 3 – Definition der Messabschnitte

4.5 Die Messstrecken

Neben der einmaligen Messung des gesamten Abschnittes im März 1998 wurden beginnend mit Juli fast jeden Monat Messungen in den Teilstrecken vorgenommen. Die Baggararbeiten wurden August 1998 und August 1999 ausgeführt. Während dieser Zeit fanden keine monatlichen Messungen statt, wohl aber 1998 tägliche Messungen für ein bis zwei Wochen, um die unmittelbaren Effekte des Baggerns zu erkennen. Von August 1999 existieren keine regulären Aufnahmen der Waal, statt dessen die Vor- und Nachhermessungen, die zur Kontrolle des ausführenden Unternehmers dienten. Im folgenden sollen die einzelnen Teilstrecken kurz vorgestellt sowie deren Mess- und Baggartermine angegeben werden.

4.5.1 Ewijk

Der erste Abschnitt wurde in der „Untersuchung Morphologie“ von Rijkswaterstaat in zwei aufgeteilt: „Slijk-Ewijk“ (km 889 bis km 891) und „Ewijk“ (km 891 bis km 893). Da beide Teile unmittelbar aneinander hängen, wurden sie zur besseren Handhabung für die hier angestellte Untersuchung zusammengefasst. Bei Ewijk fanden 1999 keine Baggararbeiten statt.

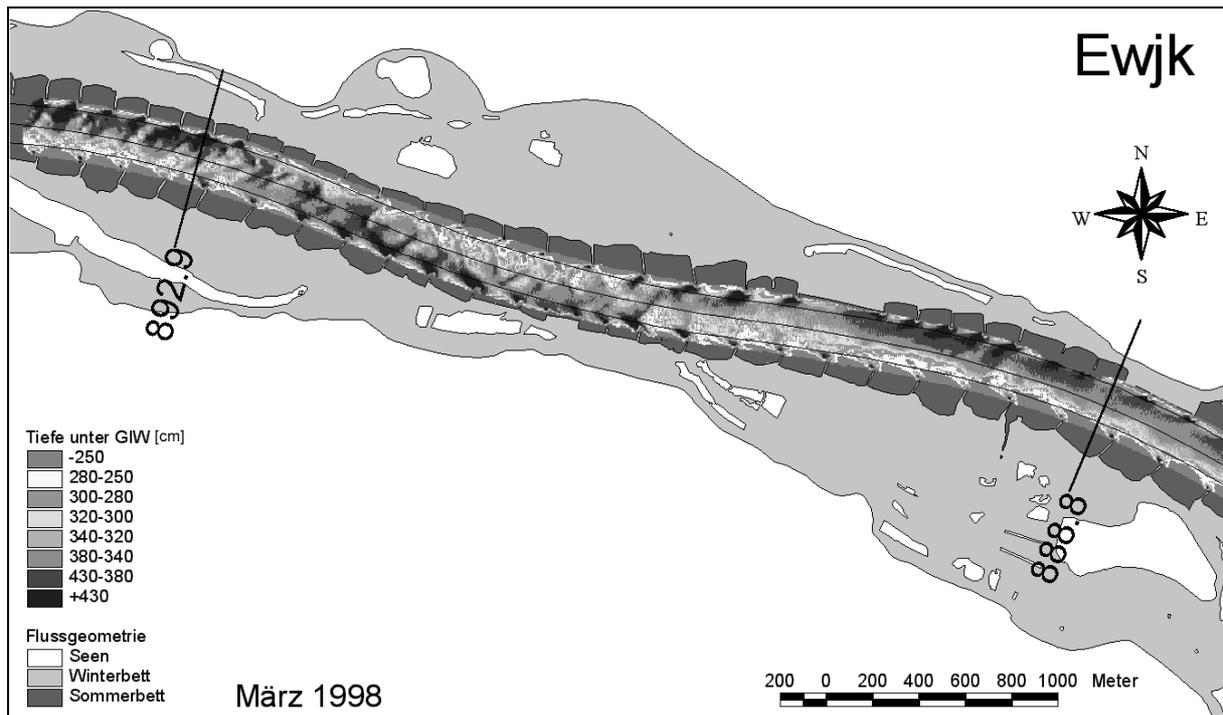


Abbildung 20 – Übersichtsmessung im März 1998 bei Ewijk

Ewijk - Kalenderübersicht

Bezeichnung	Rastergröße [m]	Datum Von (Bis)	Monats- Messung	Tages- Messung	Kommentar
03/98	5	17.03.98	x		Erste Messung
04/98	2	21.04.98	x		
05/98	2	18.05.98	x		
06/98	2	19.06.98	x		
07/98	2	15.07.98	x		
	2	20.07.98			Baggerphase Beginn der täglichen Messungen Nur von km 889 bis km 891 (Slijk-Ewijk) verfügbar.
	2	27.07.98		x	
	1	03.08.98		x	
	1	04.08.98		x	
	1	05.08.98		x	
	1	06.08.98		x	
	1	07.08.98		x	
	1	11.08.98		x	
	1	12.08.98		x	
	1	13.08.98		x	
	1	14.08.98		x	
	1	31.08.98	x	x	
	2	30.09.98		x	
09/98	2	05.10.98	x		
10/98	2	02.11.98	x		
12/98	2	30.11.98	x		
01/99	2	06.01.99	x		
02/99	2	16.02.99	x		
03/99	2	23.03.99	x		
04/99	2	18.04.99	x		
05/99	2	25.04.99	x		
06/99	2	16.06.99	x		
09/99	2	12.08.99	x		Nicht vollständig
10/99	2	22.10.99	x		
11/99	2	16.11.99	x		
12/99	2	16.12.99	x		Unvollständig ("Daten-Loch")
01/00	2	17.01.00	x		
02/00	1	18.02.00	x		
03/00	1	29.03.00	x		
05/00	2	25.05.00	x		

Tabelle 4 – Vorhandene Daten und Termine für Ewijk

4.5.2 Winssen

Für diesen Abschnitt existieren sowohl tägliche als auch monatliche Messungen. Es wurden in beiden Jahren des Untersuchungszeitraumes Baggermaßnahmen durchgeführt. Damit ist dieser Abschnitt von allen am besten datenmäßig erfasst.

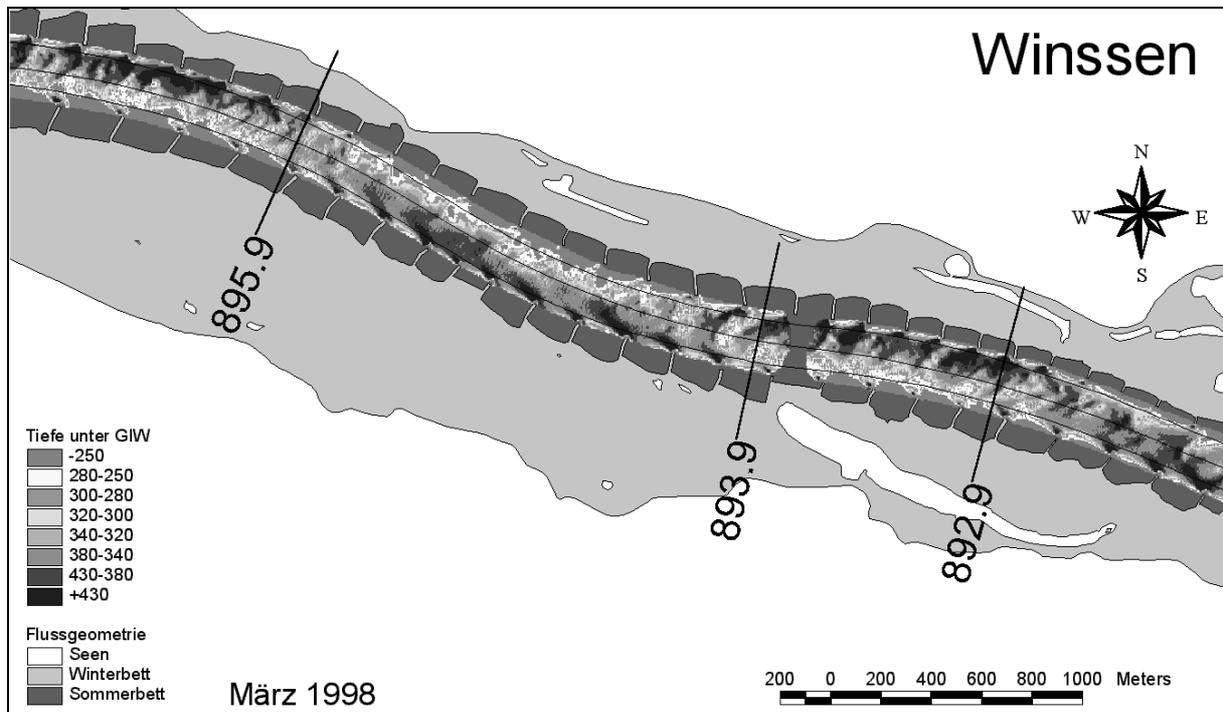


Abbildung 21 – Übersichtsmessung im März 1998 bei Winssen; rechts weiter im Oberstrom schließt sich Ewijk an

Winssen - Kalenderübersicht

Bezeichnung	Rastergröße [m]	Datum		Monats-	Tages-	Kommentar	
		Von	(Bis)				Messung
03/98	5	18.03.98		x		<i>Erste Messung</i>	
04/98	2	22.04.98		x			
05/98	2	19.05.98		x			
06/98	2	17.06.98		x			
07/98	2	16.07.98		x			
		27.07.98	14.08.98				Baggerphase
	1	17.08.98			x		<i>Beginn der täglichen Messungen</i>
	1	18.08.98			x		
	1	19.08.98			x		
	1	20.08.98			x		
	1	21.08.98			x		
	1	24.08.98			x		
	1	25.08.98			x		
	1	26.08.98			x		
	1	27.08.98			x		
	1	28.08.98			x		
09/98	2	01.09.98		x	x		
	1	07.09.98			x		
	1	10.09.98			x		
	1	11.09.98			x		
	1	14.09.98			x		
	1	18.09.98			x		
10/98	2	06.10.98		x			
11/98	2	03.11.98		x			
12/98	2	01.12.98		x			
01/99	2	07.01.99		x			
02/99	2	12.02.99		x			
03/99	2	22.03.99		x			
04/99	2	17.04.99		x			
05/99	2	25.05.99		x			
06/99	2	21.06.99		x			
P_In	2.5	08.07.99				<i>Vor Baggerphase '99 (1)</i>	
P_Out	2.5	15.07.99				Baggerphase	
09/99	2	17.08.99		x		<i>Nach Baggerphase '99 (1)</i>	
Q_In	2.5	17.09.99				<i>Vor Baggerphase '99 (2)</i>	
Q_Out	2.5	24.09.99				Baggerphase	
10/99	2	21.10.99		x		<i>Nach Baggerphase '99 (2)</i>	
11/99	2	22.11.99		x			
12/99	2	21.12.99		x			
01/00	2	14.01.00		x			
02/00	1	18.02.00		x			
03/00	1	31.03.00		x			
05/00	2	25.05.00		x			

Tabelle 5 – Vorhandene Daten und Termine für Winssen

4.5.3 Dodewaard-Druten

Von Dodewaard-Druten wurden 1998 keine täglichen Messungen durchgeführt. Die Baggermaßnahmen 1999 erstreckten sich nicht auf den ganzen Abschnitt, wie 1998.

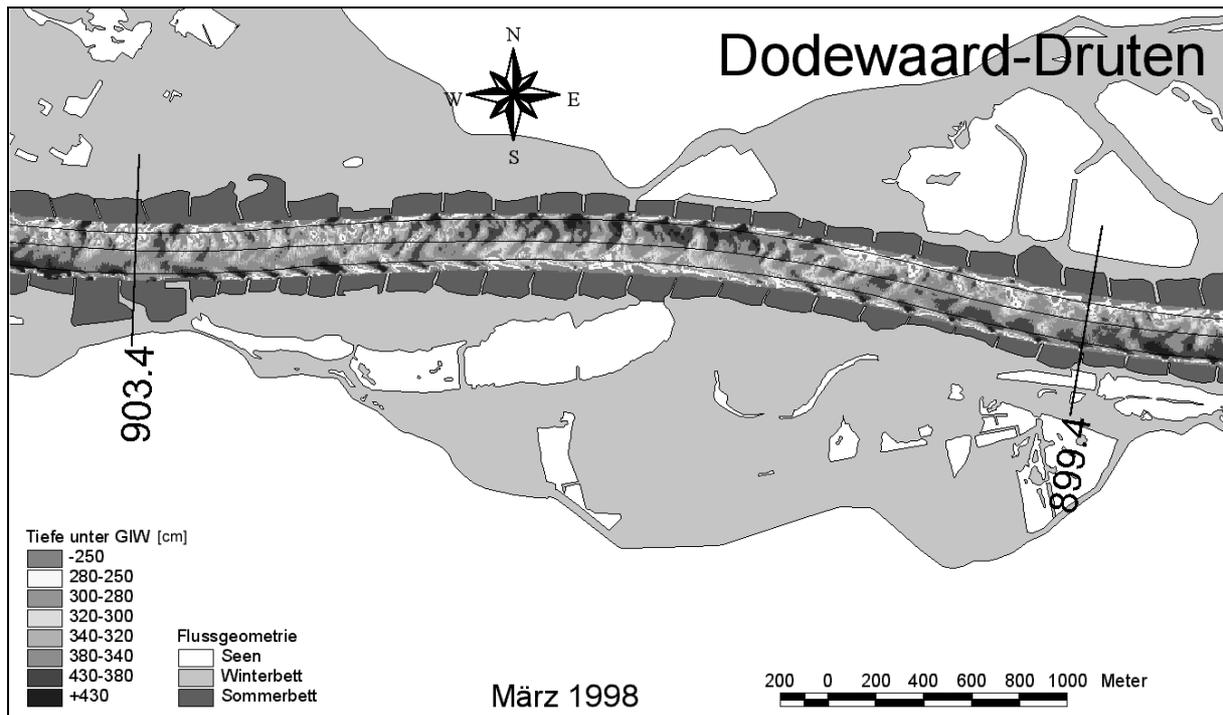


Abbildung 22 – Übersichtsmessung im März 1998 bei Dodewaard-Druten

Dodewaard-Druten - Kalenderübersicht

Bezeichnung	Rastergröße [m]	Datum Von (Bis)	Monats- Messung	Tages- Messung	Kommentar	
03/98	5	19.03.98	x		Erste Messung	
04/98	2	23.04.98	x			
05/98	2	20.05.98	x			
06/98	2	16.06.98	x			
07/98	2	17.07.98	x			
		03.08.98				Baggerphase
09/98	2	03.09.98	x			
10/98	2	07.10.98	x			
11/98	2	04.11.98	x			
12/98	2	02.12.98	x			
01/99	2	11.01.99	x			
02/99	2	12.02.99	x			
03/99	2	19.03.99	x			Vor Baggerphase '99 (1)
04/99	2	16.04.99	x			
05/99	2	19.05.99	x			Baggerphase
06/99	2	14.06.99	x			
P_In	2.5	15.07.99				Nach Baggerphase '99 (1)
P_Out	2.5	29.07.99			Nicht vollständig	
09/99	2	16.08.99	x		Vor Baggerphase '99 (2)	
Q_In	2.5	24.09.99				
Q_Out	2.5	29.09.99	x		Baggerphase	
10/99	2	20.10.99	x			
11/99	2	18.11.99	x		Nach Baggerphase '99 (2)	
12/99	2	17.12.99	x			
01/00	2	07.01.00	x			
02/00	1	25.02.00	x			
03/00	1	10.04.00	x			
05/00	2	17.05.00	x			

Tabelle 6 - Vorhandene Daten und Termine für Dodewaard-Druten

4.5.4 Beneden-Leeuwen

Dieser Abschnitt ist, wie Winssen, durch eine umfangreiche Datenbasis, gut erfasst. Es ist auch der einzige Abschnitt, bei dem kurz vor den Baggermaßnahmen 1998 noch eine Messung durchgeführt wurde.

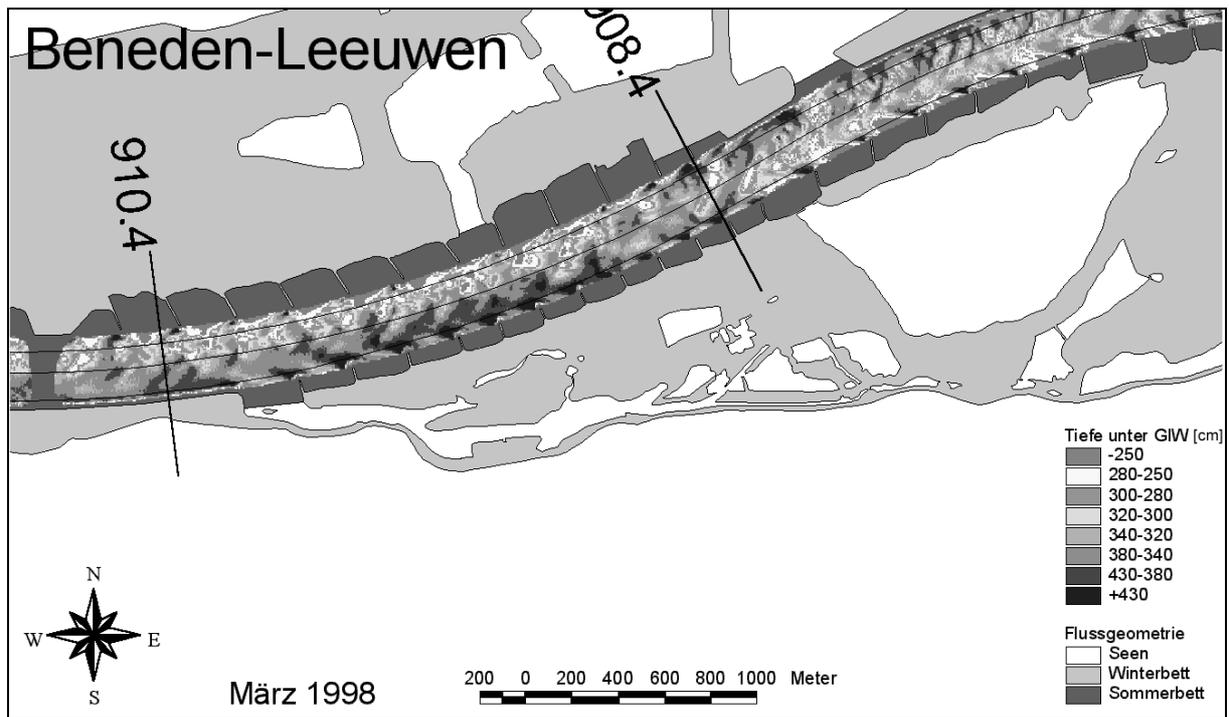


Abbildung 23 – Übersichtsmessung im März 1998 bei Beneden-Leeuwen

Benden-Leeuwen - Kalenderübersicht

Bezeichnung	Rastergröße [m]	Datum Von (Bis)	Monats-Messung	Tages-Messung	Kommentar
03/98	5	21.03.98	x		Erste Messung
04/98	2	24.04.98	x		
05/98	2	25.05.98	x		
06/98	2	15.06.98	x		
07/98	2	21.07.98	x	x	Beginn der täglichen Messungen
09/98	2	02.09.98	x	x	
		07.09.98			Baggerphase
	1	21.09.98		x	
	1	22.09.98		x	
	1	23.09.98		x	
	1	24.09.98		x	
	1	25.09.98		x	
	1	28.09.98		x	
	1	29.09.98		x	
	1	30.09.98		x	
	1	01.10.98		x	
10/98	2	09.10.98	x	x	
11/98	2	06.11.98	x		
12/98	2	04.12.98	x		
01/99	2	08.01.99	x		
02/99	2	11.02.99	x		
03/99	2	18.03.99	x		
04/99	2	14.04.99	x		
05/99	2	18.05.99	x		
06/99	2	15.06.99	x		
P_In	2.5	11.08.99			Vor Baggerphase '99 (1)
					Baggerphase
P_Out	2.5	13.08.99			Nach Baggerphase '99 (1)
09/99	2	16.08.99	x		
Q_In	2.5	29.09.99			Vor Baggerphase '99 (2)
					Baggerphase
Q_Out	2.5	05.10.99			Nach Baggerphase '99 (2)
10/99	2	12.10.99	x		
11/99	2	17.11.99	x		
12/99	2	20.12.99	x		
01/00	2	06.01.00	x		
02/00	1	24.02.00	x		
03/00	1	04.04.00	x		
05/00	2	11.05.00	x		

Tabelle 7 - Vorhandene Daten und Termine für Benden-Leeuwen

4.6 Datenüberprüfung

Eine Überprüfung der gemessenen Daten auf ihre Richtigkeit fand nicht statt. Die Daten wurden, mit wenigen Ausnahmen, direkt verwendet. So war die Messung „Januar 1999“ zunächst durch einen falschen Höhenreferenzwert etwa 20 cm tiefer gelegen als die übrigen Messungen. Auch einzelne kleinere Fehler in der Größenordnung von einigen hundert Rasterzellen konnten festgestellt werden. Dabei handelt es sich um Abweichungen um 30 bis 50 m der Tiefe unter GIW, was nur auf einen Anfangsmessfehler zurückgeführt werden kann. Diese Fehler konnten nicht behoben werden, weshalb diese Stellen daher in der Untersuchung ausgelassen wurden. Zur Zeit betreibt Rijkswaterstaat eine Studie, bei der die früheren Echolotmessungen mit den neuen Multi-Beam-Messungen verglichen werden sollen. Es wird damit gerechnet, dass das neue Messverfahren genauer arbeitet. Die bessere Genauigkeit wird dabei vor allem durch die höhere Auflösung der nun als Rasterdaten verfügbaren Daten erreicht.

4.7 Datenaufbereitung

4.7.1 Einteilung in 100m – Querschnitte

Alle Analysen fanden auf der Basis von 100 m - Flussquerschnitten statt. Diese Unterteilung war sinnvoll, weil die Definition der morphologischen Einheiten mit einer Genauigkeit von 100 m festgelegt wurden. Außerdem sind die Daten der Bagger- und Abladestellen in 100 m - Schritten angegeben. Für die praktische Bearbeitung der Daten war eine Aufteilung ebenfalls sinnvoll.

Die Unterteilung wurde senkrecht zur Flussachse durchgeführt. Da die Achse nicht immer parallel zu den Fahrbahnberandungen verläuft (Abbildung 5, Seite 4), entsprechen folglich auch die Querschnitte nur näherungsweise den Fahrrinnenquerschnitten.

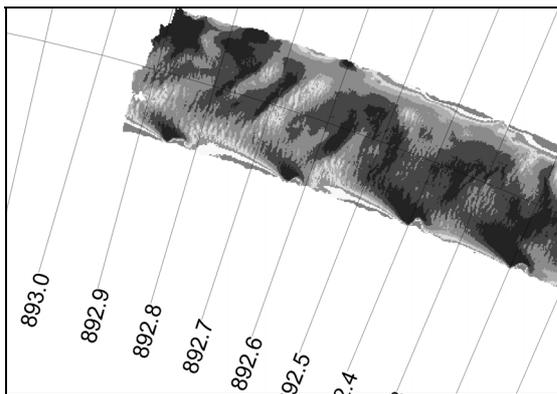


Abbildung 24 – Aufteilen der Daten in 100m-Querschnitte

4.7.2 Einteilung in morphologische Einheiten

Die morphologischen Einheiten unterteilen die Waal in festgelegte Abschnitte. Hierbei wird zwischen Links- und Rechtskurven sowie Krümmungswechseln unterschieden. Einzelne Einheiten sind dabei zwischen 0,3 und 3,0 km lang. Mit Hilfe dieser Definition können gezielt bestimmte Phänomene untersucht werden oder gleichartige Abschnitte miteinander verglichen werden.

Angewendet auf die Messdaten bedeutet dies, dass die vier Teilabschnitte noch einmal unterteilt werden. Da die gemessenen Daten nicht immer die vollen morphologischen Einheiten abdecken, ergibt sich zwangsläufig eine etwas andere Aufteilung. Tabelle 8 zeigt die neue Streckenunterteilung.

Definition der Kurven und Übergänge

Nr.	Morphologische Einheit Nr.	Name	Typ	Sedimentationszone	Definition		Vorhandene Daten		Länge [m]	Radius [m]	Krümmung [1/m]
					Von [km]	Bis [km]	Von [km]	Bis [km]			
A	17	Slijk-Ewijk	Rechtskurve	links	887,5	890,5	888,8	890,4	1600	5830	1,7E-04
B	18	Beuningen	Übergang	überall	890,5	891,0	890,5	890,9	500	-	-
C	19	Loenen	Rechtskurve	rechts	891,0	892,1	891,0	892,0	1100	5726	1,7E-04
D	20	Ewijk	Linkskurve	links	892,1	893,8	892,1	892,8	800	4673	2,1E-04
E	21	Brug A50	Übergang	links	893,8	894,2	893,9	894,1	300	-	-
F	22	Winssen	Rechtskurve	rechts	894,2	895,5	894,2	895,4	1300	3976	2,5E-04
G	23	Andelst	Übergang	überall	895,5	896,0	895,5	895,8	400	-	-
H	26	Deest	Rechtskurve	rechts	898,3	900,4	899,4	900,3	1000	9430	1,1E-04
I	27	Hooge waard	Linkskurve	links	900,4	902,0	900,4	901,9	1600	8552	1,2E-04
J	28	De Tempel	Übergang	überall	902,0	902,8	902,0	902,7	800	-	-
K	29	Druten	Rechtskurve	rechts	902,8	904,8	902,8	903,3	600	6314	1,6E-04
L	31	Ijzendoorn	Übergang	überall	907,4	908,7	908,4	908,6	300	-	-
M	32	Beneden-Leeuwen	Rechtskurve	rechts	908,7	911,8	908,7	910,3	1700	6572	1,5E-04

* Einteilung in Querschnitte von 100m Länge

Tabelle 8 – Definition der Kurven und Übergänge für das Untersuchungsgebiet in der Waal

Ewijk wird in vier, Winssen in drei, Dodewaard-Druten in vier und Beneden-Leeuwen in zwei Abschnitte unterteilt. Abbildung 25 gibt einen geographischen Überblick.

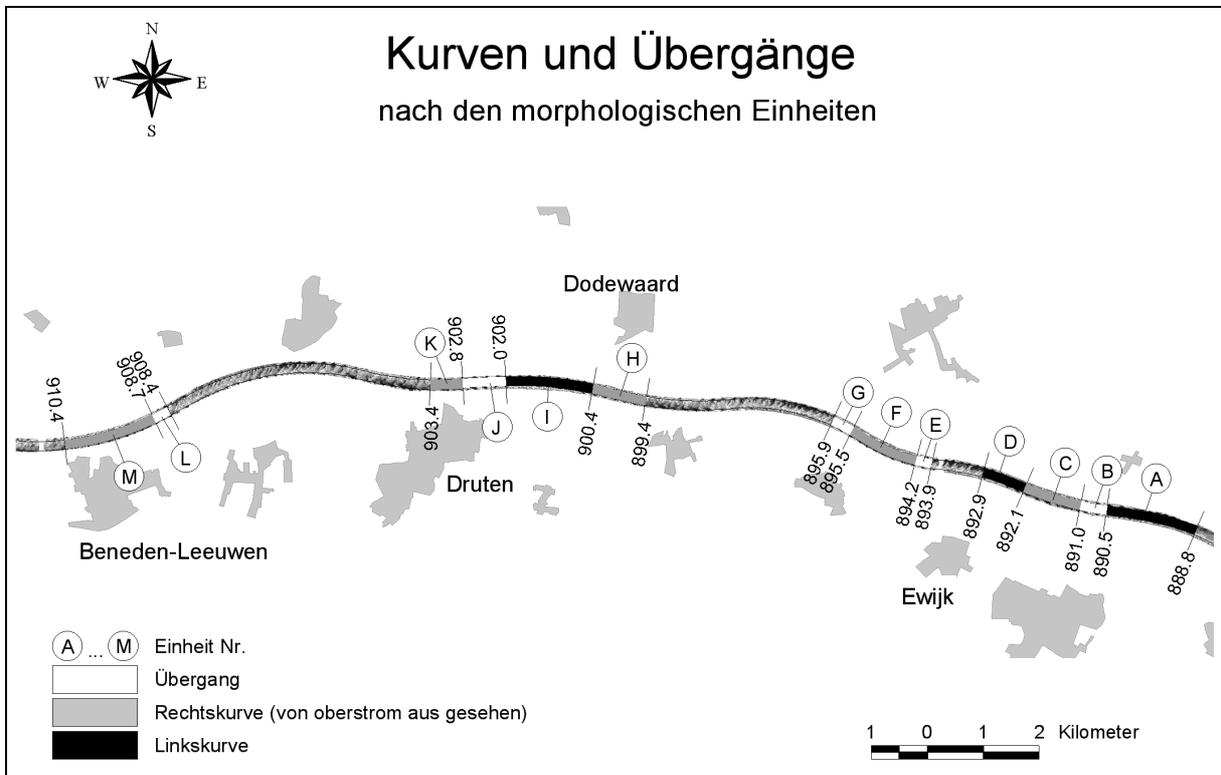


Abbildung 25 – Kurven und Übergänge gemäß den morphologischen Einheiten

4.8 Abflussdaten

Daten für den Abfluss sind für Januar 1998 bis Mai 2000 vorhanden. Sowohl für den Rhein als auch für die Waal werden täglich an den Pegeln Lobith und Pannerden Kop Messungen vorgenommen. Abbildung 26 zeigt die Ganglinie. Es ist zu erkennen, dass der Abfluss bei gleichwertigem Wasserstand (GIW) fast nie unterschritten wird. Die geringsten Abflüsse sind während der beiden

Jahre jeweils zwischen August und Oktober zu finden, die Spitzenwerte in den Wintermonaten. Tabelle 9 gibt die wichtigsten Abflussmerkmale wieder.

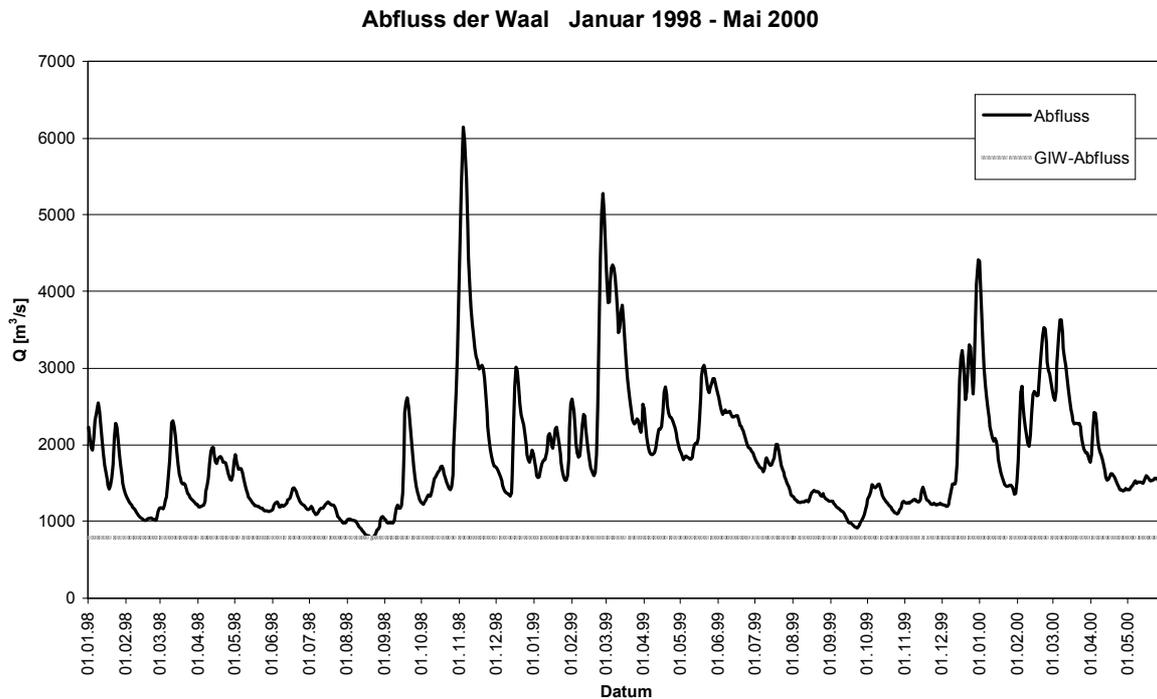


Abbildung 26 – Tägliche Werte des Abflusses der Waal

Abflussmerkmale für den Untersuchungszeitraum

Zeitraum	Mittelwert [m³/s]	Std.abw. [m³/s]	Maximum [m³/s]	Minimum [m³/s]
Gesamter Zeitraum (Januar 1998 bis Mai 2000)	1838	808	6142	779
1. Jahr (August 1998 bis Juli 1999)	2130	931	6142	779
2. Jahr (August 1999 bis Mai 2000)	1780	731	4416	915

Tabelle 9 – Abflussmerkmale der Waal im Untersuchungszeitraum

5 Analyse der Kanalbreitenentwicklung

5.1 Einleitung

Der Erfolg der Baggermaßnahmen in der Waal kann anhand der Fahrrinnenbreite und -tiefe gemessen werden. Ziel ist es, eine Breite von 170 m bei einer Kanaltiefe von 2,80 m unter GIW dauerhaft herzustellen. Die meiste Zeit des Jahres ist der Wasserstand bzw. der Abfluss so groß, dass diese Bedingungen erfüllt sind. In den Sommermonaten können jedoch Probleme auftreten. Da die Baggermaßnahmen nur einmal im Jahr stattfinden, ist es erforderlich, damit die Niedrigwasserzeit zu überbrücken.

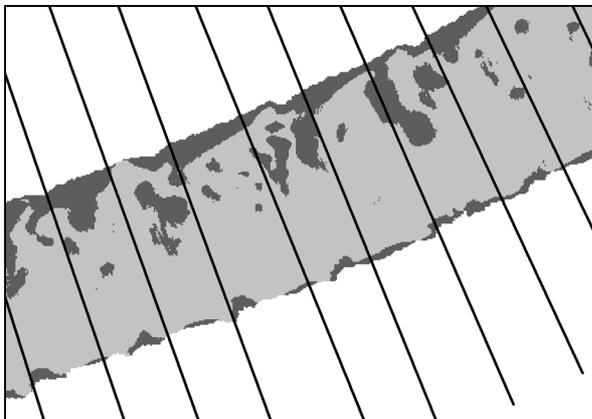


Abbildung 27 – Auffinden der Kanalbreite für 100m - Abschnitte

Daraus ergibt sich die Frage, nach welcher Zeit der ausgebagerte Kanal durch Versandung wieder auf unzulässige oder unzureichende Breiten zurückfällt. Zu diesem Zweck werden die Daten zunächst durch Umrechnung in zwei Klassen unterteilt: Zellen mit Tiefen kleiner als 280 cm werden als Untiefen gekennzeichnet, die anderen sind ausreichend tief. Nun wird für jeden 100 m - Querschnitt die Kanalbreite ermittelt (siehe Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.).

Einzelne kleine „Inseln“ wurden dabei ignoriert. Im Bereich von Übergängen, wo durch Materialansammlungen Untiefen entstehen, wurde stets ein sinnvoller Fahrweg um die Hindernisse als wahrscheinlicher Kanal angenommen (Abbildung 28). In diesen Fällen war die Kanalbreite allerdings meistens schon geringer als gewünscht.

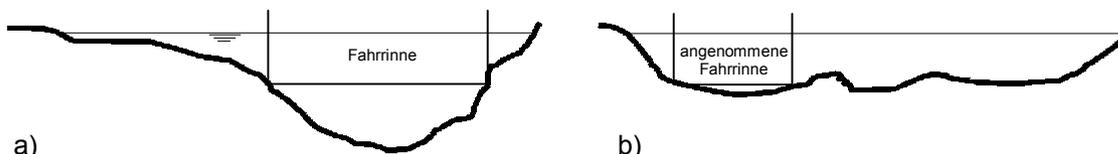


Abbildung 28 – Definition der Fahrrinne a) Krümmung, b) Übergang

Führt man eine solche Berechnung bei allen Abschnitten und jeder Messung durch, so kann daraus die Entwicklung der Kanalbreiten bestimmt werden. Im folgenden soll nun die Entwicklung der einzelnen

Abschnitte verdeutlicht werden. Im Anschluss daran werden verschiedene Analysen zur Findung von Gemeinsamkeiten der Abschnitte durchgeführt.

5.2 Ewijk

In diesem Abschnitt wurde nur einmal im Untersuchungszeitraum gebaggert. Daher kann das zweite Jahr, September 1999 bis Mai 2000, nicht mit den anderen Abschnitten verglichen werden. Abbildung 29 zeigt die Strecke einen Monat vor den Baggermaßnahmen. In der Innenseite der Kurve (Abschnitt „C“) sind deutlich Untiefen zu erkennen.

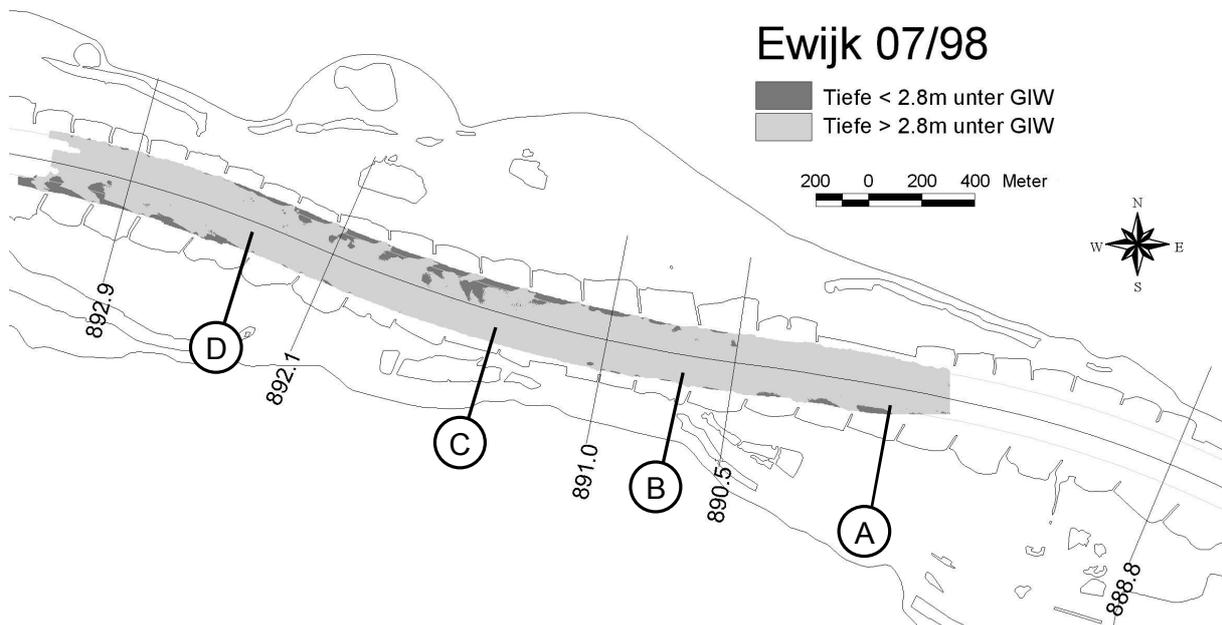


Abbildung 29 – Ewijk vor den Baggermaßnahmen 07/98

Nach dem Ausführen der Arbeiten hatte Ewijk auf der ganzen Länge die richtige Breite (siehe Abbildung 30).

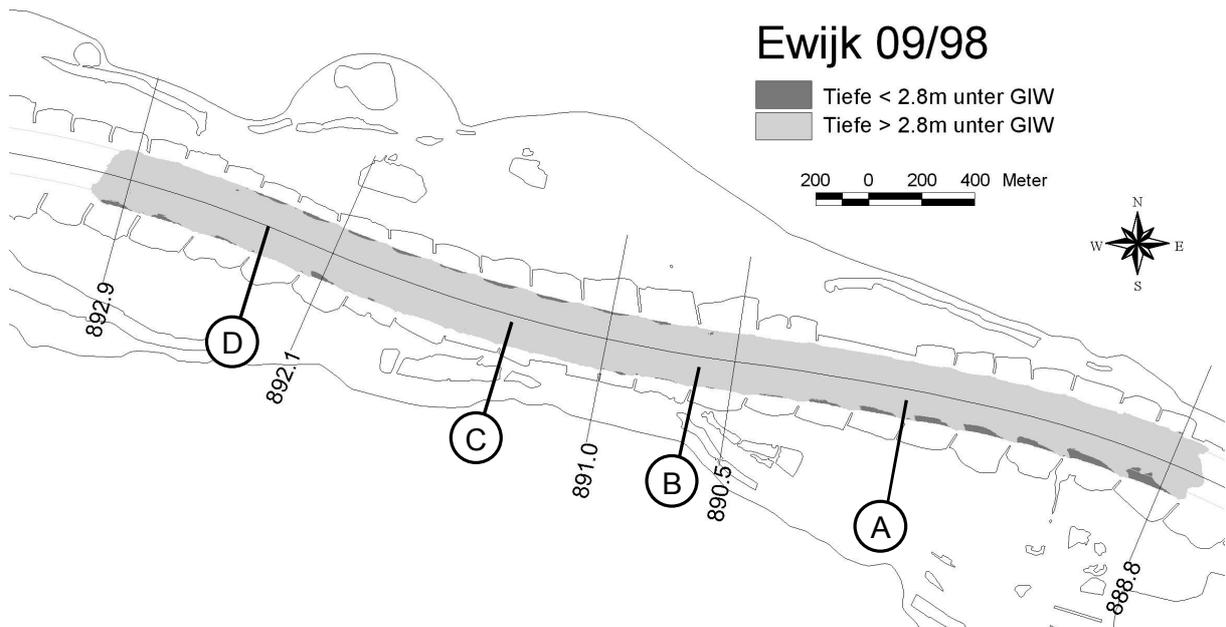


Abbildung 30 – Ewijk nach Ausführung der Baggermaßnahmen 09/98

In den Monaten nach August blieb der Abfluss gering und etwa konstant. Die Kanalbreite nahm während dieser Zeit nur geringfügig ab. In Kurven mit größeren Krümmungen (Teilstück „A“) war diese Entwicklung etwas schneller. Erst bei hohen Abflüssen bildeten sich größere Materialansammlungen in den Innenseiten der Kurven. Diese reichten bereits in die Fahrbahn hinein und schränkten so die befahrbare Breite ein (siehe Abbildung 31). Es ist jedoch dabei zu beachten, dass während dieser Zeiten Wasserstand und Abfluss möglicherweise ausreichend hoch waren, so dass keine wirkliche Verminderung der Fahrinnenbreite erfolgte.

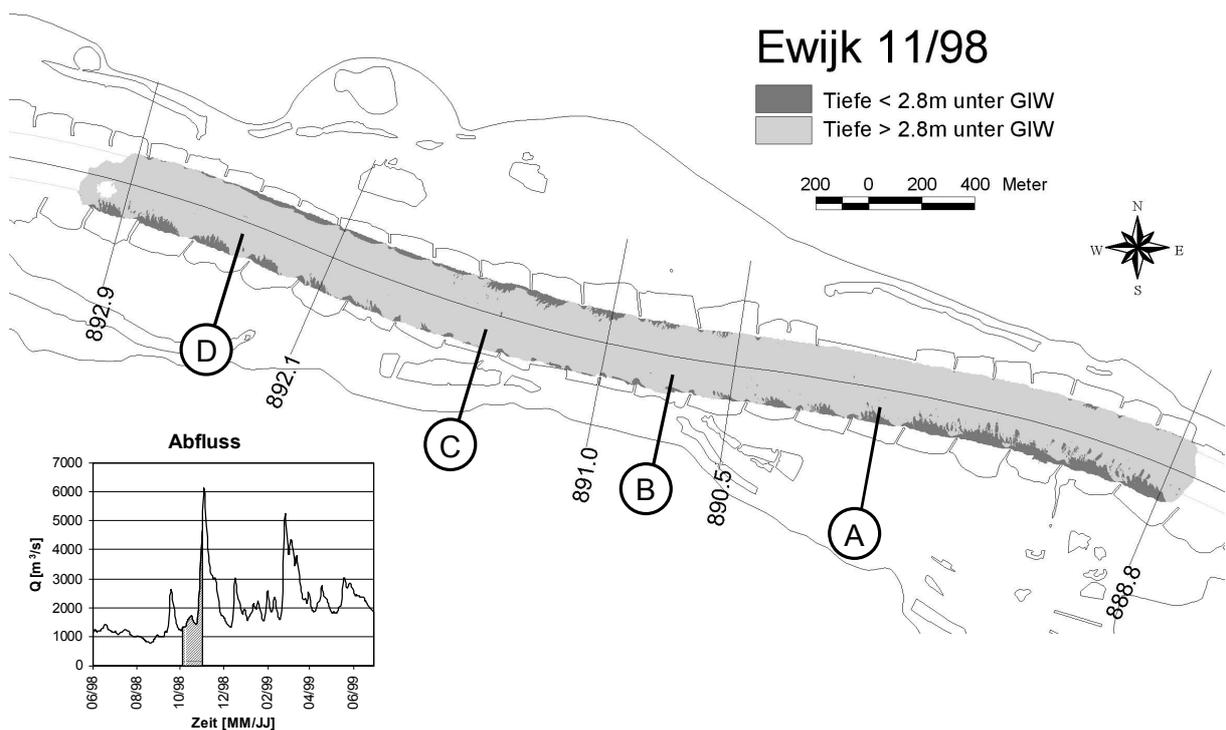


Abbildung 31 – Ewijk 11/98. Links unten ist die Abflussganglinie abgebildet. Der schraffierte Bereich markiert den Zeitraum zwischen den Monatsmessungen 10/98 und 11/98.

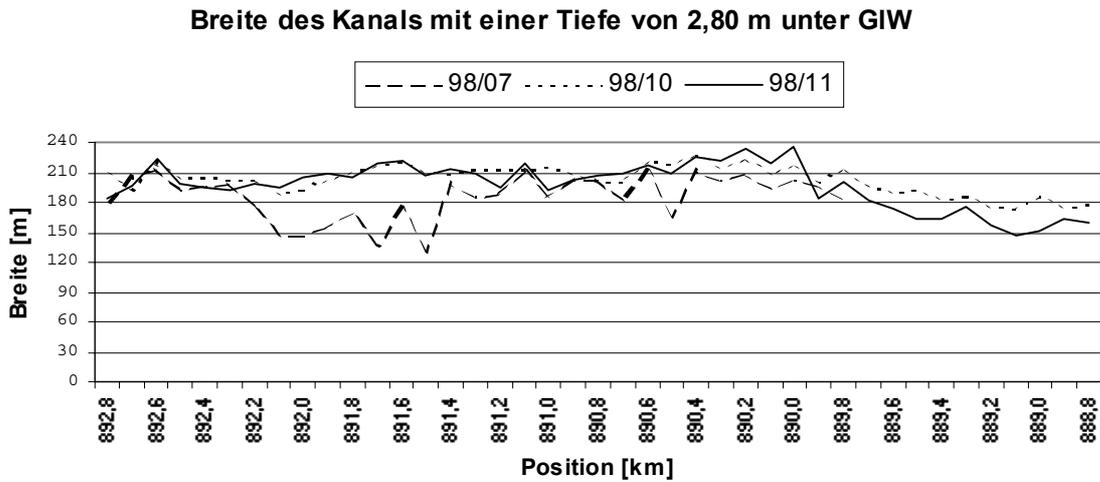


Abbildung 32 – Zeitliche Entwicklung der Breite des Kanals. Die drei Graphen zeigen die Breite vor dem Baggern (98/07), danach (98/10) und mit dem Einsetzen eines stärkeren Abflusses (98/11).

Abbildung 32 zeigt die zeitliche Entwicklung der Kanalbreite bis November 1998. In der Zeit danach ging der Abfluss wieder zurück. Die Form der Dünen änderte sich. Sie wurden langwelliger, blieben jedoch als Hindernis bestehen. Der zweite größere Abfluss im März 1998 erzeugte zahlreiche Dünen in der Mitte der Fahrbahn, besonders innerhalb und in der Nähe der Krümmungswechsel (Teil „B“ und zwischen „C“ und „D“). Die Breite wurde erneut reduziert, dieses Mal stärker als beim ersten Maximum des Abflusses.

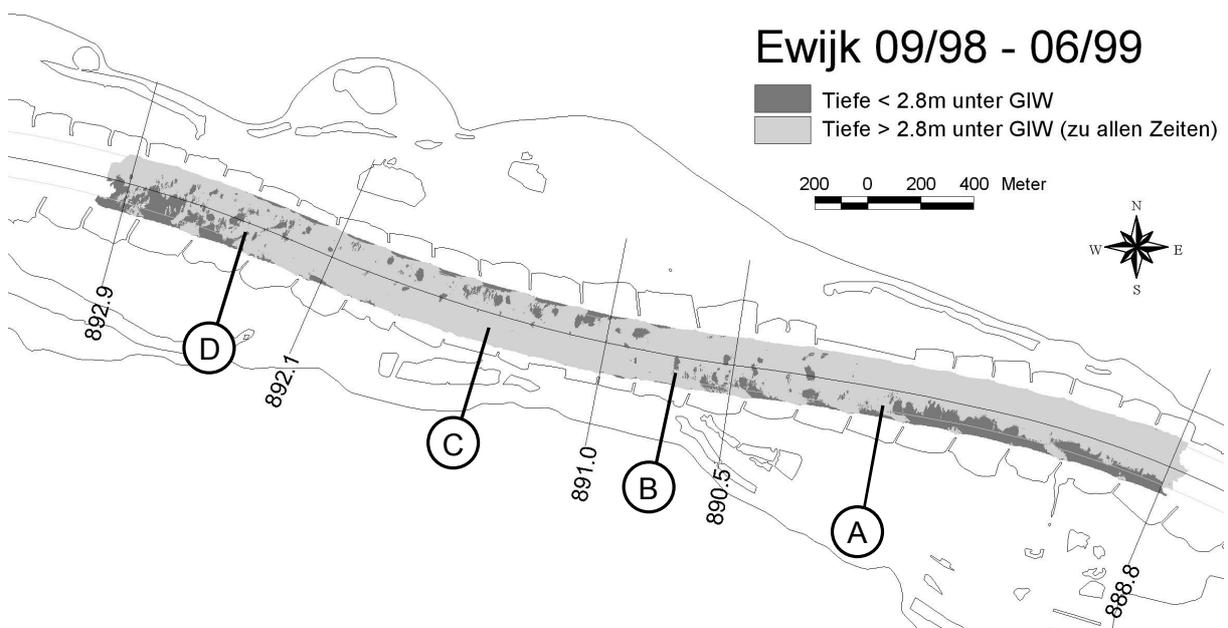


Abbildung 33 – Das Bild zeigt alle Orte, die im Zeitraum von September 1998 bis Juni 1999 mindestens einmal eine Tiefe kleiner als 2,8 m aufwiesen.

Laut Definition der morphologischen Einheiten befindet sich zwischen der Rechtskurve „C“ und der Linkskurve „D“ kein Übergang. Abbildung 33 zeigt jedoch, dass sich Material von einer Seite zur anderen bewegte, was das Vorhandensein einer Übergangsstrecke anzeigt.

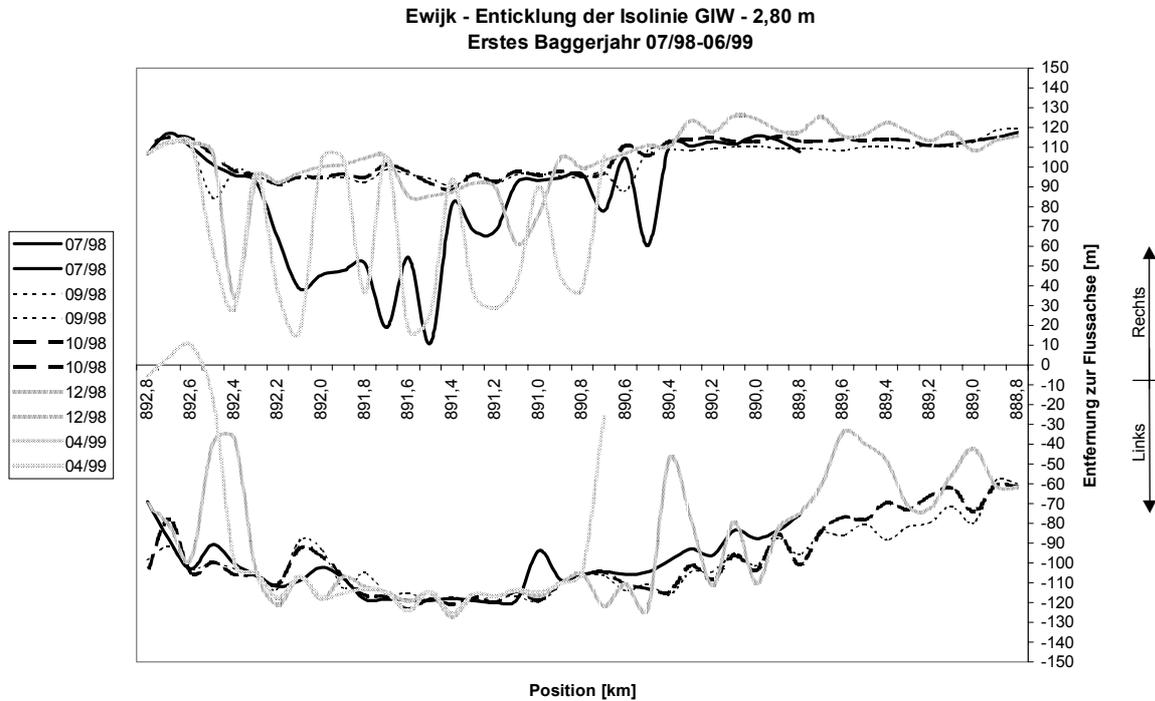
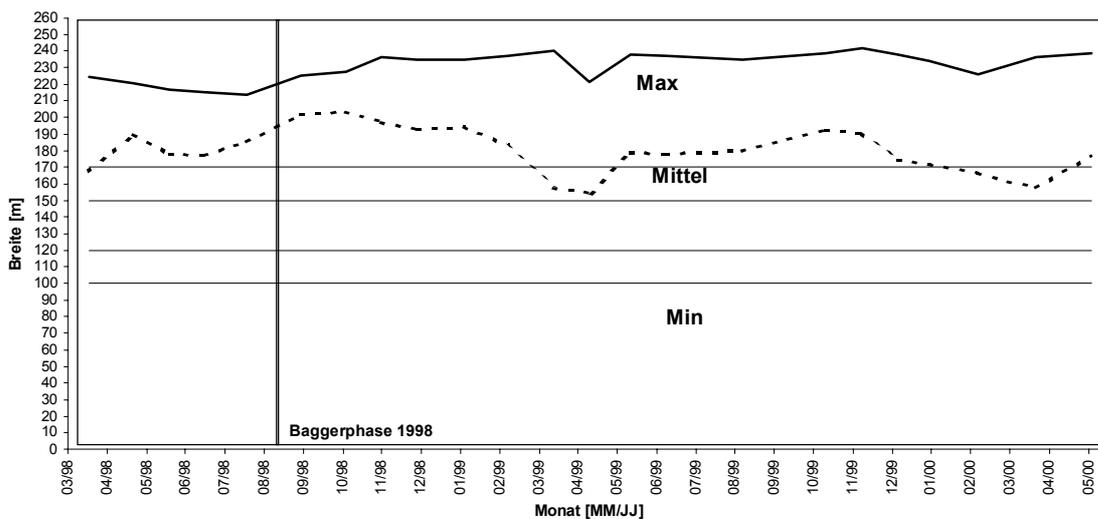


Abbildung 34 – Diese Grafik zeigt die Entwicklung der Tiefenlinie 2,8 m unter GIW. Dabei ist die Flussachse geradegebogen.

a) **Ewijk - Breite des Kanals mit einer Tiefe von 2,80 m unter GIW**



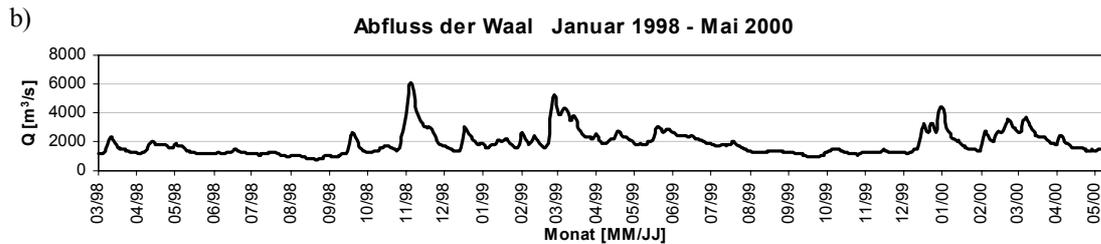


Abbildung 35 – a) Entwicklung der Kanalbreite bei Ewijk, b) Abfluss

Über einen längeren Zeitraum hinweg beobachtet, ergibt sich ein Bild wie in Abbildung 34. Hier ist deutlich zu erkennen, auf welcher Seite im Laufe des Jahres Probleme durch Versandung auftraten und in welchem Bereich die Breite schwankte. Abbildung 35 zeigt für den Abschnitt Ewijk die gemittelte, maximale und minimale Breite aller 100 m - Querschnitte im jeweiligen Monat. Nach der Baggerphase 1998 nahm die Breite wie gefordert zu, blieb dann kurze Zeit konstant, um dann bei höheren Abflüssen stark zurückzugehen. Die Kurve der Maximalwerte hat wenig bis gar keine Aussagekraft. Maximale Breiten kamen auch an Stellen vor, die bereits durch Dünen verengt waren, da die Hindernisse zum Teil weiter als 100 m voneinander entfernt waren. Die Mittelwertkurve zeigt tendenziell das gleiche Verhalten wie der Minimalwertgraph, jedoch weit gemäßigter, da durch die Mittelung einzelne Schwankungen ausgeglichen werden. Ausschlaggebend für die Kanalbreite in einem Abschnitt ist jedoch nur der Minimalwert. Dieser lag nur in etwa drei Monaten über den geforderten 170 m.

Zusammenfassung

Anhand des Abschnitts Ewijk können folgende Beobachtungen gemacht werden: Drei Monate nach den Baggermaßnahmen begann die Kanalbreite mit dem Einsetzen eines größeren Abflusses zurückzugehen. Eine Schlussfolgerung und damit schon eine erste Antwort auf die Frage nach der Ursache der Breitenabnahme ist, dass Abflussspitzen offensichtlich den Abnahmeprozess einleiten. Nach weiteren drei Monaten schien die Breite wieder ganz den natürlichen Schwankungen unterworfen zu sein. Dies ist allerdings schwer zu verifizieren, da die natürliche Entwicklung nur von März bis Juli und daher nicht lange genug beobachtet werden konnte.

5.3 Winssen

Winssen besteht aus einer Rechtskurve, die von zwei Übergängen eingefasst wird. 1998 konnte die Innenseite der Kurve deutlich als Problemstelle ausgemacht werden, während die Übergänge weitgehend frei von Hindernissen waren (siehe Abbildung 36).

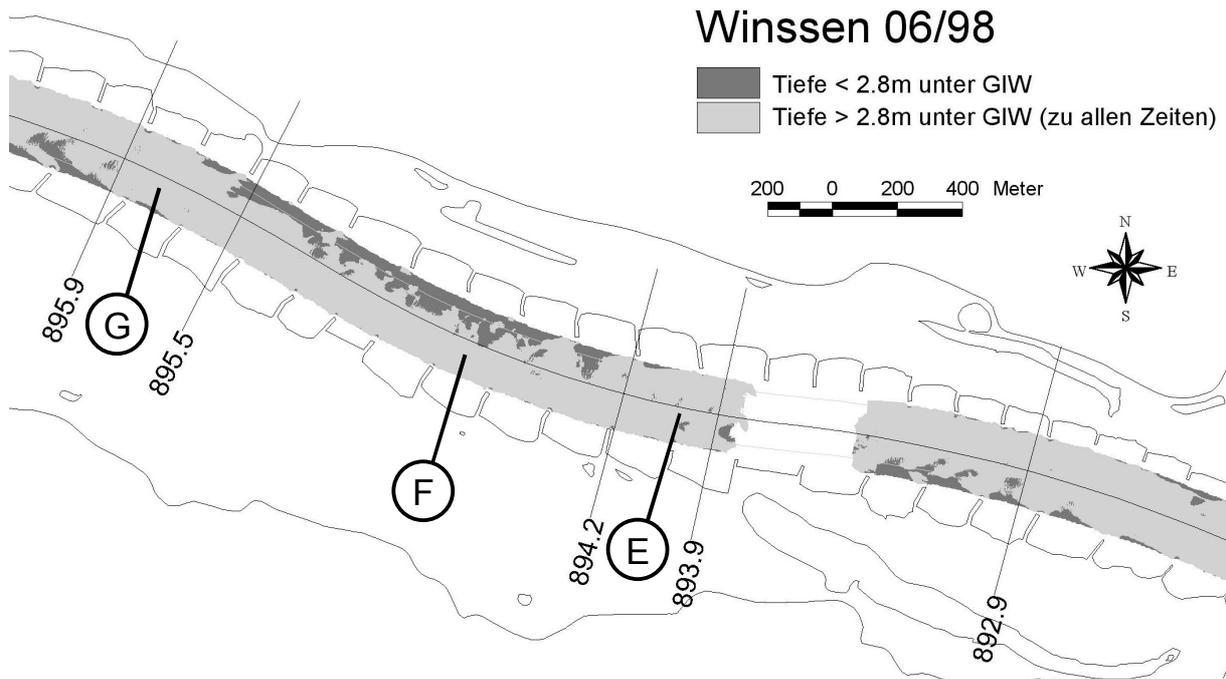


Abbildung 36 – Winssen vor den Baggermaßnahmen 06/98.

Drei Monate nach den Arbeiten, November 1998, hatte der Abfluss ein Maximum erreicht. Es bildeten sich Dünen in der oberstromigen Hälfte der Einheit „F“. Mit der Zeit wurden diese Dünen größer, und erstreckten sich über die volle Länge des Bogens. Sechs Monate nach dem Baggern im August waren dann auch die Übergänge betroffen. Hier fand jedoch, im Gegensatz zur Kurve, eine stärkere Breitenabnahme statt. Zum Teil ging die Breite hier noch weiter zurück als innerhalb des Bogens.

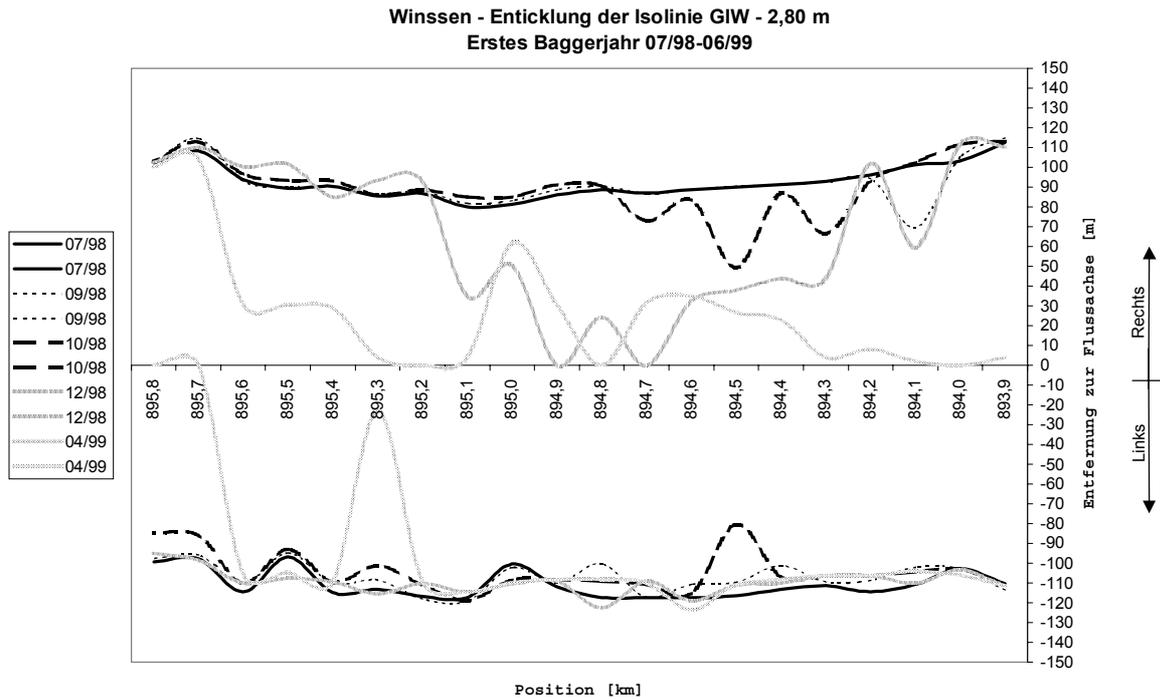
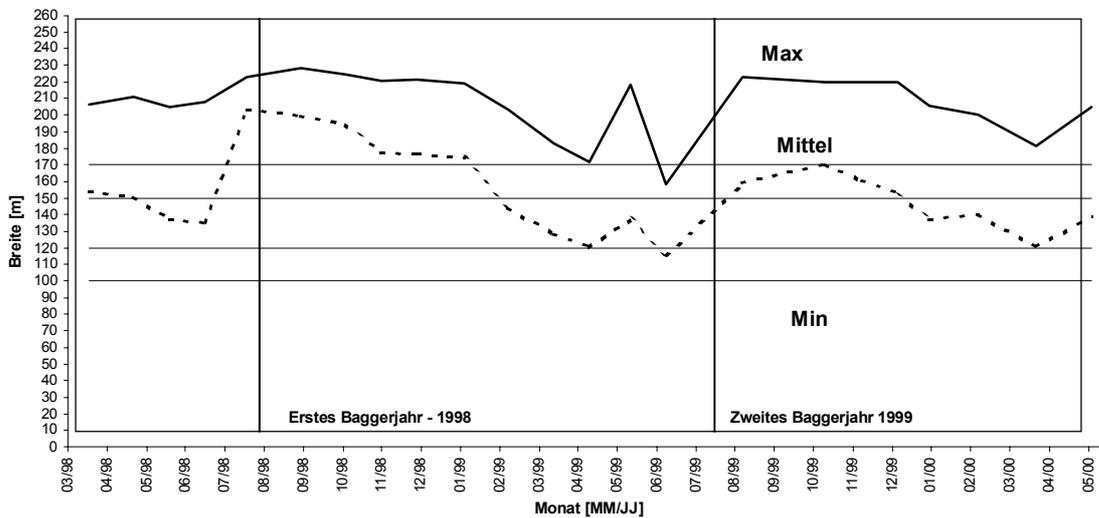


Abbildung 37 – Diese Grafik zeigt die Entwicklung der Tiefenlinie 2,8 m unter GIW. Dabei ist die Flussachse geradegebogen.

a) **Winssen - Breite des Kanals mit einer Tiefe von 2,80 m unter GIW**



b) **Abfluss der Waal Januar 1998 - Mai 2000**

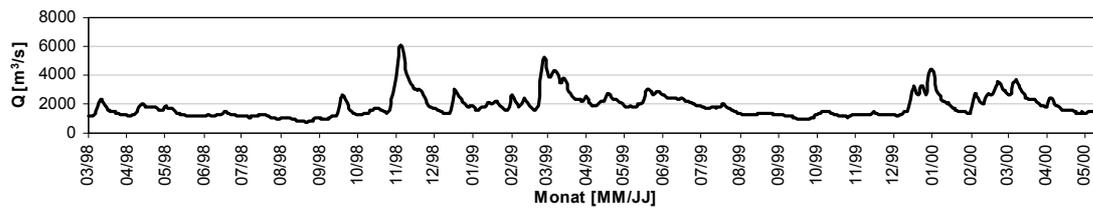


Abbildung 38 – a) Entwicklung der Kanalbreite bei Winssen, b) Abfluss

Die zweite Baggerphase, 1999, wurde in zwei Schritten durchgeführt: zuerst wurde die gesamte Breite der Fahrrinne durch „Profilbaggern“ auf eine Tiefe von 3,20 m unter GIW eingetieft. Dies geschah vor der Messung 09/99 (siehe Tabelle 5 – Vorhandene Daten und Termine für Winssen). Einen Monat später war die Breite wieder stark reduziert. Auch das nachfolgende „Instandhaltungsbaggern“ in der Innenseite des Bogens bis zu einer Tiefe von 3,0 m unter GIW hatte nur eine beschränkte Wirkung bei der Freihaltung der Kanalbreite. Wie im Jahr 1998 ging auch im zweiten Baggerjahr die Breite in der Kurve stärker als in den Übergängen zurück. Nur lief diesmal der Gesamtprozess schneller ab, da der Abfluss ebenfalls größer war.

Zusammenfassung

Die Entwicklung der Kanalbreite bei Winssen war prinzipiell ähnlich zu der von Ewijk: Mit dem ersten starken Abfluss ging die Breite ebenfalls stark zurück. Die Krümmung des Bogens ist stärker, was erklärt, wieso die Abnahme der Breite schneller vonstatten ging. Bei stärkerer Krümmung einer Flussstrecke mit fester Breite wird die Tiefe der Außenkurve größere Werte annehmen. Auf der anderen Seite wird die Neigung der Innenkurve abnehmen; es stellt sich also ein extremerer Querschnitt ein. Bei der hier durchgeführten Betrachtung spielt die Tiefe unterhalb von 2.8m keine Rolle mehr, daher tritt die Breitenreduktion durch die stärkere Materialansammlung in der Innenkurve in den Vordergrund. In diesem Abschnitt deutet sich auch an, dass die Breitenreduktion zuerst am Anfang des Bogens stattfand. Dies kann ein sehr interessanter Aspekt für die Planung von Baggermaßnahmen sein.

5.4 Dodewaard-Druten

Dieser gesamte Abschnitt besitzt die kleinste Krümmung von allen gemessenen Strecken. Wie bei Ewijk, ist auch hier laut Definition der morphologischen Einheiten Einheit „H“ eine Rechts- und Einheit „I“ eine Linkskurve ohne Übergangsstrecke dazwischen. Abbildung 40 zeigt jedoch wiederum, dass sich in der Nähe der Flussachse eine Strecke befindet, die sehr wohl als Übergang angesehen werden kann.

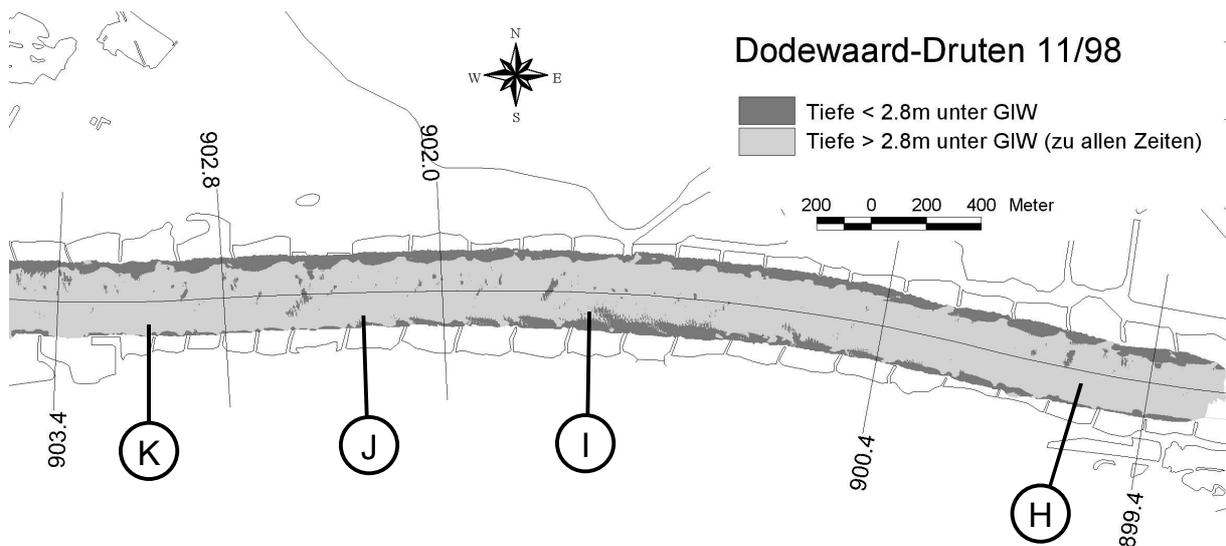


Abbildung 39 – Dodewaard-Druten 11/98. Dünen in der Mitte des Fahrhinne schränken die befahrbare Breite stark ein.

Nach dem Baggern 1998 blieb der Kanal für etwa zwei Monate frei. Dann bildeten sich kleine Dünen in den Kurvenübergängen (Einheit „J“) und in der Mitte der Fahrhinne des zweiten Bogens (Einheit „I“). Die Stelle, an der der Fluss sich von links nach rechts windet (zwischen „H“ und „I“) ist tiefer als der Übergang und wurde daher auch später mit Material gefüllt (Abbildung 39).

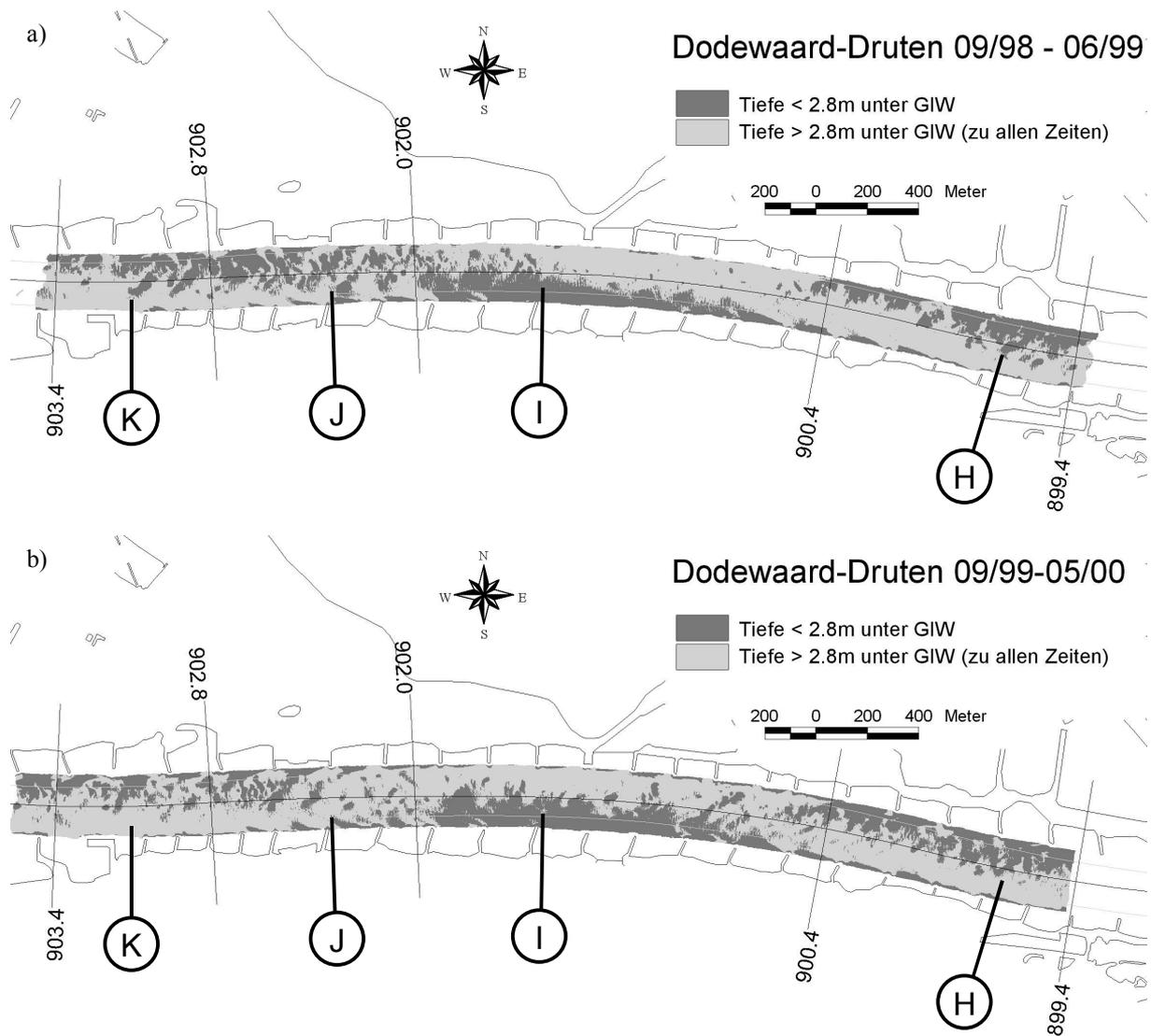
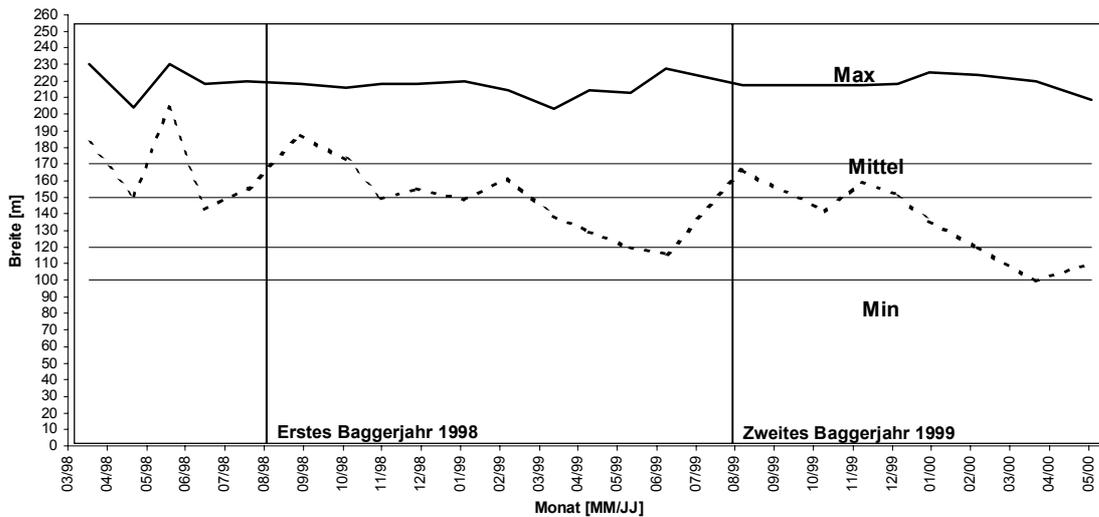


Abbildung 40 – Dodewaard-Druten während der beiden Zeiträume nach den Baggerarbeiten. Auffällig ist, dass der Übergang zwischen „H“ und „I“ im Bild a) wesentlich ungestörter ist als bei b).

Die Baggermaßnahmen 1999 verbesserten die Kanalbreite deutlich. Während dieser Zeit war der Abfluss relativ gering. Im Dezember des gleichen Jahres hatte die Abflussganglinie ein Maximum, und die Übergänge wiesen sofort Dünen auf, deren Höhe über 2,8 m unter GIW anwuchs. Ein wesentlicher Unterschied zu 1998 war, dass hier der Übergang zwischen „I“ und „H“ auch starke Materialsedimentation aufwies (Abbildung 40).

a) **Dodewaard-Druten - Breite des Kanals mit einer Tiefe von 2,80 m unter GIW**



b) **Abfluss der Waal Januar 1998 - Mai 2000**

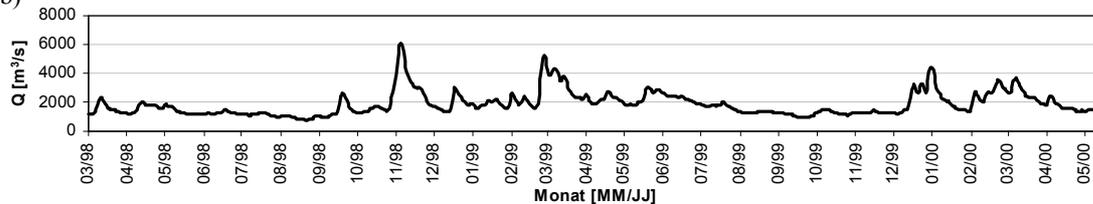


Abbildung 41 – a) Entwicklung der Kanalbreite bei Dodewaard-Druten, b) Abfluss

Zusammenfassung

Dodewaard-Druten ist anfällig für eine schnelle Reduktion der Breite (Abbildung 41). Dies liegt besonders in der Art und Weise begründet, wie die Kanalbreite in Kurvenübergängen definiert wurde (Abschnitt 5.1). Hindernisse, die in der Mitte der Fahrrinne auftreten, vermindern die Breite erheblich. In diesem Abschnitt herrschen wegen der geringen Krümmung der Bögen langgestreckte Kurvenübergänge vor. Auffällig ist die starke Sedimentation und damit die Breitenverminderung bei „H“, nachdem dort 1999 Baggerarbeiten durchgeführt wurden.

5.5 Beneden-Leeuwen

Die vorhandenen Daten von Beneden-Leeuwen beinhalten einen 300 m großen Übergang oberhalb eines Bogens mit fast konstantem Radius. Diese zweite Teileinheit stellt etwa die Hälfte der entsprechenden morphologischen Einheit dar.

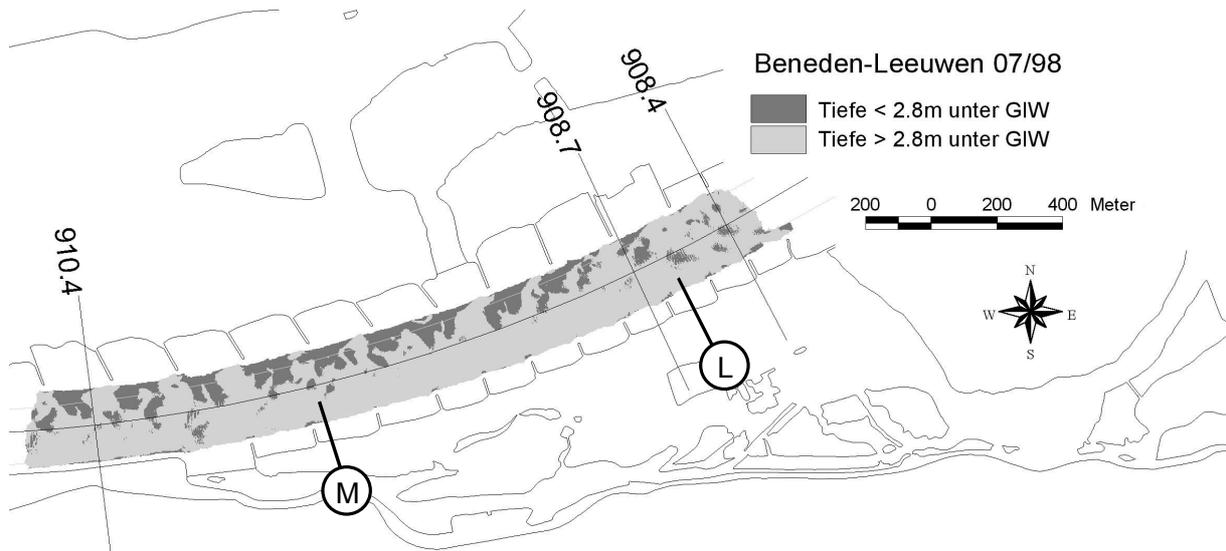


Abbildung 42 – Beneden-Leeuwen 07/98 vor den Baggermaßnahmen

Bei den Baggerarbeiten 1998 wurde das Niveau der Innenkurve um nur 20 cm herabgesetzt. Das war zwar für die Breite ausreichend, jedoch nur von kurzer Dauerhaftigkeit. Das erklärt die schnelle „Erholung“ der Kanalbreite: nach drei Monaten war diese wieder beim Ausgangswert. Zu diesem Zeitpunkt hatte auch der Abfluss ein Maximum. Von da an sammelte sich noch mehr Material im Innenbogen an. Die Dünen wurden stärker ausgeprägt, aber die Kanalbreite nahm nicht weiter ab. Der kleine Teil des Übergangs (Abschnitt „L“, Abbildung 42) zeigte keinen Unterschied zum Bogen selbst; es ist das Ende der 1,3 km langen morphologischen Einheit.

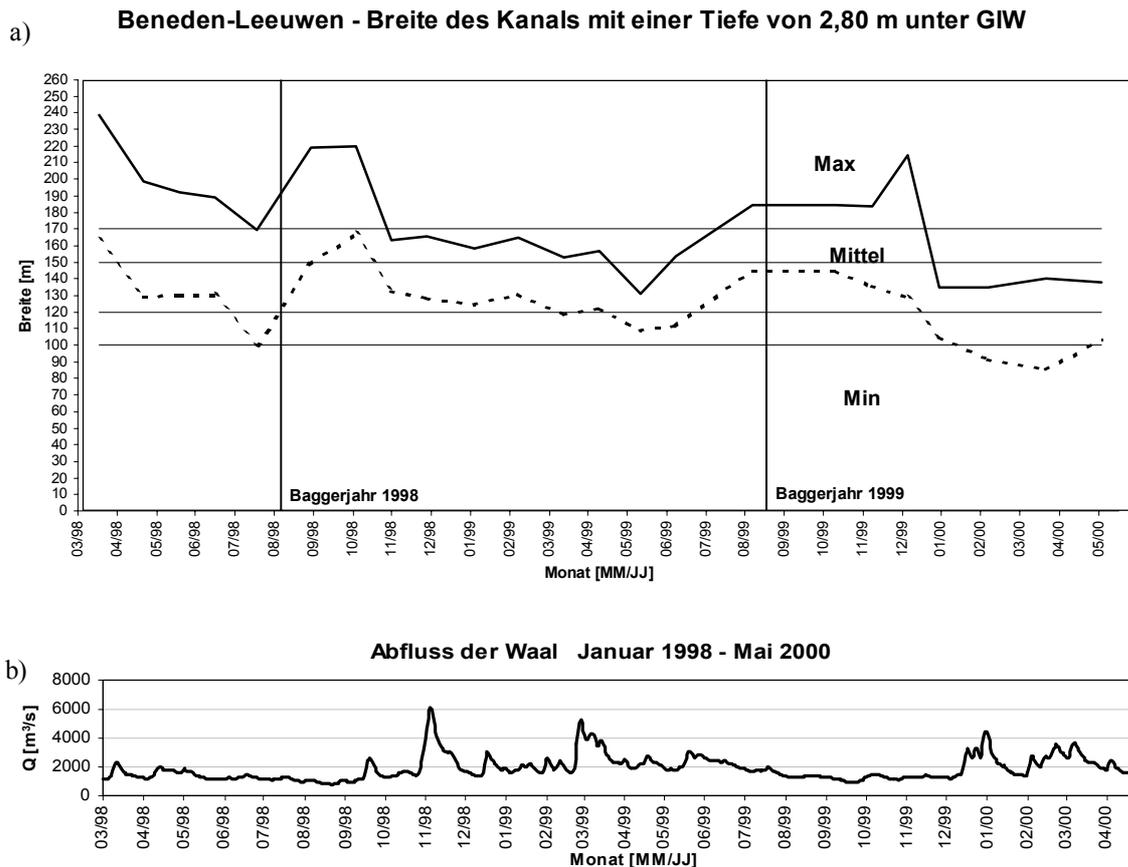


Abbildung 43 – a) Entwicklung der Kanalbreite bei Beneden-Leeuwen, b) Abfluss

Im zweiten Baggerjahr, 1999, verlief die Entwicklung der Fahrrinnenbreite ähnlich wie 1998. Die Untiefen entstanden ungefähr an den gleichen Stellen. Nach dem Baggern und dem Auftreten des ersten größeren Abflusses ging die Breite erneut zurück. Dieses Mal trat das Abflussmaximum, welches den Prozess einleitete, fünf Monate nach den Arbeiten auf (Abbildung 43).

Zusammenfassung

Beneden-Leeuwen kann ebenfalls als Hinweis darauf aufgefasst werden, dass der Abfluss die entscheidende Rolle bei der Entstehung von Dünen spielt und damit die Ursache für die Breitenreduktion darstellt. Der Übergang – als eine Zone, in der sich Dünen von einer Seite der Kurve auf die andere bewegen – scheint weiter im Oberstrom zu liegen.

5.6 Analyse der Breitenentwicklung

Nachdem die Daten über den Rückgang der Breiten eines Kanals mit der Tiefe von 2,8 m unter GIW für jeden der vier Teile der Waal verfügbar sind, ergibt sich die Frage, ob Gemeinsamkeiten zwischen ihnen bestehen. Dazu wurde die Breitenentwicklung verglichen in

- den morphologischen Einheiten,
- den Kurven, unterteilt in drei Teile: Anfang – Mitte – Ende,
- den Kurven, unterteilt in Abschnitte mit gleicher Länge von 600 m.

Die verschiedenen Unterteilungen wurden gewählt, weil die Wiederauffüllung eines gebaggerten Kanals sowohl seitlich, entlang der gesamten Länge geschieht, als auch durch neu zutransportiertes Sediment. Dieser zweite Vorgang hängt nicht von der Länge der Kurve ab. Es ist daher zu erwarten, dass die unterschiedliche Datenauswertung andere Ergebnisse liefert.

5.6.1 Morphologische Einheiten

Bei diesem Vergleich wurden die verschiedenen morphologischen Einheiten berücksichtigt, die in Abbildung 25 definiert sind. Die verschiedenen Strecken wurden nach der Größe ihrer Krümmung sortiert und in Klassen eingeteilt (siehe Tabelle 10).

Definition der Kurven und Übergänge; sortiert nach Krümmung

Nr.	Morphologische Einheit Nr.	Name	Typ	Sedimentationszone	Definition		Vorhandene Daten		Länge [m]	Radius [m]	Krümmung [1/m]	Gruppe
					Von [km]	Bis [km]	Von [km]	Bis [km]				
B	18	Beuningen	Übergang	überall	890,5	891,0	890,5	890,9	500	-	-	I
E	21	Brug A50	Übergang	überall	893,8	894,2	893,9	894,1	300	-	-	I
G	23	Andelst	Übergang	überall	895,5	896,0	895,5	895,8	400	-	-	I
J	28	De Tempel	Übergang	überall	902,0	902,8	902,0	902,7	800	-	-	I
L	31	Ijzendoorn	Übergang	überall	907,4	908,7	908,4	908,6	300	-	-	I
H	26	Deest	Rechtskurve	rechts	898,3	900,4	899,4	900,3	1000	9430	1,1E-04	II
I	27	Hooge waard	Linkskurve	links	900,4	902,0	900,4	901,9	1600	8552	1,2E-04	II
M	32	Beneden-Leeuwen	Rechtskurve	rechts	908,7	911,8	908,7	910,3	1700	6572	1,5E-04	II
K	29	Druten	Rechtskurve	rechts	902,8	904,8	902,8	903,3	600	6314	1,6E-04	II
A	17	Slijk-Ewijk	Rechtskurve	links	887,5	890,5	888,8	890,4	1600	5830	1,7E-04	II
C	19	Loenen	Rechtskurve	rechts	891,0	892,1	891,0	892,0	1100	5726	1,7E-04	II
D	20	Ewijk	Linkskurve	links	892,1	893,8	892,1	892,8	800	4673	2,1E-04	III
F	22	Winssen	Rechtskurve	rechts	894,2	895,5	894,2	895,4	1300	3976	2,5E-04	III

* Einteilung in Querschnitte von 100m Länge

Tabelle 10 – Nach der Krümmung sortierte morphologische Einheiten

Die nachfolgenden Bilder (Abbildung 44 bis Abbildung 46) zeigen die zeitliche Entwicklung der mittleren Kanalbreiten unterschiedlicher Einheiten.

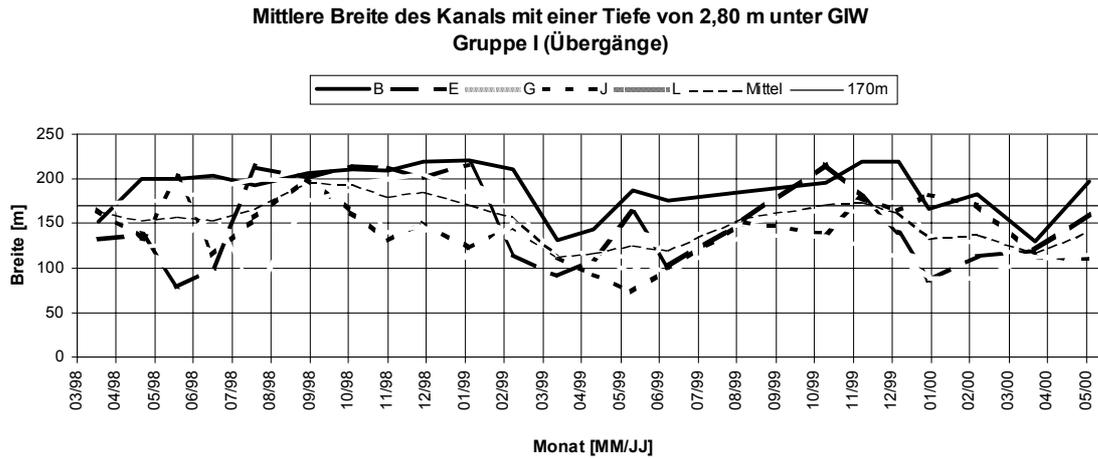


Abbildung 44 – Vergleich Breitenentwicklung Übergänge (Gruppe I)

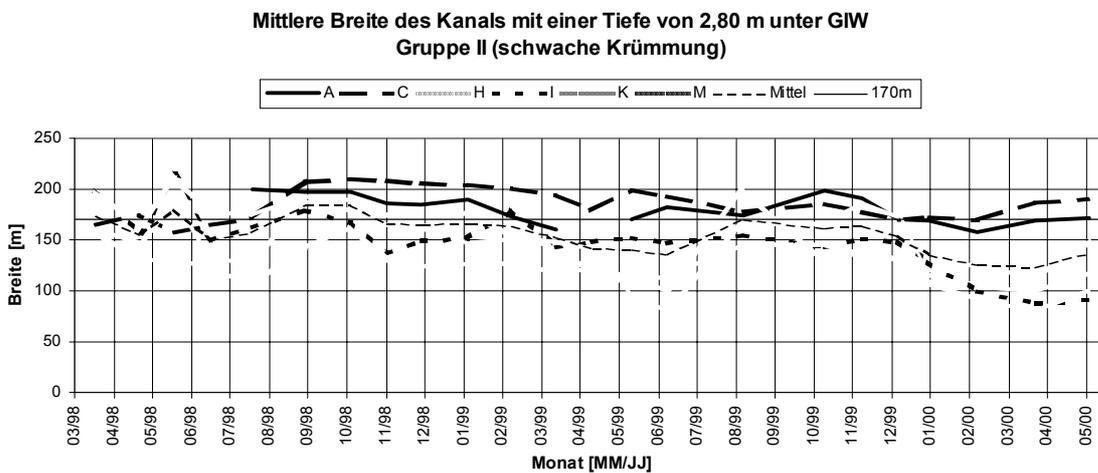


Abbildung 45 – Vergleich Breitenentwicklung Einheiten mit schwacher Krümmung (Gruppe II)

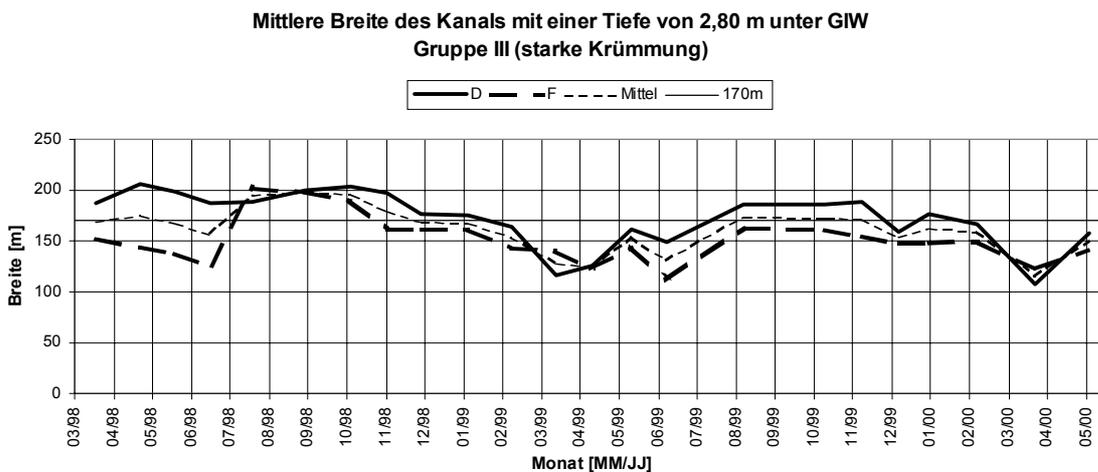


Abbildung 46 – Vergleich Breitenentwicklung Einheiten mit starker Krümmung (Gruppe III)

Die Bilder zeigen, dass ein Vergleich der einzelnen Abschnitte schwierig ist. Besonders die Übergänge (Gruppe I) variieren sehr stark. Es ist kein Zusammenhang zwischen einzelnen Abschnitten zu erkennen. Einheiten mit schwacher Krümmung (Gruppe II) weisen jeweils im August 1998 und 1999 eine Ähnlichkeit auf: Hier steigt bei den meisten Einheiten die Breite an und fällt danach ab, wobei die Variation in der Abnahme nicht so ausgeprägt ist. Starke Krümmungen sind nur in zwei Fällen vorhanden, so dass eine Aussage im Vergleich zu den anderen Gruppen keine solide Datengrundlage hat. Die Graphen beider Kurven scheinen jedoch gleichmäßiger zu verlaufen. Abbildung 47 zeigt alle drei Gruppen im Vergleich. Durch Bänder verschiedener Helligkeit wird die Standardabweichung gekennzeichnet.

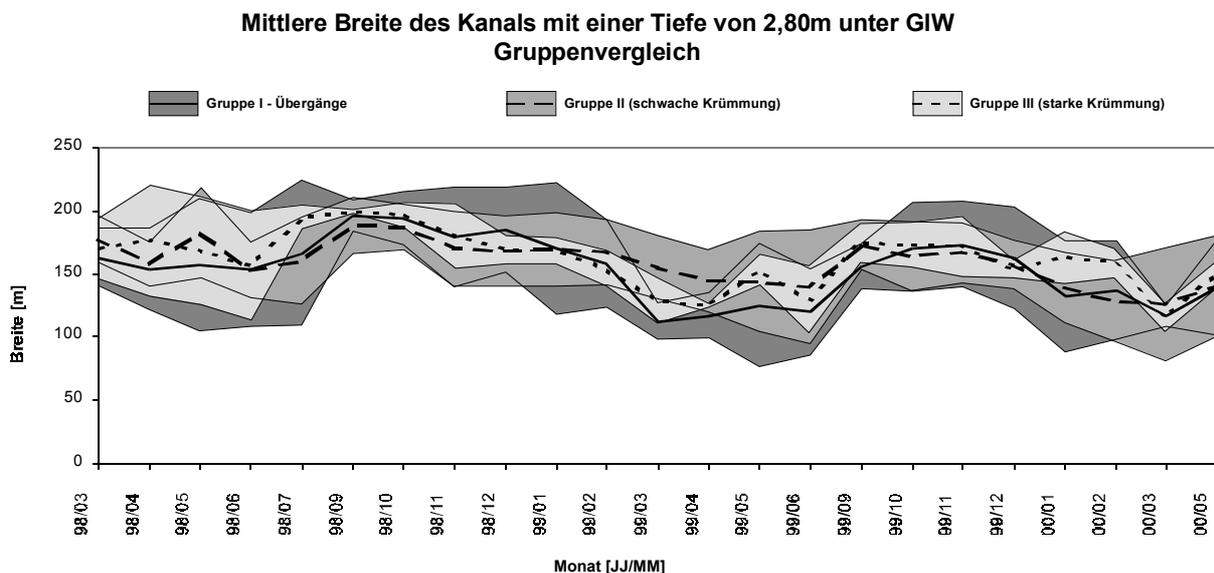


Abbildung 47 – Vergleich der Mittelwerte der Gruppen I, II und III und Standardabweichung

5.6.2 Unterteilung in Anfang – Mitte – Ende

Die Unterteilung der Bögen findet wiederum auf der Grundlage der morphologischen Einheiten statt. Da jedoch nicht alle Kurven in ihrer vollen Länge mit Daten erfasst worden sind, stehen viele Teile nicht für die Analyse zur Verfügung.

Unterteilung der Kurven

Nr.	Definition		Länge [m]	Radius [m]	Krümmung [1/m]	Anfang		Mitte		Ende		Vorhandene Daten		Abschnittsname
	Von [km]	Bis [km]				Von [km]	Bis [km]	Von [km]	Bis [km]	Von [km]	Bis [km]	Von [km]	Bis [km]	
A	887,5	890,5	3000	5830	1,7E-04	887,5	888,4	888,5	889,4	889,5	890,4	888,8	890,4	Ewijk
C	891,0	892,1	1100	5726	1,7E-04	891,0	891,3	891,4	891,6	891,7	892,0	891,0	892,0	
D	892,1	893,8	1700	4673	2,1E-04	892,1	892,6	892,7	893,1	893,2	893,7	892,1	892,8	
F	894,2	895,5	1300	3976	2,5E-04	894,2	894,5	894,6	895,0	895,1	895,4	894,2	895,4	Winssen
H	898,3	900,4	2100	9430	1,1E-04	898,3	898,9	899,0	899,6	899,7	900,3	899,4	900,3	Dodewaard-Druten
I	900,4	902,0	1600	8552	1,2E-04	900,4	900,8	900,9	901,4	901,5	901,9	900,4	901,9	
K	902,8	904,8	2000	6314	1,6E-04	902,8	903,4	903,5	904,0	904,1	904,7	902,8	903,3	Beneden-Leeuwen
M	908,7	911,8	3100	6572	1,5E-04	908,7	909,6	909,7	910,7	910,8	911,7	908,7	910,3	

Legende:

- vorhanden
- teilweise vorhanden
- nicht vorhanden

* Einteilung in Querschnitte von 100m Länge

Tabelle 11 – Unterteilung der Kurven. Die Tabelle zeigt, welche Teile der Kurven als Daten vorhanden sind.

Wie im letzten Abschnitt bereits gezeigt wurde, gestaltet sich ein Vergleich der Abschnitte als äußerst schwierig. Auch bei einer Unterteilung in drei Teile ist keine Tendenz zu erkennen. Als Beispiel dient hier Abbildung 48. Ebenso zeigen Vergleiche der Anfänge und Enden der Kurven geringe Übereinstimmungen.

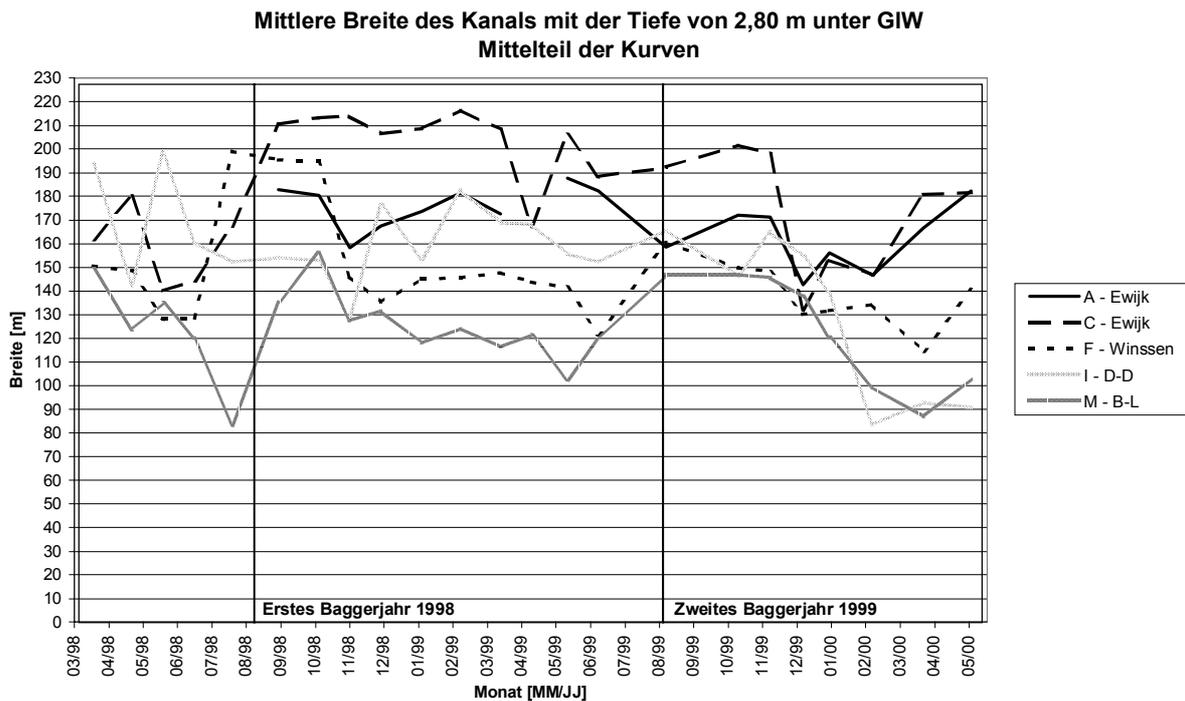


Abbildung 48 – Vergleich Breitenentwicklung der Mittelteile dreigeteilter Kurven

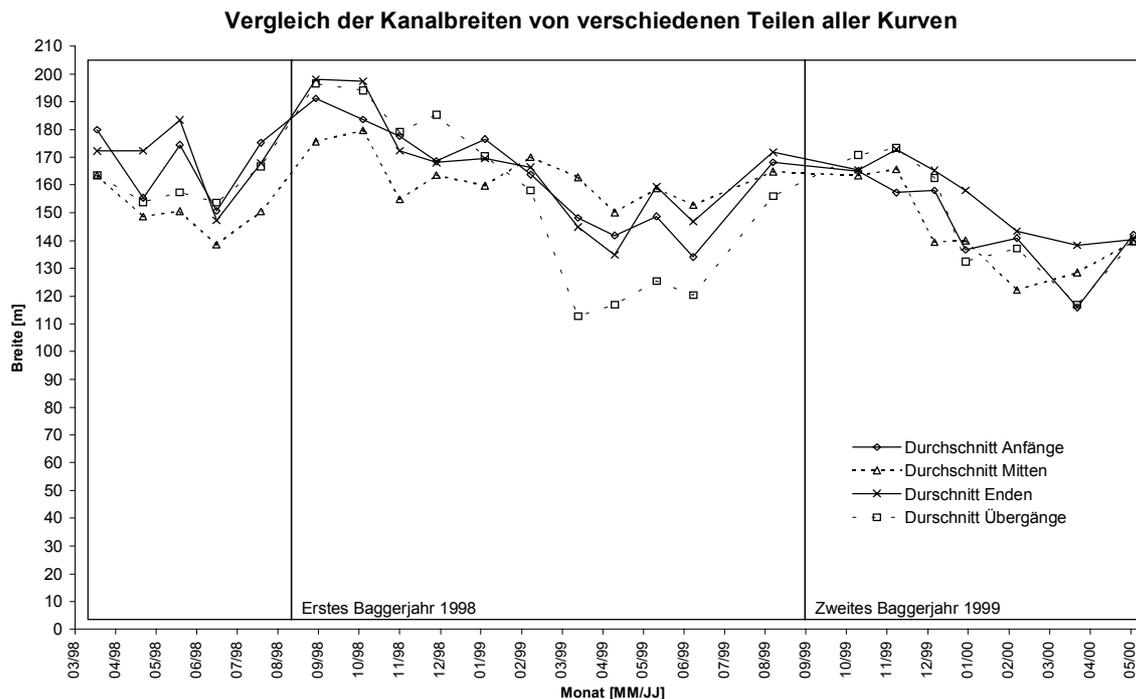


Abbildung 49 – Vergleich der Kanalbreitenentwicklung aller Teile der Kurven. Zusätzlich sind die Übergänge miteinbezogen worden.

5.6.3 Unterteilung in feste Längen von 600 m

Eine feste Länge von 600 m wurde zum Vergleich gewählt, weil die kleinen Kurven dann ebenfalls in die Untersuchung miteinbezogen werden können. Da keiner der größeren Bögen vollständig gemessen wurden, entspricht dies einer Unterteilung der Kurven in zwei Teile. Tabelle 12 gibt genauere Auskunft über die vorhandenen Daten.

Unterteilung der Kurven; feste Längen 600m

Nr.	Definition		Länge [m]	Radius [m]	Krümmung [1/m]	0 - 600m		600 - 1200m		Vorhandene Daten		Abschnittsname
	Von [km]	Bis [km]				Von [km]	Bis [km]	Von [km]	Bis [km]	Von [km]	Bis [km]	
A	887,5	890,5	3000	5830	1,7E-04	887,5	888,0	888,1	888,6	888,8	890,4	Ewijk
C	891,0	892,1	1100	5726	1,7E-04	891,0	891,5	891,6	892,1	891,0	892,0	
D	892,1	893,8	1700	4673	2,1E-04	892,1	892,6	892,7	893,2	892,1	892,8	
F	894,2	895,5	1300	3976	2,5E-04	894,2	894,7	894,8	895,3	894,2	895,4	Winssen
H	898,3	900,4	2100	9430	1,1E-04	898,3	898,8	898,9	899,4	899,4	900,3	Dodewaard-Druten
I	900,4	902,0	1600	8552	1,2E-04	900,4	900,9	901,0	901,5	900,4	901,9	
K	902,8	904,8	2000	6314	1,6E-04	902,8	903,3	903,4	903,9	902,8	903,3	
M	908,7	911,8	3100	6572	1,5E-04	908,7	909,2	909,3	909,8	908,7	910,3	Beneden-Leeuwen

Legende: vorhanden
 nicht vorhanden

* Einteilung in Querschnitte von 100m Länge

Tabelle 12 – Unterteilung der Flusskurven in feste Längen von 600 m. Die Tabelle zeigt, welche Daten vorhanden sind.

Die starke Variation, die die beiden vorhergehenden Analysen ergaben, ist auch hier auffällig. Ein Gesamtvergleich der Kurventeile zeigt Abbildung 50. Während im ersten Teil der Kurve (0 bis 600 m) die Breite sehr schnell verringert wird, folgen der zweite Teil und die Übergänge erst später.

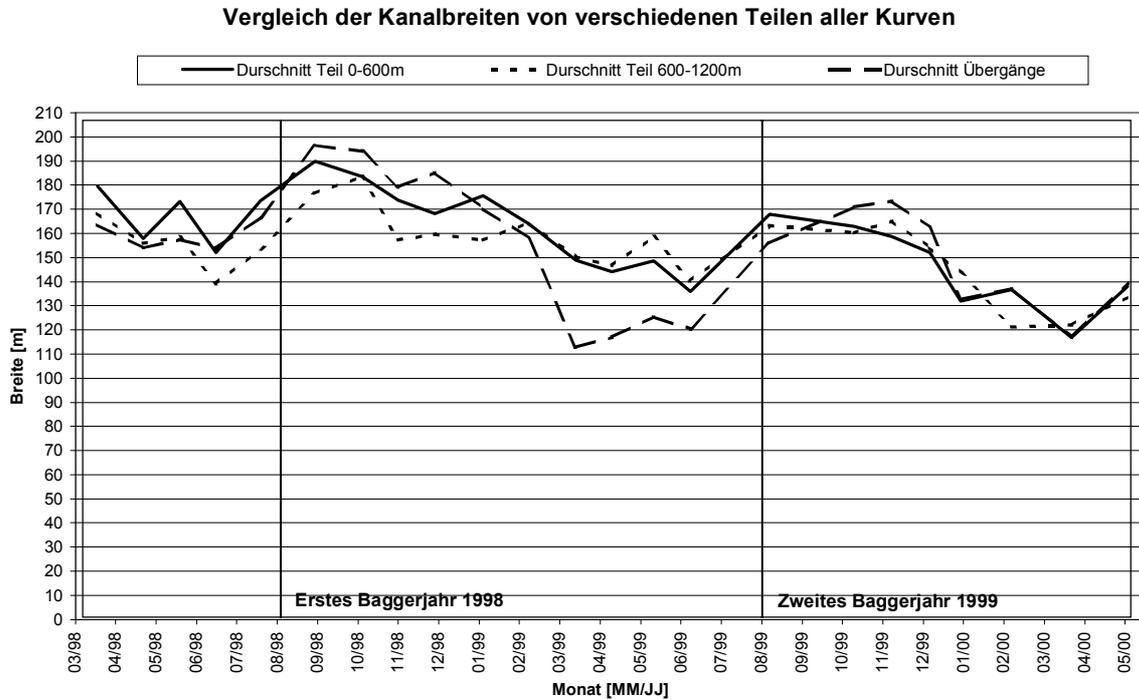


Abbildung 50 – Vergleich von Kanalbreiten bei der Unterteilung in feste Längen von 600 m. Zusätzlich sind wieder die Übergänge miteinbezogen.

Zu sehen ist dies auch in Abbildung 51. Bei Winsen setzt der Rückgang der Breite zuerst im Oberstrom ein und erfasst erst später den unteren Teil der Kurve. 1999 ist diese Entwicklung nicht so deutlich zu erkennen. Interpretiert als Evaluation bedeutet das Bild, dass die angewendete Baggerstrategie 1999 nicht in dem Maße erfolgreich war, wie im vorangegangenen Jahr. Da das allgemeine Systemverhalten aufgrund der Abflusssituationen und der Flussmorphologie sehr zufallsabhängig ist, ist dieser letzte Punkt nur als Hypothese zu bewerten.

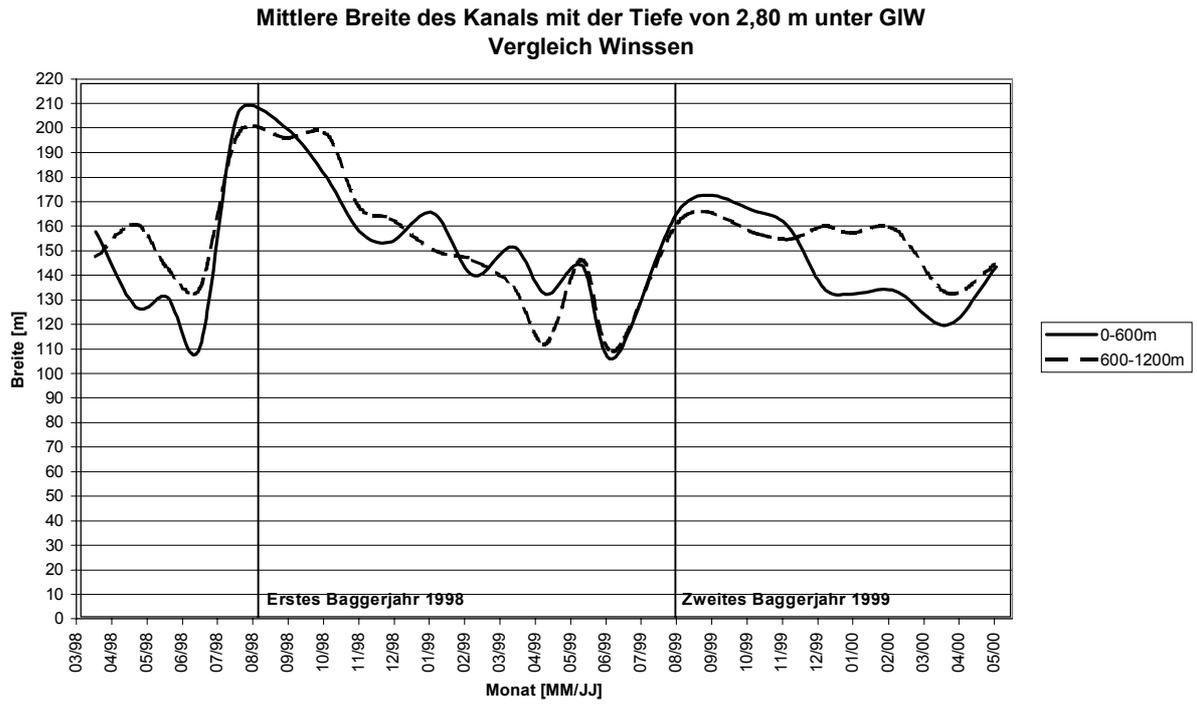


Abbildung 51 – Verlauf der mittleren Kanalbreite der ersten und zweiten Hälfte des Bogens von Winssen.

5.7 Änderung der Breite

Betrachtet man die monatliche Änderung der Breite in Relation zum Abfluss (Abbildung 52), dann fällt wieder eine große Streuung auf. So zeigen die Daten bei niedrigen Abflüssen um $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ bei unterschiedlichen Abschnitten sowohl eine Erhöhung als auch eine Verminderung der Breite. Erst bei der Verwendung von Ausgleichslinien lässt sich ein Trend erkennen: mittlere Abflüsse größer als $1700 \text{ m}^3/\text{s}$ sorgen für einen Rückgang der Breite, darunter kann es sogar wieder zu einer Aufweitung kommen. Für die beiden unteren Abschnitte Beneden-Leeuwen und Dodewaard-Druten scheint der kritische Wert bei $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ zu liegen.

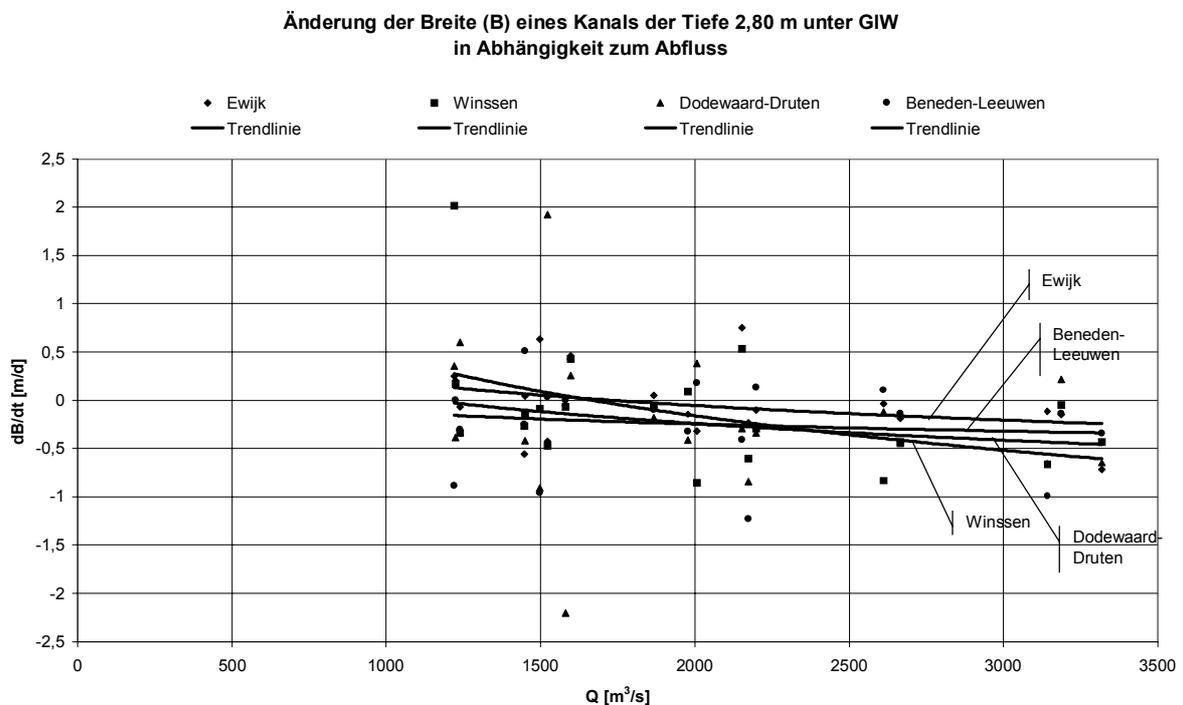


Abbildung 52 – Änderung der Breite in Abhängigkeit zum Abfluss

5.8 Schlussfolgerungen

Aus der Analyse und vor allem aber aus den Bildern des geographischen Informationssystems (GIS), die die Kanalbreiten visualisieren, können eine ganze Reihe von Schlussfolgerungen gezogen werden. Diese müssen jedoch unter vielen Vorbehalten, die vor allem die Datenmenge betreffen, gesehen werden. Zu beachten sind die folgenden Punkte:

- Obwohl die Menge der zur Verfügung stehenden Daten, für sich genommen, sehr umfangreich ist, sind „nur“ zwei Zeiträume nach den Baggermaßnahmen erfasst und daher auch nur zwei Abflusssituationen. Da der Abfluss eine bedeutende Rolle spielt, ist es dringend geboten, eine genauere Kenntnis über diesen Einfluss zu gewinnen.
- Die Abschnitte erfassen selten volle morphologische Einheiten, was für die Analyse hilfreich gewesen wäre.
- Die Abschnitte sind sehr unterschiedlich in Länge und Krümmung, was die Vergleichbarkeit der Daten und die Ergebnisse der Analyse erschwert.
- Die natürlichen Schwankungen lassen gesicherte Aussagen kaum zu. Nur sehr lange Datenreihen können helfen, die dem System innewohnende Streuung zu erkennen.
- Die Baggermaßnahmen wurden in unterschiedlichen Arten ausgeführt. Dies betrifft zum einen die gebaggerten Tiefen aber auch die Arten der Maßnahmen („Profil“ und „Instandhaltung“). Daher unterscheiden sich z.B. die Jahre 1998 und 1999 in einem Maß, welches die Vergleichbarkeit der beiden in Frage stellt.
- Andere Einflüsse, wie Instandhaltungsbaggern, welche nicht durch die Daten erfasst wurden, werden nicht berücksichtigt, ebenso die veränderten Fließmuster bei einer Hochwassersituation.
- Die Untersuchung basiert auf den morphologischen Einheiten und ist daher abhängig von deren Definition. Die Bilder, die alle Untiefen innerhalb eines Baggerjahres zeigen (z.B. Abbildung 33, Seite 38), deuten jedoch darauf hin, dass einige der morphologischen Einheiten angepasst werden sollten. Als diese definiert wurden, standen keine Daten dieser Qualität zur Verfügung.

Dieses vorangestellt, ergeben sich somit als Schlussfolgerungen:

- a) Abflüsse größer als 1000 bis 1700 m³/s scheinen den Reduktionsprozess der Kanalbreite einzuleiten und zu intensivieren.
- b) Abflüsse unterhalb von 1000 bis 1700 m³/s verzögern die Breitenreduktion oder bewirken einen Stillstand der Reduktion.
- c) Die Verringerung der befahrbaren Breite beginnt wahrscheinlich am Anfang der Flusskurven, obwohl dies nicht eindeutig belegbar ist.
- d) Abschnitte mit schwachen Krümmungen und daher großen Übergängen sind am anfälligsten gegen schnelle Kanalverengung. Material, das sich in der Mitte der Fahrrinne ansammelt, schränkt die Breite aufgrund der in Abschnitt 5.1 beschriebenen Definition der Fahrrinne erheblich ein.
- e) Die Beobachtungen der Breitenentwicklung der verschiedenen Kurven kann kaum bis gar nicht miteinander verglichen werden.

Aus diesen Schlussfolgerungen können einige Empfehlungen für zukünftige Untersuchungen abgeleitet werden:

- Die Definition der morphologischen Einheiten sollte geprüft werden. Es steht jedoch nicht zu erwarten, dass dadurch alleine die Variationen bei den Vergleichen der Breitenentwicklung verringert oder gar beseitigt werden kann. Dennoch ist eine Entwicklung hin zu einer präziseren Definition empfehlenswert.
- In neuen Messungen sollten die gewählten Abschnitte entsprechend dieser Definitionen gemessen werden. Zu einer verbesserten Datenerfassung würden auch Informationen über kleinskalige Baggermaßnahmen beitragen. Eventuell könnten so verschiedene Phänomene besser interpretiert werden.
- Wie oben bereits angesprochen, werden die kommenden Messungen zur Überprüfung und Verfeinerung der hier getroffenen Aussagen beitragen. Darüber hinaus wäre es wünschenswert, auch über die ungestörte Entwicklung der Flussmorphologie mehr in Erfahrung zu bringen. Die Daten von März bis Juli 1998 sind hierfür nicht ausreichend.

- Nicht nur die Breite, sondern auch das Volumen sollte in Betracht gezogen werden. Die Änderung der Breite ist eine Folge der Umverteilung des Volumens durch die Baggermaßnahmen und die natürliche Entwicklung.
- Da der Abfluss die entscheidende Komponente darstellt, wäre es von Interesse, die Änderung der Breite bzw. des Volumens in Relation zum Abfluss pro morphologische Einheit zu betrachten.

6 Analyse der Wirkungsweise des wiedereingebrachten Materials

6.1 Einleitung

Der Waal wird durch die Baggermaßnahmen nicht dauerhaft Material entzogen. Alles Entnommene muss wieder im Gewässer abgeladen werden. Weil das Hauptaugenmerk bei der Ausführung der Arbeiten auf der Herstellung der nötigen Breite und Tiefe liegt, ist die Information darüber, wo das Material wieder abgeladen wird, zweitrangig. Natürlich dürfen beim Abladen keine Grenzwerte der Tiefe überschritten werden. Dennoch ist der Unternehmer in seiner Wahl des Abladeortes kaum beschränkt.

Die Information über diese Orte liegt für 1998 in Form einer Liste vor. Darin ist verzeichnet, auf welcher Seite (links oder rechts) und an welcher Position (Flusskilometer) der Sand zurückgespeichert wurde. Mit Hilfe der täglichen Messungen kann festgestellt werden, an welchen Orten Volumenänderungen stattgefunden haben, und nach welcher Zeit sich wieder die ursprüngliche Tiefe einstellt. Da die Messungen jedoch nur Momentbilder der Flusssohle sind, kann auch nur der Nettomaterialtransport beobachtet werden.

Im Jahr 1999 wurden keine Aufzeichnungen der Abladeorte betrieben. Generell wird der Unternehmer durch Messungen vor und nach der Ausführung der Arbeiten überwacht. Diese Messungen liegen vor, nicht jedoch die täglichen Messungen, wodurch eine „Wegverfolgung“ (Tracking) des Materials unmöglich wird. Außerdem erstreckten sich die Vorher/Nachher Messungen über mehrere Tage, so dass zum Teil sogar der gleiche Materialhaufen an zwei verschiedenen Stellen zu sehen ist. Daher wurde für 1999 keine weitere Auswertung vorgenommen.

Drei Abschnitte, in denen Sand wiedereingebracht wurde, sind durch Messungen erfasst:

- Slijk-Ewijk (Teil von Ewijk; km 889 bis km 891; siehe Abbildung 19, Seite 25)
- Winssen
- Beneden-Leeuwen

In jedem dieser Abschnitte werden die tiefen Zonen, die Erosionsstellen unterhalb der Bühnenköpfe und deren Entwicklung betrachtet. Da diese Stellen ihre Position nicht ändern, wurde ihre Fläche und das Volumen betrachtet. Seit 1999 darf nur bis zu einer Tiefe von -3,20 m unter GIW Material abgeladen werden. Daher betreffen die Berechnungen nur das Material unterhalb dieser Tiefe.

6.2 Slijk-Ewijk

Für die praktische Durchführung der Analyse wurden alle als geeignet zu betrachtenden Stellen markiert (Nr. 1 bis 12 in Abbildung 53). Zonen 1, 2, 11 und 12 liegen außerhalb des Bereiches, in dem Material abgeladen wurde und dienen als Vergleichswerte. Leider gibt es zu Slijk-Ewijk keine Messungen vor den Bagger- und Rückführungsmaßnahmen, so dass hier kein Vergleich angestellt oder gar die im Logbuch verzeichneten Volumene überprüf werden können. Nur von den Zone 7 bis 12 existiert eine Messung, allerdings fand diese nach der ersten Baggerwoche statt, nachdem bereits fast alles Material eingebracht worden war.

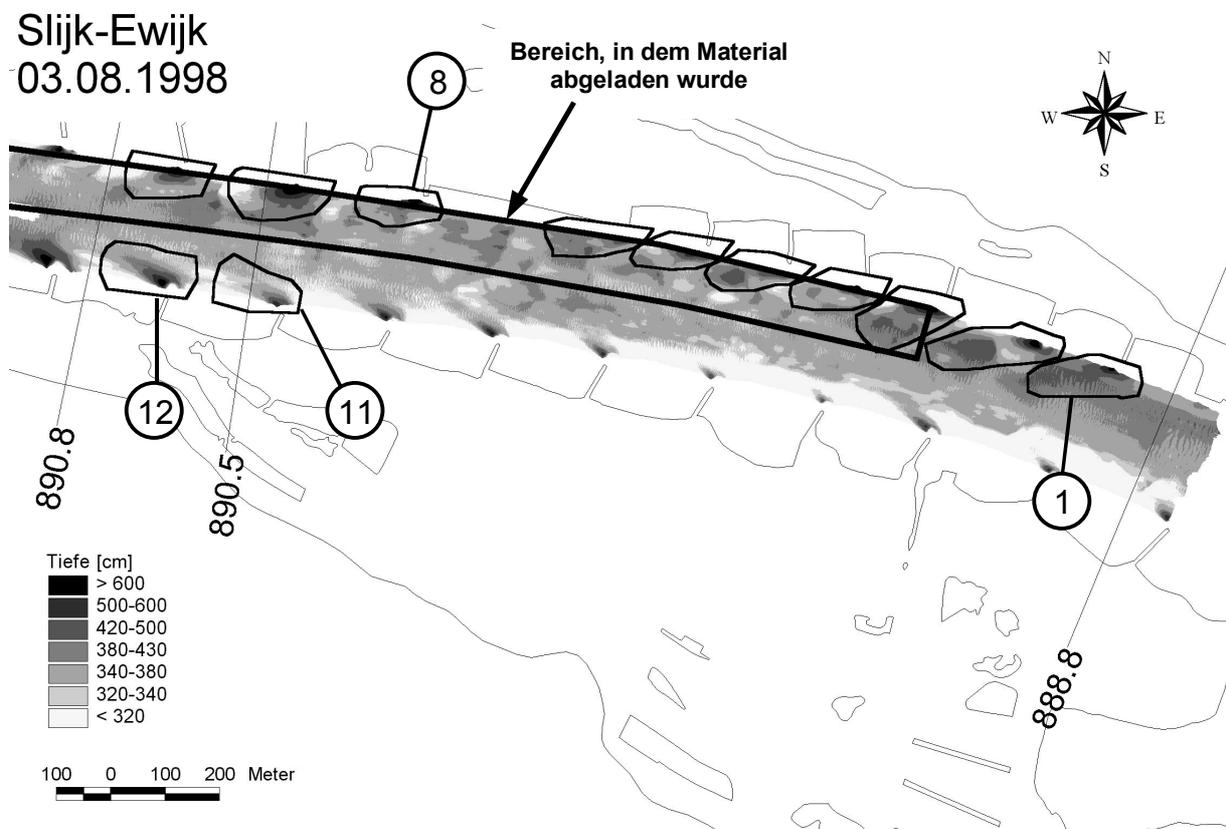


Abbildung 53 – Betrachtete Erosionszonen bei Slijk-Ewijk. Zusätzlich ist der Bereich markiert, in dem Material wieder zurückgespeichert wurde.

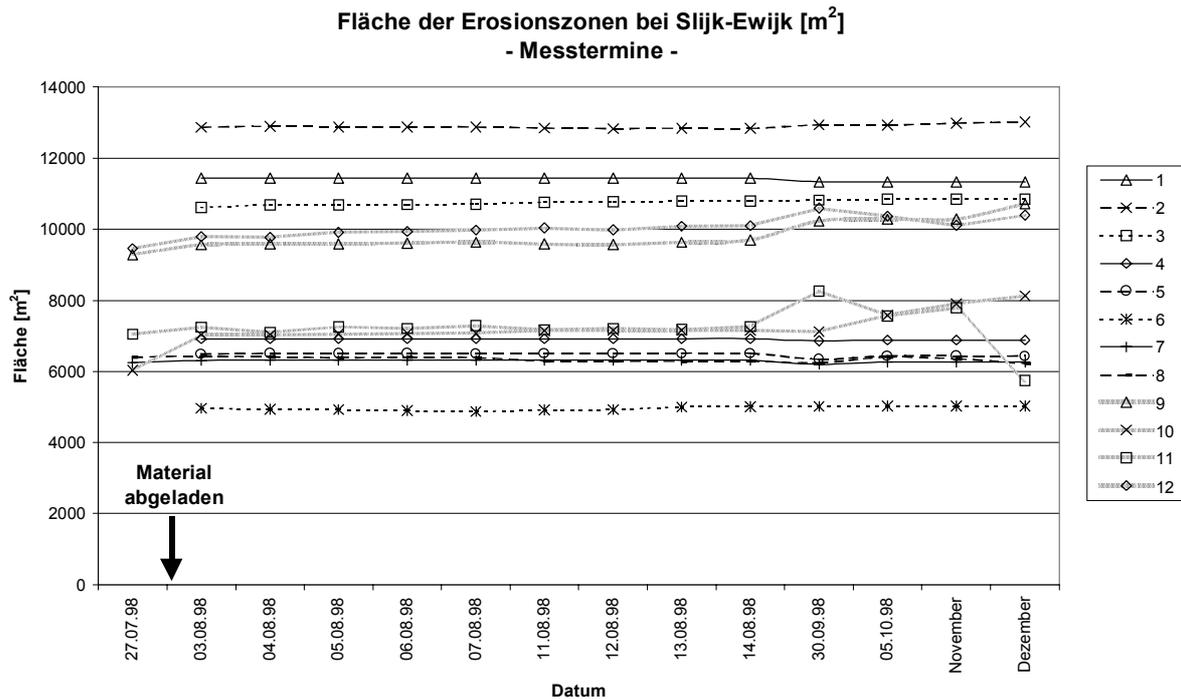


Abbildung 54 – Entwicklung der Flächenausdehnung der Erosionszonen bei Slijk-Ewijk

Die Flächen der Erosionszonen blieben über die täglichen Messungen hinweg relativ konstant. Nur zu Zeiten eines stärkeren Abflusses war eine Flächenänderung zu beobachten (Abbildung 54). Ebenso erfuhr die Volumenänderung nur sehr geringe Unterschiede. Im Vergleich zu vorher war keine Veränderung zu erkennen (Abbildung 55).

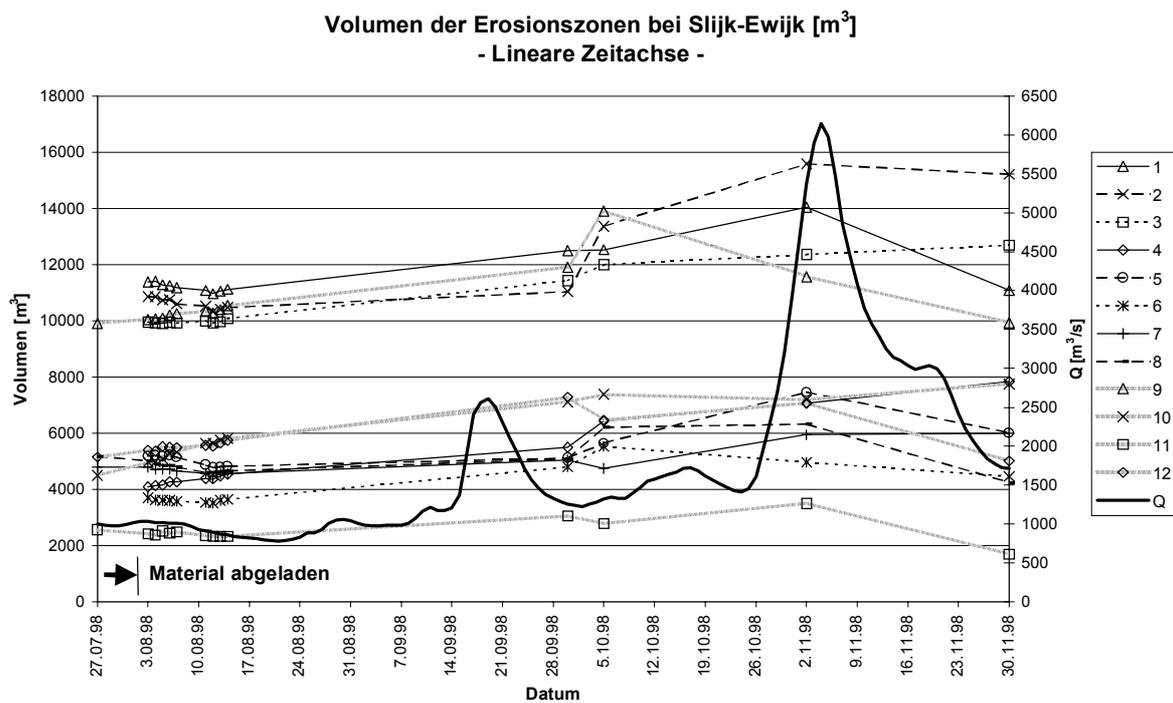


Abbildung 55 – Volumen der Erosionszonen nach Materialzugabe bei Slijk-Ewijk

6.3 Winssen

Wie bei Slijk-Ewijk gibt es für Winssen keine Messungen von der Zeit unmittelbar vor dem Eingriff. Dementsprechend schwierig gestaltet sich auch die Deutung der Ergebnisse. Für die Untersuchung wurden wiederum elf Zonen definiert (Abbildung 56).

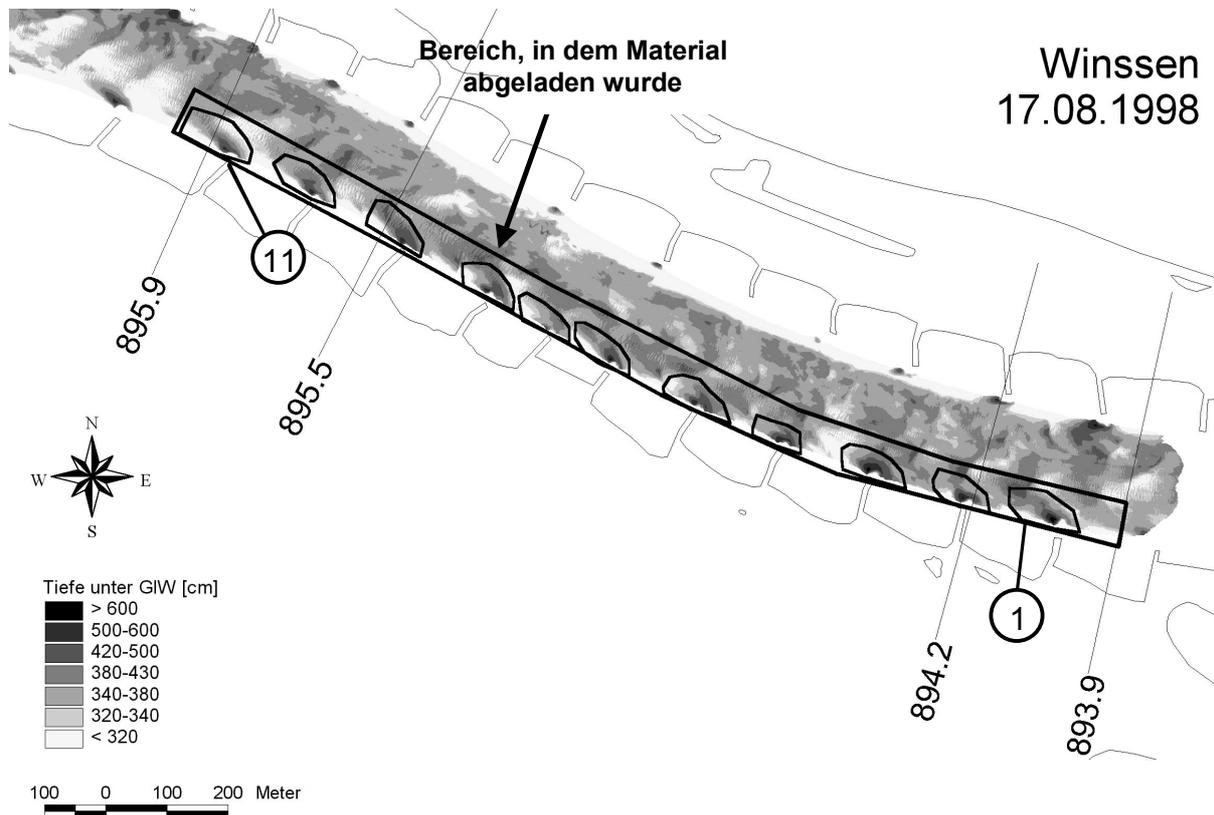


Abbildung 56 – Betrachtete Erosionszonen bei Winssen. Zusätzlich ist der Bereich markiert, in dem Material wieder zurückgespeichert wurde.

Abbildung 57 zeigt die Ausdehnung der Fläche der betrachteten Erosionszonen. Diese sind stärkeren Schwankungen unterworfen als bei Ewijk. Dennoch scheint auch hier keine Reaktion auf die eingebrachten Volumina zu bestehen. Zone 11 zeigt von November auf Dezember ein starkes Abfallen der Fläche. Diese Zone liegt, wie Abbildung 56 belegt, in einem Übergang, in dem gerade in diesem Zeitpunkt ein hoher Abfluss und dadurch eine erhöhte morphologische Aktivität für eine große Materialansammlung in dem betrachteten Gebiet gesorgt hat. Diese hob das Niveau größtenteils über – 3,2 m unter GIW an, so dass die Größe der Fläche sprunghaft verringert wurde.

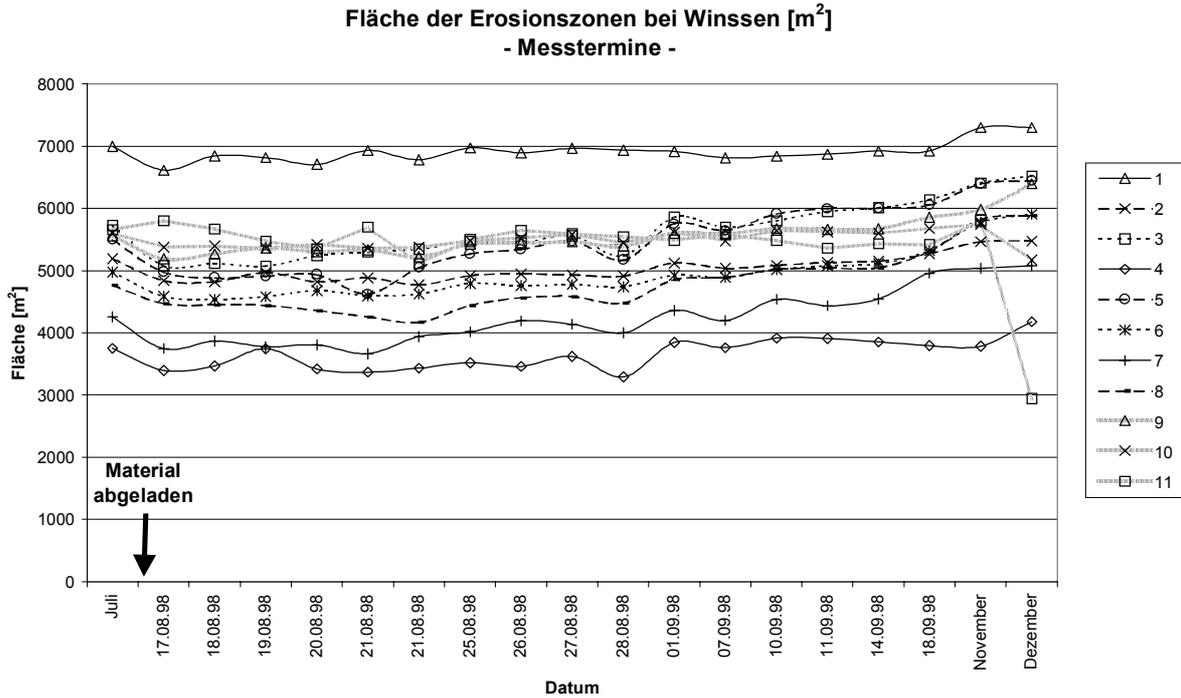


Abbildung 57 – Entwicklung der Flächenausdehnung der Erosionszonen bei Winsen

Wie die Fläche weist auch die Ganglinie des Volumens stärkere Schwankungen innerhalb der täglichen Messungen auf. Generell war jedoch ein Trend zu einer Zunahme des Volumens festzustellen. Diese Entwicklung ging auch mit dem ansteigenden Abfluss konform. Nach dem 18.9.1998, am Ende der täglichen Messungen, konnte eine weitere Volumenzunahme der Erosionszonen in der Außenkurve festgestellt werden (Nr. 3 bis Nr. 8). Die Zonen im Übergang (Nr. 9 bis Nr. 11) wurden jedoch durch Sedimentation gefüllt.

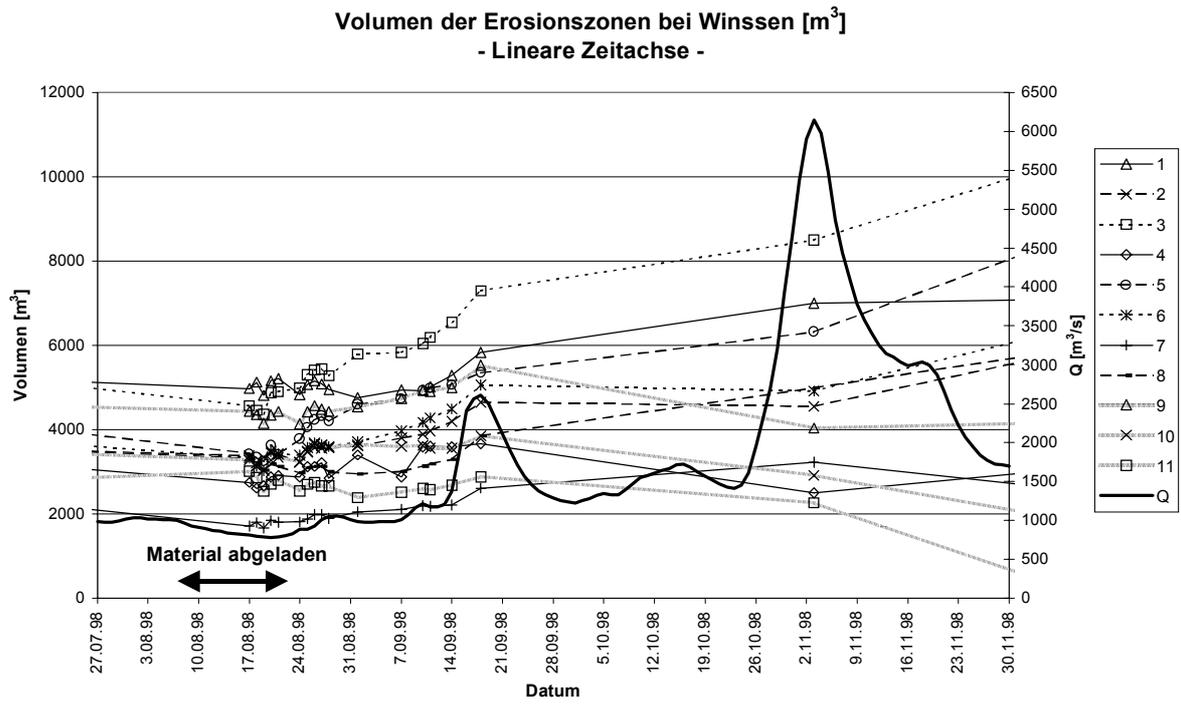


Abbildung 58 – Volumen der Erosionszonen nach Materialzugabe bei Winssen

6.4 Beneden-Leeuwen

Der letzte hier untersuchte Abschnitt, Beneden-Leeuwen, wurde nur zum Teil als Speicherort benutzt, wie in Abbildung 59 dargestellt. Dies ist der einzige Abschnitt, bei dem auch vor dem Abladen eine Messung gemacht wurde.

Beneden-Leeuwen 21.07.1998

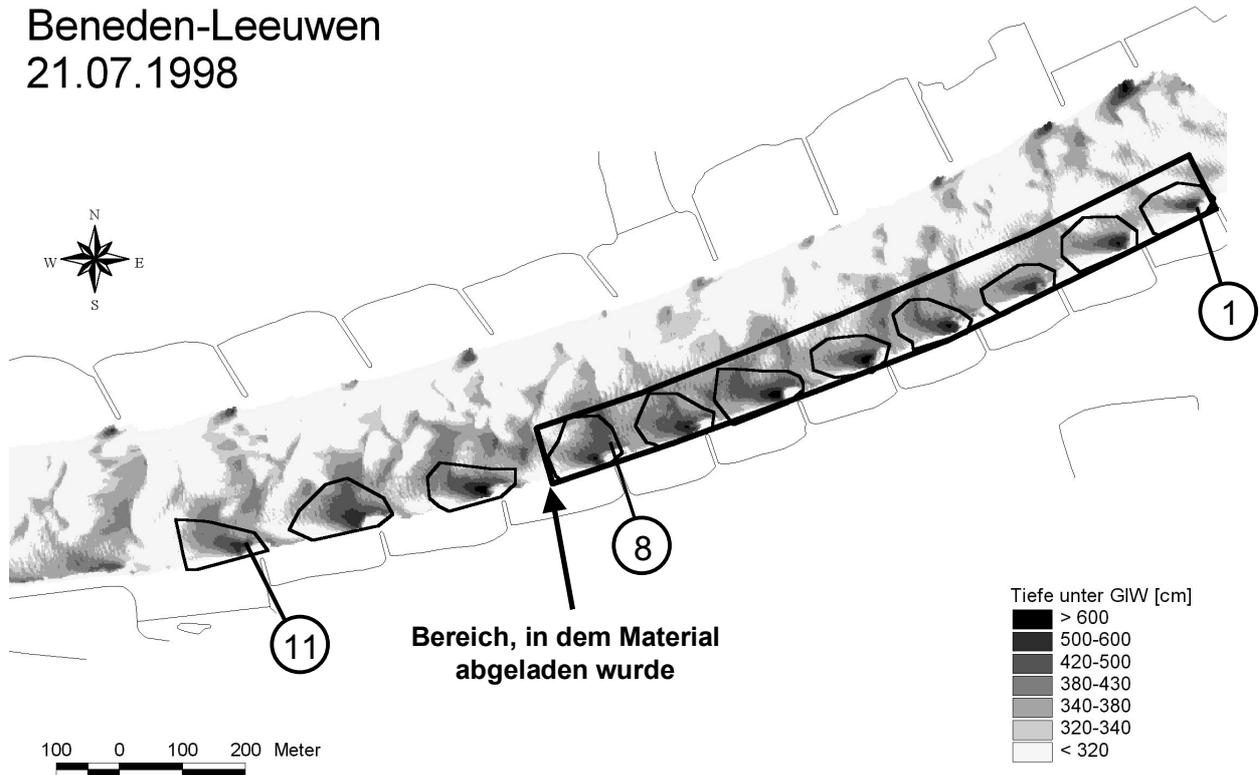


Abbildung 59 – Betrachtete Erosionszonen bei Beneden-Leeuwen. Zusätzlich ist der Bereich markiert, in dem Material wieder zurückgespeichert wurde.

Während die Flächenausdehnung der Erosionszonen keine Erkenntnisse beisteuert, fällt die Volumenänderung sehr deutlich ins Auge (Abbildung 60). Dabei reagierten die einzelnen Zonen sehr unterschiedlich. In den Zonen 6 bis 7 ist ein starker Volumenzuwachs zu erkennen. Tabelle 13 zeigt den Vergleich mit den im Logbuch eingetragenen Daten. Dabei fällt ein deutlicher Unterschied auf: Zonen 1 bis 3 weisen nicht den Materialzuschuss auf, der ihnen gemäß der Aufzeichnungen zugekommen ist.

Volumenänderung Beneden-Leeuwen

Zone	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Insgesamt (1-8)
Lt. Logbuch [m ³]	2500	9975	2850	2350	2300	4800	9675	3600				38050
Gemessen [m ³]	408	939	1808	1416	4179	4008	4010	2168	-206	-296	-784	18936

Tabelle 13 – Änderung des Volumens der Zonen bei Beneden-Leeuwen

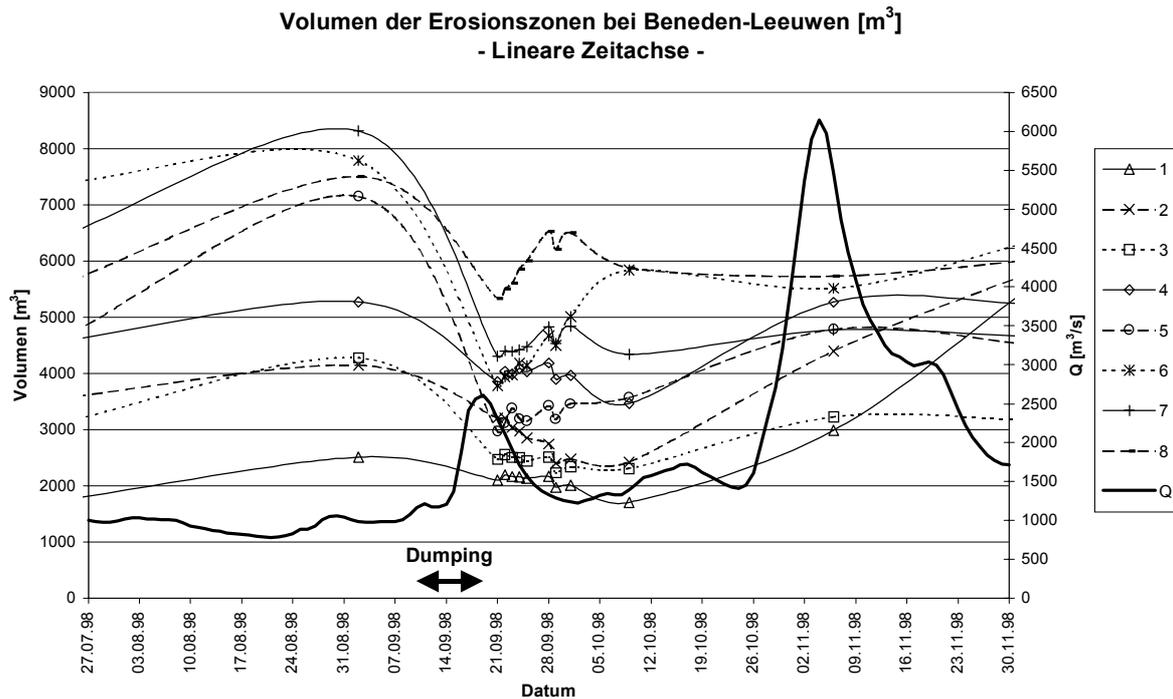


Abbildung 60 – Volumen der Erosionszonen nach Materialzugabe bei Beneden-Leeuwen

Da zwischen beiden Messungen fast 20 Tage vergangen sind, hat hier offensichtlich bereits eine Umverteilung stattgefunden, und einiges Material wurde bereits wegerodiert. Nur die Hälfte des eingebrachten Volumens kann wieder gefunden werden, wobei jedoch unklar ist, wieviel in der Zwischenzeit durch zusätzliche Sedimentation und Erosion bewegt wurde. Die Unterschiede im Gesamtvolumen lassen sich aber auch dadurch erklären, dass nicht zwangsläufig alles Material wirklich in die Zonen eingebracht wurde. Möglicherweise wird durch die Art der Einbringung ein Teil des Materials bereits durch die Strömung wegtransportiert. An welchen Stellen eine Zu- bzw. Abnahme des Volumens vor sich ging, gibt Abbildung 61 Aufschluss. So sind besonders bei den Zonen 5 und 7 auch Bereiche außerhalb der betrachteten Gebiete starken Änderungen unterworfen.

Beneden-Leeuwen
02.09.1998 / 21.09.1998

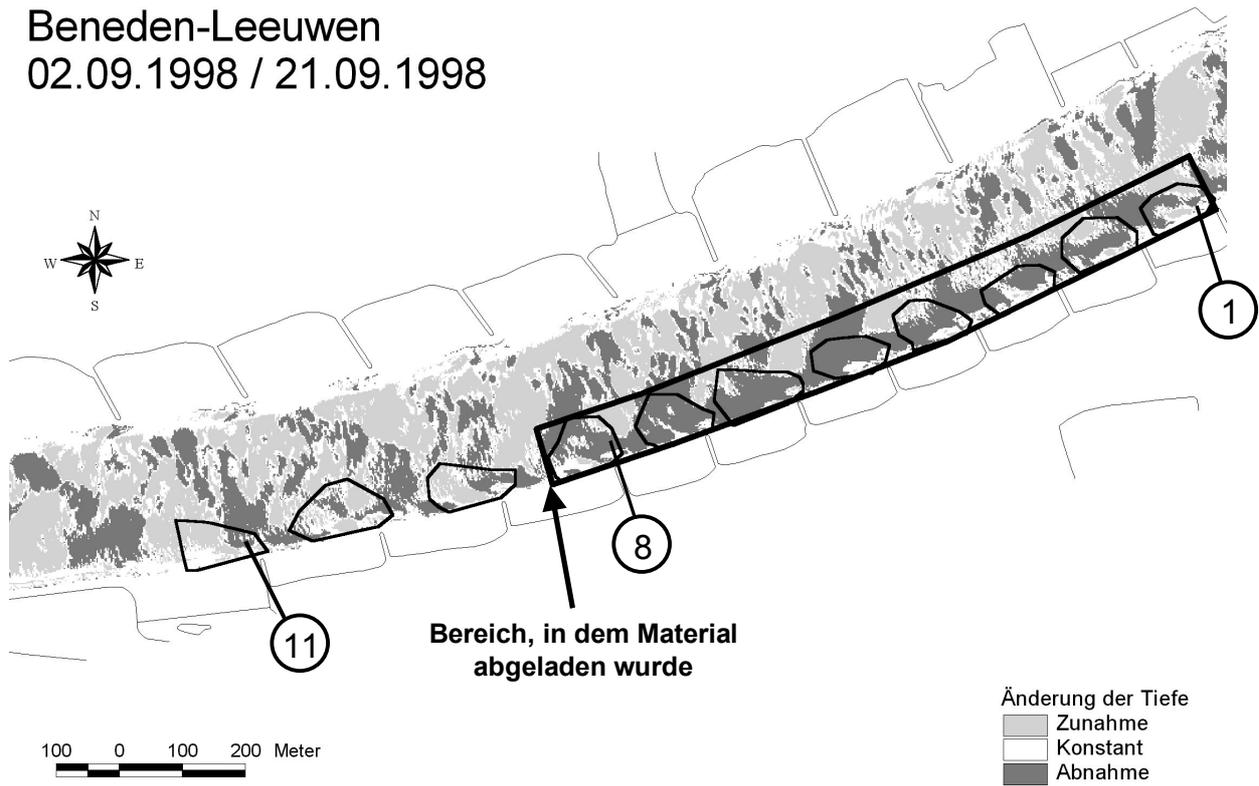


Abbildung 61 – Änderung der Tiefe bei Beneden-Leeuwen vor und nach den Bagger- und Rückspeicherarbeiten

6.5 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind bis zu einem gewissen Punkt nicht befriedigend. Bei Slijk-Ewijk kann, auch durch mangelnde Daten, nicht nachgewiesen werden, dass überhaupt Material abgeladen wurde. Winssen dagegen zeigt in Bezug auf die Erosion in den Zonen eine langsame Reaktion, Beneden-Leeuwen reagiert dagegen sehr schnell. Drei Wochen nach dem Abladen scheint sich die Situation hier wieder normalisiert zu haben.

Die drei Abschnitte zeigen also eine sehr unterschiedliche Reaktion auf die Arbeiten. Mögliche Ursachen können auch darin liegen, dass z.B. bei Slijk-Ewijk überhaupt kein Material eingebracht wurde, im Gegensatz zu den Aufzeichnungen im Logbuch. Ebenso könnten Fehler während der täglichen Messungen zu diesen Ergebnissen beitragen.

Um trotzdem eine Antwort auf die Frage geben zu können, was mit dem Material nach der Rückgabe an den Fluss passiert, eignet sich, vom Standpunkt der Datenqualität, Beneden-Leeuwen. Hier scheint ein Abtransport schnell und innerhalb von drei bis vier Wochen stattzufinden. Diese Erkenntnis legt den Schluss nahe, dass die Erosionszonen als nicht geeignet für die Speicherung von Material angesehen werden können. Da jedoch keine Erkenntnisse vorliegen, wie sich der Sand nach dem Verlassen der Zonen im Flussbett verteilt, darf dies nicht als Schlussfolgerung, sondern eher als Hypothese aufgefasst werden.

Aus dem Vorangegangenen ergeben sich jedoch einige Empfehlungen für zukünftige Untersuchungen. Um mehr über die wichtigen Vorgänge des Transports von eingebrachtem Material zu erfahren, sollte ein neues Messprogramm initiiert werden. Ein solches Programm muss präzise Informationen über die Abladeorte aufzeichnen. Darüber hinaus sollten nicht tägliche, sondern wöchentlich- oder halbwochentliche Messungen vorgenommen werden. Das Abladen des Materials ist ebenfalls ein Vorgang, der ebenfalls einer genauen Untersuchung unterzogen werden sollte. Es muss geklärt werden, welche Menge des wiedereingebrachten Materials bereits beim Abladen von der Strömung erfasst und abtransportiert wird.

7 Potenzielle Speichervolumen für ausgebaggertes Material

7.1 Einleitung

Die Frage, wie groß das Speichervermögen der Waal für wiedereingebrachtes Material ist, hat einen sehr praktischen Grund: Nach der bisherigen Berechnungsmethode kann die Waal ein Vielfaches der im Jahr bewegten Mengen wieder aufnehmen. Dies stimmt jedoch nicht mit den Beobachtungen auf dem Fluss überein. [10]

7.2 Konventionelle Methode zur Berechnung des Speichervolumens

Bis jetzt wird das zur Verfügung angenommene Speichervolumen der Waal dadurch berechnet, dass im geographischen Informationssystem ArcInfo das Volumen unterhalb von 3,20 m unter GIW errechnet wurde. Abgeladenes Material darf aus Sicherheitsgründen die Tiefe nur bis zu diesem Niveau verringern. Durch diesen einfachen aber praktischen Berechnungsweg werden wichtige Punkte außer Acht gelassen, insbesondere:

- Das Abladen geschieht nur in großen Mengen: Es entstehen so Sandhaufen, die eine bestimmte Grösse erreichen. Gebiete mit kleinen (z.B. 10 cm) vorhandenen Abladetiefen können nicht genutzt werden.
- Regionen, die eine ausreichende Tiefe besitzen aber zu kleine Volumina, um eine ganze Ladung aufzunehmen, werden fälschlicherweise mit in Betracht gezogen.

7.3 Ziel der Untersuchung

Das angestrebte Ziel dieser Betrachtung ist es, einen einfachen und trotzdem praktikablen Weg zur Bestimmung der richtigen Speichervolumina zu finden. Auch sollen verschiedene Teile des Flusses betrachtet werden. Dazu gehören die eigentliche Fahrrinne und der Teil außerhalb zwischen Normallinie und Fahrrinne. Wegen den gegenwärtig gültigen Bestimmungen ist das Abladen nur in

der Fahrrinne erlaubt. Als zukünftige Speicherstellen sind diese Gebiete außerhalb der Fahrrinne jedoch von Interesse.

7.4 Berechnung der Speichervolumina

Zum Abladen wird auf dem Fluss ein Gebiet angesteuert, das durch die von Rijkswaterstaat gestellte Karte als geeignet eingetragen ist. Die genaue Position des Abladeortes wird mit einem normalen Einzelstrahlecholot bestimmt. Wassertiefen von 4,0 m bis 4,5 m werden gewöhnlich als ausreichend angesehen. Die Unternehmer gehen davon aus, dass der verklappte Sand eine Soforthöhe von etwa einem Meter erreicht, bevor er von der Strömung verteilt wird.

Dies wird berücksichtigt durch die Berechnung der Speichervolumina bis zu

- einer Tiefe von 3,20 m unter GIW, um den Unterschied zu der normalen Berechnung festzustellen, die schwer auffindbare und unzugängliche sowie zu kleine Bereiche beinhaltet,
- einer Tiefe von 4,20 m unter GIW, um die Art und Weise zu berücksichtigen, in der das ausführende Unternehmen beim Abladen vorgeht,
- einer Tiefe von 3,70 m unter GIW, als Zwischenniveau, und um zu sehen, wieviel Volumen mehr bei der Anwendung einer präziseren Ablademethode genutzt werden kann (entspricht einer Höhe eines Materialhaufens von 0,5 m).

Abbildung 62 zeigt einen Abschnitt bei Ewijk, auf den die Berechnung abgewendet wurde. Die Berechnungsergebnisse für die gesamte Strecke zeigen Abbildung 63 bis Abbildung 65. Dabei wurde die Übersichtsmessung März 1998 gewählt, weil nur diese eine durchgehende Strecke von km 888 bis km 916 abdeckt.

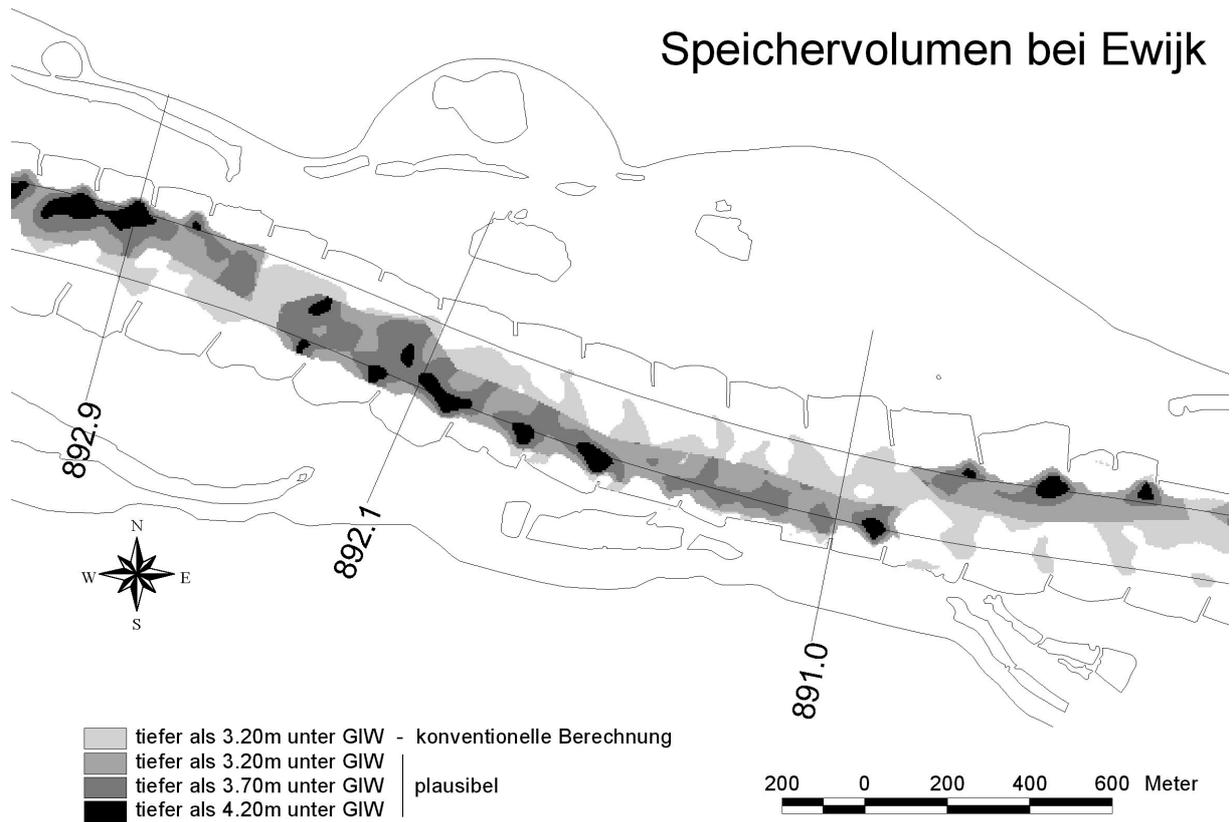


Abbildung 62 – Auffinden von Speichervolumen nach konventioneller und plausibler Methode

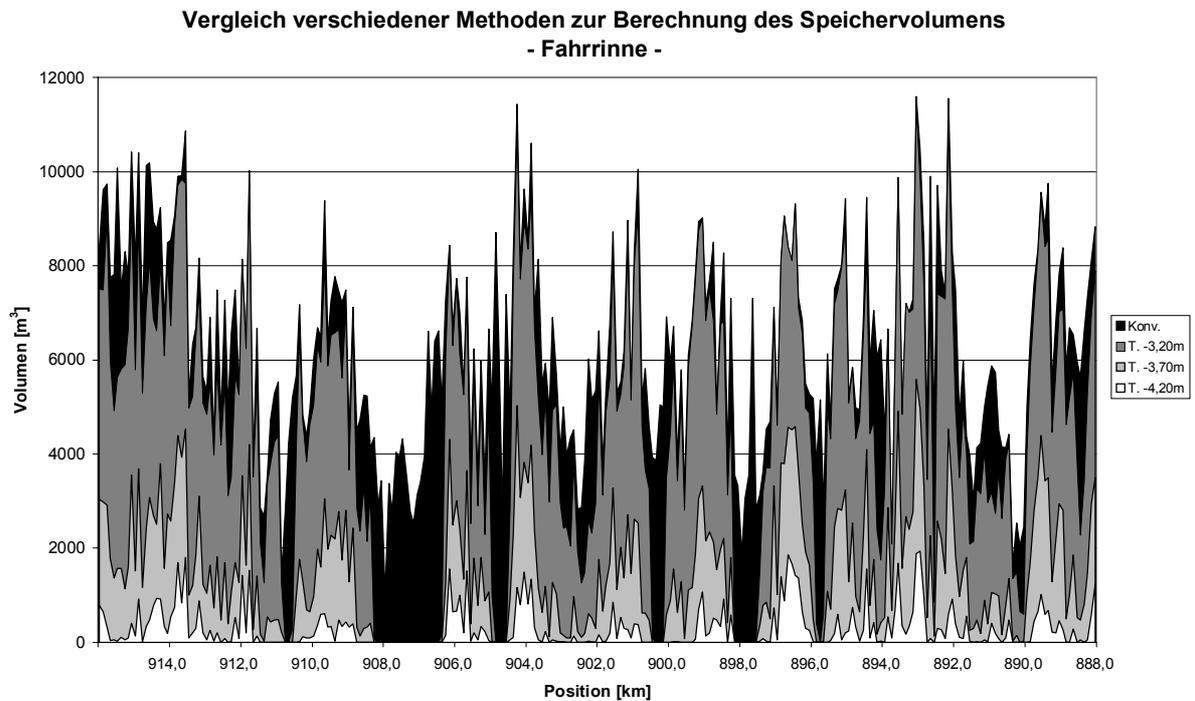


Abbildung 63 – Speichervolumenberechnung in der Fahrrinne

Vergleich verschiedener Methoden zur Berechnung des Speichervolumens
- Ausserhalb der Fahrrinne -

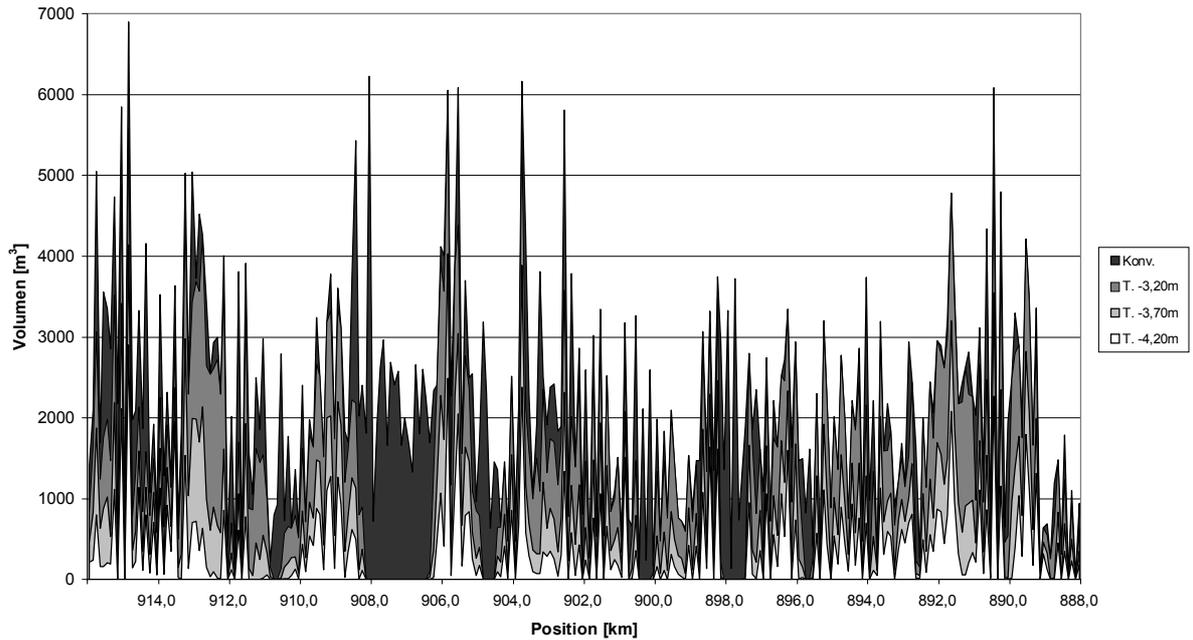


Abbildung 64 – Speichervolumenberechnung ausserhalb der Fahrrinne

Vergleich verschiedener Methoden zur Berechnung des Speichervolumens
- Innerhalb und ausserhalb der Fahrrinne -

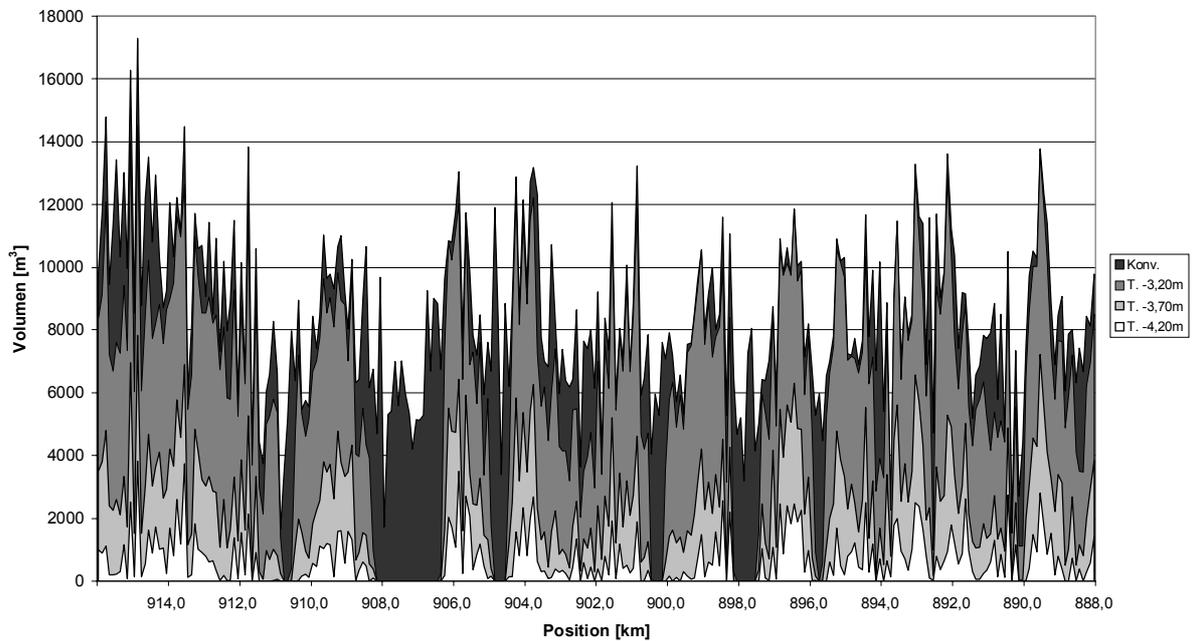


Abbildung 65 – Speichervolumenberechnung innerhalb und ausserhalb der Fahrrinne

7.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass sich etwa 25 % des konventionell berechneten Volumens an Stellen befindet, die für das Bagger- und Abladegerät zu schwer zu finden oder zu weit entfernt und daher nach dem Gesichtspunkt der Arbeitsoptimierung zu umständlich anzufahren sind.

Wird ferner in Betracht gezogen, dass das ausführende Unternehmen nur in Gebieten mit ausreichender Tiefe abladen wird (4,20 m unter GIW), so bleiben nur noch 10 % des ursprünglich errechneten Volumens übrig (Tabelle 14).

Das Volumen des Zwischenwertes von 3,70 m unter GIW lässt dagegen immerhin noch 30 % als annehmbares Volumen zu.

Unter Zuhilfenahme des Volumens außerhalb der Fahrrinne kann unterhalb von 4,20 m unter GIW die doppelte Menge gespeichert werden. Dieser große Volumengewinn kann dem Einbeziehen der Erosionszonen außerhalb der Fahrrinne zugeschrieben werden.

Position	Typ	Berechnungsmethode			
		Konventionell	Plausibel		
			Speichervolumen liegt unterhalb von		
			3,20m unter GIW	3,70m unter GIW	4,20m unter GIW
Fahrrinne	Volumen [10^6 m^3]	2,3	1,8	0,6	0,1
	Faktor	1,00	0,76	0,27	0,06
Ausserhalb der Fahrrinne	Volumen [10^6 m^3]	0,8	0,5	0,3	0,1
	Faktor	1,00	0,7	0,38	0,19
Innerhalb und ausserhalb der Fahrrinne	Volumen [10^6 m^3]	3,1	2,3	0,9	0,3
	Faktor	1,00	0,75	0,30	0,09

Tabelle 14 – Ergebnis der Speichervolumenbestimmung

Einzelne Teile tragen dabei unterschiedlich bei. Tabelle 15 zeigt, dass Übergänge nur einen Anteil von einem Drittel am potenziellen Speichervolumen haben. Dieses Ergebnis ist nicht überraschend: Krümmungen weisen durch ihr Gefälle von Innen- zur Außenseite höhere Volumenanteile auch unterhalb von 4,20 m unter GIW auf.

Position		Typ	Berechnungsmethode			
			Konventionell	Plausibel Speichervolumen liegt unterhalb von		
				3,20m unter GIW	3,70m unter GIW	4,20m unter GIW
Fahrrinne	Krümmungen	Volumen [10 ³ m ³]	604	498	150	22
		Faktor	1,00	0,82	0,25	0,04
	Übergänge	Volumen [10 ³ m ³]	109	56	10	1
		Faktor	1,00	0,51	0,09	0,01
Ausserhalb der Fahrrinne	Krümmungen	Volumen [10 ³ m ³]	200	169	86	42
		Faktor	1,00	0,84	0,43	0,21
	Übergänge	Volumen [10 ³ m ³]	51	30	15	7
		Faktor	1,00	0,59	0,30	0,14
Innerhalb und ausserhalb der Fahrrinne	Krümmungen	Volumen [10 ³ m ³]	804	666	236	64
		Faktor	1,00	0,83	0,29	0,08
	Übergänge	Volumen [10 ³ m ³]	161	86	25	8
		Faktor	1,00	0,53	0,16	0,05

Tabelle 15 – Ergebnis der Speichervolumenbestimmung bei Beachtung der morphologischen Einheiten im Untersuchungsgebiet

8 Ausblick

Die hier vorgenommenen Untersuchungen hatten nicht nur die Beantwortung der gestellten Fragen zum Ziel, sondern es besteht nunmehr zusätzliche Erfahrung, wie mit den Daten umgegangen werden kann. Dazu gehörte zum einen die ganz praktische Bearbeitung und Handhabung der nicht unerheblichen Datenmengen, und zum anderen welche Informationen aus ihnen gewonnen werden können und welche nicht. Gerade dem Punkt der Handhabung wird in Zukunft noch wesentlich größere Bedeutung zukommen, da die Messungen weiterhin und in größerem Umfang betrieben werden. Mit zunehmendem Kenntnisstand über die morphologischen Reaktionen der Waal sollte es möglich sein, zukünftige Nassbaggerarbeiten gezielter und wirkungsvoller einzusetzen. Es wird sich jedoch nicht zwangsläufig eine Optimierung des Arbeitsablaufes ergeben; hier spielen auch Wirtschaftlichkeitsfragen eine Rolle, deren Bedeutung nicht unterschätzt werden darf.

Das Projekt, dem diese Arbeit angehört, wird weiter fortgesetzt. Ziel ist es, morphologische Teilprozesse möglichst quantitativ zu beschreiben, um diese in einem System wie dem WaalBOS [3] integrieren zu können. Aufgrund der starken Schwankungen im Systemverhalten wird dieses Unterfangen mit großen Schwierigkeiten konfrontiert werden. Es ist daher unsicher, auf welche Art den wenigen vorliegenden Daten gesicherte Erkenntnisse abgeleitet werden können. Oftmals wird hier nach wie vor die Erfahrung der planenden und ausführenden Ingenieure den Ausschlag für die nötigen Eingriffe in die Morphologie ergeben.

9 Literatuur

- [1] P.A.Carling: In-Stream Hydraulics and Sediment Transport aus: River Flows and Channel Forms: Selected extracts from The rivers handbook / edited by G. Petts and P. Calow
- [2] Douben, ing. N., August 1998, Inland shipping on the Dutch River Waal; past present and future RWS, RIZA
- [3] Douben, ing. N., Januar 1999, Development of a Decision Support System for dredging on the river Waal in the Netherlands, RWS, RIZA
- [4] Jansen et al.: Principles of River Engineering
- [5] Kleinhans, M.G., September 1999, *Sedimenttransport in de Waal: hoogwater november 1998*, report ICG 99/6, Netherlands Centre for Geo-ecological Research
- [6] RWS, 1993, *Toekomstvisie Waal Hoofdtransportas*, Nota III, Eindrapportage, Directie Gelderland, Projectbureau Waal
- [7] RWS, DON, 1996, Twice a river – Rhine and Meuse in the Netherlands
- [8] RWS, DON, Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, 1996, *Rhein/Waal, Fahrrinne Rotterdam – Duisburg*
- [9] RWS, DON, 1997, Summary Projectmemorandum Waal Deepening and widening the waterway between Pannerdensche Kop and Zaltbommel
- [10] RWS, DON, 1999, Het berekening van bagger- en stortvolumes Bovenrijn & Waal
- [11] Schepman, Frieke, Mai 2000, *Morfologische ontwikkeling van de Waalbodem*, Delft Hydraulics
- [12] Taal, ir. M, Oktober 1999, *Waalproject - Proef morfologie*, CD-ROM, versie 2.0, RWS, DON
- [13] Vriend, prof.dr.ir. H.J. de, Juni 1997, *Rivierwaterbouwkunde*, CTwa3340, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek
- [14] Wilbers, W.E.A. & ten Brinke, W.B.M., Development of subaqueous dunes in the Rhine and Waal, the Netherlands. A preliminary note, RIZA

Abkürzungen:

RWS Ministerie van Verkeer en Waterstaat (Rijkswaterstaat)
DON Directie Oost Nederland
RIZA Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 – Der Rhein bei Lobith mit Schiffsverkehr	1
Abbildung 2 – Die Waal.....	1
Abbildung 3 – Geschichte der Verbesserungen des Abschnitts von km 910 bis km 930 der Waal.....	3
Abbildung 4 – Profil der Fahrrinne	4
Abbildung 5 – Die Waal bei Nijmegen	4
Abbildung 6 – Hysterese-Beziehung zwischen Sedimenttransport und Abfluß	7
Abbildung 7 – Spiralströmung in einer Flusskrümmung.....	9
Abbildung 8 – Feste Sohle und Wirkungsweise	11
Abbildung 9 – Bodenschwellen und Wirkungsweise.....	11
Abbildung 10 – Bodenleitwände und Wirkungsweise	12
Abbildung 11 – Schleifenkorrektur.....	12
Abbildung 12 – Bühnenverlängerung	13
Abbildung 13 – Seitliches Ausweichen der Strömung in das Winterbett.....	14
Abbildung 14 – Abtrennen von Bühnenfeldern.....	14
Abbildung 15 – Verschiedene Baggertypen	15
Abbildung 16 – Häufigkeitsverteilung der kleinsten gemessenen Tiefen	17
Abbildung 17 – Verschiedene Baggerabschnitte mit den jeweils herzustellenden Tiefen unter GIW ..	19
Abbildung 18 – Messen mit einem Multi-Beam Echolot.....	23
Abbildung 19 – Die vier Abschnitte im Untersuchungsgebiet	25
Abbildung 20 – Übersichtsmessung im März 1998 bei Ewijk	26
Abbildung 21 – Übersichtsmessung im März 1998 bei Winssen ²⁷	
Abbildung 22 – Übersichtsmessung im März 1998 bei Dodewaard-Druten	29
Abbildung 23 – Übersichtsmessung im März 1998 bei Beneden-Leeuwen.....	30
Abbildung 24 – Aufteilen der Daten in 100m-Querschnitte.....	32
Abbildung 25 – Kurven und Übergänge gemäß den morphologischen Einheiten.....	33
Abbildung 26 – Tägliche Werte des Abflusses der Waal.....	34
Abbildung 27 – Auffinden der Kanalbreite für 100m - Abschnitte	35
Abbildung 28 – Definition der Fahrrinne	35
Abbildung 29 – Ewijk vor den Baggermaßnahmen 07/98	36
Abbildung 30 – Ewijk nach Ausführung der Baggermaßnahmen 09/98.....	37
Abbildung 31 – Ewijk 11/98.....	38
Abbildung 32 – Zeitliche Entwicklung der Breite des Kanals.....	38
Abbildung 33 – Das Bild zeigt alle Orte, die im Zeitraum von September 1998 bis Juni 1999.....	38
Abbildung 34 – Ewijk; Entwicklung der Tiefenlinie 2,8 m unter GIW	39
Abbildung 35 – Entwicklung der Kanalbreite bei Ewijk und Abfluss	40

Abbildung 36 – Winssen vor den Baggermaßnahmen 06/98.	41
Abbildung 37 – Winssen; Entwicklung der Tiefenlinie 2,8 m unter GIW	42
Abbildung 38 – Entwicklung der Kanalbreite bei Winssen und Abfluss	42
Abbildung 39 – Dodewaard-Druten 11/98	44
Abbildung 40 – Dodewaard-Druten während der beiden Zeiträume nach den Baggerarbeiten	45
Abbildung 41 – Entwicklung der Kanalbreite bei Dodewaard-Druten und Abfluss.....	46
Abbildung 42 – Beneden-Leeuwen 07/98 vor den Baggermaßnahmen.....	47
Abbildung 43 – Entwicklung der Kanalbreite bei Beneden-Leeuwen und Abfluss.....	48
Abbildung 44 – Vergleich Breitenentwicklung Übergänge (Gruppe I)	50
Abbildung 45 – Vergleich Breitenentwicklung Einheiten mit schwacher Krümmung (Gruppe II).....	50
Abbildung 46 – Vergleich Breitenentwicklung Einheiten mit starker Krümmung (Gruppe III).....	50
Abbildung 47 – Vergleich der Mittelwerte der Gruppen I, II und III und Standardabweichung.....	51
Abbildung 48 – Vergleich Breitenentwicklung der Mittelteile dreigeteilter Kurven.....	52
Abbildung 49 – Vergleich der Kanalbreitenentwicklung aller Teile der Kurven	53
Abbildung 50 – Vergleich von Kanalbreiten bei der Unterteilung in feste Längen von 600 m.....	54
Abbildung 51 – Verlauf der mittleren Kanalbreite im Bogen bei Winssen	55
Abbildung 52 – Änderung der Breite in Abhängigkeit zum Abfluss	56
Abbildung 53 – Betrachtete Erosionszonen bei Slijk-Ewijk	61
Abbildung 54 – Entwicklung der Flächenausdehnung der Erosionszonen bei Slijk-Ewijk	62
Abbildung 55 – Volumen der Erosionszonen nach Materialzugabe bei Slijk-Ewijk.....	62
Abbildung 56 – Betrachtete Erosionszonen bei Winssen.....	63
Abbildung 57 – Entwicklung der Flächenausdehnung der Erosionszonen bei Winssen.....	64
Abbildung 58 – Volumen der Erosionszonen nach Materialzugabe bei Winssen	65
Abbildung 59 – Betrachtete Erosionszonen bei Beneden-Leeuwen	66
Abbildung 60 – Volumen der Erosionszonen nach Materialzugabe bei Beneden-Leeuwen.....	67
Abbildung 61 – Änderung der Tiefe bei Beneden-Leeuwen vor und nach Arbeiten.....	68
Abbildung 62 – Auffinden von Speichervolumen nach konventioneller und plausibler Methode	72
Abbildung 63 – Speichervolumenberechnung in der Fahrrinne	72
Abbildung 64 – Speichervolumenberechnung außerhalb der Fahrrinne	73
Abbildung 65 – Speichervolumenberechnung innerhalb und außerhalb der Fahrrinne	73

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 – Abflussdaten des Rheins	5
Tabelle 2 – Vorher- und Nachhermessungen der Arbeiten von 1999.....	20
Tabelle 3 – Definition der Messabschnitte.....	25
Tabelle 4 – Vorhandene Daten und Termine für Ewijk.....	26
Tabelle 5 – Vorhandene Daten und Termine für Winssen.....	28
Tabelle 6 – Vorhandene Daten und Termine für Dodewaard-Druten.....	29
Tabelle 7 – Vorhandene Daten und Termine für Beneden-Leeuwen	31
Tabelle 8 – Definition der Kurven und Übergänge für das Untersuchungsgebiet in der Waal.....	33
Tabelle 9 – Abflussmerkmale der Waal im Untersuchungszeitraum.....	34
Tabelle 10 – Nach der Krümmung sortierte morphologische Einheiten.....	49
Tabelle 11 – Unterteilung der Kurven	52
Tabelle 12 – Unterteilung der Flusskurven in feste Längen von 600 m	53
Tabelle 13 – Änderung des Volumens der Zonen bei Beneden-Leeuwen.....	66
Tabelle 14 – Ergebnis der Speichervolumenbestimmung.....	74
Tabelle 15 – Ergebnis der Speichervolumenbestimmung bei Beachtung der morphologischen Einheiten im Untersuchungsgebiet	75