

Summary

Banks constitute important areas for the river ecology since they provide a multitude of favourable conditions for flora and fauna. The hydromorphological diversity typical of these transitional zones between water and land, and the associated processes of erosion and accretion, make riverbanks vital for many aquatic and riparian plants and animals. In recent decades, the increasing awareness of the ecological significance of rivers and water bodies resulted in the gradual implementation of extensive stream, river and floodplain restoration. In the EU, these practices are regulated by the Water Framework Directive. An important and largely applied re-naturalization measure in highly trained watercourses is the removal of bank protections to reactivate erosion processes and promote habitat diversity.

In rivers used as waterways, ship waves can be an important cause of bank erosion and ecological disturbance. The sediment yield from bank erosion may alter navigable depths, the water quality, and flood conveyance, for which enhancing the hydromorphology is a challenge in multifunctional rivers. Due to pressing needs to improve riverine habitats, large-scale restoration works have been implemented based on conceptual schemes without a comprehensive knowledge of wave erosion processes or a precise estimate of long-term bank retreat. The Meuse River in the Netherlands constitutes a remarkable example of systematic rehabilitation, where bank protections have been removed along 100 km between 2008 and 2020.

Given that ship-induced erosion is still poorly understood, the management of navigable rivers and the planning of restoration measures would benefit from a solid and deeper understanding of natural bank dynamics induced by ship waves, for both economic and ecological reasons. Moreover, more precise estimates of long-term bank retreat would help to optimize different functions and reduce conflicts of interest within the river system. Therefore, the main objective of this investigation is to understand and predict erosion processes and the morphological evolution of natural banks in regulated navigable rivers.

The research goal is pursued through the thorough investigation of a river reach that presents a wide range of erosion rates after the removal of bank protections. This main case study consists of a 1.2-km straight reach in the Meuse River, near Oeffelt in the Netherlands, the left bank of which was re-naturalized in 2010 by extracting the riprap. The Meuse is a midsize river with a pluvial regime, which has been canalized and is regulated with a series of weirs to enable navigation. Here, field techniques and complementary laboratory tests are utilized including topographic surveys with UAV, wave measurements with ADV, soil coring, geotechnical tests, and RTK GPS profiling. Processing and analysis of data are carried out with MATLAB.

Four research steps are conducted. First, a methodology to quickly survey the 3D bank topography along a midsize river reach is determined to measure bank erosion processes. Second, distinct patterns of bank erosion that appeared along the Meuse River after protection removal are investigated. The aim is to disentangle the causes of the size, location and asymmetry of large embayments before analysing erosion processes at single river sections. Third, bank erosion processes in regulated navigable rivers are characterized and conceptualized. Fourth, a tool to estimate long-term or final retreat of re-naturalized banks in regulated navigable rivers is developed.

The results of the first research component show that structure from motion photogrammetry applied to photos taken from an UAV is a practical and accurate method to measure riverbank erosion. By distributing ground-control points sufficiently spaced from the bank into the floodplain, digital surface models are georeferenced with sufficient accuracy to compare bank profiles between successive surveys. The identification of ground-control points in photographs is facilitated by placing oblique plaques on the floodplain, reducing the need for another perspective along banks. A single UAV flight with an oblique perspective of the bank becomes then sufficient to capture its three-dimensional complexity. Eight overlaps among consecutive images is the

minimum number not to reduce the precision potential of a single UAV flight. The proposed methodology is fast to deploy in the field and surveys reach-scale riverbanks in sufficient resolution and accuracy to quantify bank retreat and identify morphological features of the complete erosion cycle, which enables the characterization of bank erosion at the process scale.

Second, the oblique orientation of heterogeneous sedimentary strata with respect to the canalized Meuse River alignment explains the formation and asymmetry of large embayments. Depositional layers of varying compositions, structured by scroll-bar formation during former river meandering, led to wide-ranging erosion rates within a relatively short reach, which formed distinct bankline patterns across diverse lithologies and above the controlled water level of the river. The frequent occurrence of this water level and the persistent ship wave attack shaped bank profiles of varying strengths with a mild sloping terrace. The presence of isolated trees on the floodplain only locally delay erosion rates. Bank retreat rates at single cross sections primarily depend on the lithology near the minimum regulated water stage.

Third, the evolution of bank profiles revealed the active role of ship waves in erosion progression, even at well-developed terraces. Currents initially contribute to all phases of the erosion cycle, but they gradually exert less shear stresses on the upper bank as the terrace elongates. Their later role at intermediate stages of development is reduced to the destabilization of steep high banks through water level fluctuations, without capacity to transport slump blocks. The resistance to erosion of the bank lithology defines the terrace geometrical proportions and the pace of morphological evolution of bank profiles. For instance, at a given time after protection removal, less cohesive banks can be present at intermediate stages of development while more cohesive banks remain at early stages. The latter present shorter and shallower terraces whereas the opposite holds for the former. Vegetation temporarily protects the upper bank from failure and toe erosion, but its permanence is subject to terrace stability and effectiveness to dissipate waves. Biofilms are able to partially cover well-developed terraces, changing entrainment thresholds.

Fourth, based on the above conceptual framework of bank profile evolution, a model was developed which captures the observed non-linear morphodynamics driven by ship waves in regulated settings. This new tool estimates long-term retreat by accounting for the main erosion drivers and essential mechanisms. Equilibrium bank profiles are reached once wave-induced shear stresses fall below the threshold for entrainment of cohesive soils. Unlike previous models of ship-induced erosion, the process-based approach enables to distinguish the contribution of each factor to erosion. Primary waves are found to exert the highest loads on the terrace, shaping long-term profiles and defining ultimate retreat. To apply the model, it is necessary to measure or estimate the largest primary wave and the soil cohesion at the controlled level, preferably in the range -1.00 m to +0.50 m with respect to it.

The above findings are based on cohesive banks in a straight reach of a regulated river. The presence of gravel layers in the bank changes the morphological response to ship waves due to the armouring of lower strata. In such cases, the bank terrace can reach a transverse slope in dynamic equilibrium defined by grain size, as long as longitudinal currents do not transport the gravel to the lower bank. The lower non-cohesive layer of composite banks responds in a similar way, eventually reaching a dynamic equilibrium, after which a final retreat of the upper cohesive layer is possible. The position of banks in the river planform affects the magnitude and duration of the contribution of currents to upper bank erosion. Their direct impact, especially during high floods, can dominate bank retreat during long periods if the flow is persistently steered against the upper bank, as at outer bends. Unregulated rivers present higher shear stresses than those with controlled stages. Their sandy strata of composite banks are normally exposed to currents and waves, creating larger morphodynamics and more challenging conditions for vegetation growth.

The new model to estimate final retreat of cohesive banks may be used to prepare a reach scale strategy that defines the most convenient approach for stretches with similar morphological behaviour and available space to develop. In this way, the eventual need to reduce or stop erosion at sections with future excess retreat is

determined in advance. In order to make the most of re-naturalized banks in terms of their benefits for ecological processes and habitat diversity in navigable rivers, the advantages of shallow areas with less perturbed zones should be sought where possible. Two phases of interventions are recommended, a first phase where ship waves freely reach the bank for terrace creation, responding to local lithologies, and a second phase with lowered erosive loads, facilitated by slightly submerged pre-banks. The latter phase increases the possibilities for vegetation, and likely other living organisms, to develop.

The knowledge and tools now available create new possibilities for improved management of re-naturalized banks in navigable rivers. The progress made helps to better understand the contribution of different drivers to bank erosion and to identify which factors control retreat at different bank types, stages of development, and settings. The new insights explain how to apply SfM-UAV to monitor bank erosion processes along river reaches, interpret bankline patterns, assess the role of isolated trees in bank retreat, and manage expectations regarding bank retreat and the role of vegetation to control erosion. The understanding of erosion processes in regulated navigable rivers and the possibility to estimate final erosion magnitudes open future opportunities to analyse the river system from a holistic perspective and to find creative ways to balance diverse river functions.

Samenvatting

Oevers vormen belangrijke zones voor rivierecologie aangezien zij een veelheid aan gunstige omstandigheden leveren voor flora en fauna. De hydromorfologische diversiteit die deze overgangszones tussen water en land typeert, en de daarmee verbonden processen van erosie en aangroei, maken rivieroever van vitaal belang voor vele aquatische en riviergebonden terrestrische planten en dieren. In recente decennia resulteerde het groeiende bewustzijn van het ecologisch belang van rivieren en waterlichamen in de geleidelijke uitvoering van omvangrijk herstel van beken, rivieren en uiterwaarden. In de EU wordt deze praktijk gereguleerd door de Kaderrichtlijn Water. Een belangrijke en breed toegepaste maatregel voor natuurherstel in strak vastgelegde waterlopen is het verwijderen van oeververdedigingen om erosieprocessen te reactiveren en habitatdiversiteit te bevorderen.

In rivieren die als vaarweg gebruikt worden, kunnen scheepsgolven een belangrijke oorzaak zijn van oevererosie en ecologische verstoring. De toelevering van sediment als resultaat van oevererosie kan vaardieptes, waterkwaliteit en hoogwaterafvoercapaciteit wijzigen, waarvoor versterking van de hydromorfologie een uitdaging is in multifunctionele rivieren. Als gevolg van een dringende noodzaak om riviergebonden habitats te verbeteren, zijn grootschalige herstelwerken uitgevoerd gebaseerd op conceptuele schema's zonder uitgebreide kennis van golferosieprocessen of een nauwkeurige schatting van de terugschrijding van oevers op lange termijn. De rivier de Maas in Nederland vormt een opvallend voorbeeld van systematisch herstel, waar oeververdedigingen tussen 2008 en 2020 over 100 km verwijderd zijn.

Gegeven dat scheepsgeïnduceerde erosie nog slecht begrepen is, zou het beheer van bevaarbare rivieren en de planning van herstelmaatregelen baat hebben bij een solide en diepgaander begrip van de door scheepsgolven aangedreven dynamica van natuurlijke oevers, om zowel economische als ecologische redenen. Bovendien zouden nauwkeuriger schattingen van de terugschrijding van oevers op lange termijn helpen om verschillende functies te optimaliseren en conflicten tussen verschillende belangen te verminderen. Daarom is de hoofddoelstelling van dit onderzoek het begrijpen en voorspellen van erosieprocessen en de morfologische ontwikkeling van natuurlijke oevers in gestuwde bevaarbare rivieren.

Het onderzoeksdoel wordt nagestreefd door grondig onderzoek van een riviertraject dat na de verwijdering van oeververdedigingen een breed bereik aan erosiesnelheden te zien geeft. Deze hoofdcasestudie bestaat uit een 1,2 kilometer lang recht traject van de rivier de Maas, nabij Oeffelt in Nederland, waarvan de linkeroever in 2010 weer natuurlijk was gemaakt door verwijdering van de steenbestorting. De Maas is een middelgrote rivier met een regenregiem, die gekanaliseerd is en gereguleerd wordt door een serie stuwen om scheepvaart mogelijk te maken. Hier worden veldtechnieken en complementaire laboratoriumtests gebruikt inclusief opnames van de topografie met UAV, golfmetingen met ADV, grondboringen, grondmechanische tests, en profielopnames met RTK GPS. Verwerking en analyse van data wordt uitgevoerd met MATLAB.

Er worden vier stappen in het onderzoek uitgevoerd. Ten eerste wordt een methodologie bepaald voor snelle opname van de 3D oevertopografie langs een middelgroot riviertraject om oevererosieprocessen te meten. Ten tweede worden onderscheiden oevererosiepatronen onderzocht die langs de rivier de Maas optraden. Het doel is om de oorzaken te ontrafelen van de afmetingen, de locatie en de asymmetrie van grote inhammen alvorens erosieprocessen bij afzonderlijke riviersecties te analyseren. Ten derde worden oevererosieprocessen in gereguleerde bevaarbare rivieren gekarakteriseerd en geconceptualiseerd. Ten vierde wordt een instrument ontwikkeld om de langjarige of uiteindelijke terugschrijding te schatten van weer natuurlijk gemaakte oevers in gestuwde bevaarbare rivieren.

De resultaten van de eerste onderzoekscomponent laten zien dat toepassing van structure-from-motion-fotogrammetrie op vanuit een UAV genomen foto's een praktische en nauwkeurige methode is om de erosie van rivieroever te meten. Door controlepunten op de grond met voldoende onderlinge afstanden vanaf de oever de uiterwaard in te verdelen, worden digitale oppervlaktemodellen van geografische coördinaten

voorzien met voldoende nauwkeurigheid om oeverprofielen tussen achtereenvolgende opnames te vergelijken. Het identificeren van controlepunten op de grond op foto's wordt vergemakkelijkt door schuine platen op de uiterwaard te plaatsen, die de noodzaak van een andere kijkhoek langs de oevers verminderen. Een enkele UAV-vlucht met een schuine kijkhoek op de oever wordt dan voldoende om haar driedimensionale complexiteit te vangen. Acht overlappen tussen achtereenvolgende beelden zijn het minimum aantal om het potentieel aan nauwkeurigheid van een enkele UAV-vlucht niet te reduceren. De voorgestelde methodologie is snel in het veld in te zetten en neemt rivieroeveren op trajectschaal met voldoende resolutie en nauwkeurigheid op om terugschrijding van oevers te kwantificeren en om morfologische kenmerken van de volledige erosiecyclus te identificeren, hetgeen het mogelijk maakt om oevererosie op processchaal te karakteriseren.

Ten tweede verklaart de scheve oriëntatie van heterogene sedimentlagen ten opzichte van de belijning van de gekanaliseerde rivier de Maas de vorming en asymmetrie van grote inhammen. Afzettinglagen van variërende samenstelling, gestructureerd door de vorming van kronkelwaardruggen tijdens het voorheen optredende meanderen van de rivier, leidden tot wijd uiteenlopende erosiesnelheden binnen een betrekkelijk kort traject, hetgeen onderscheiden oeverlijnpatronen vormde dwars door verschillende lithologieën en boven het stuwpeil van de rivier. Het veelvuldige voorkomen van deze waterstand en de voortdurende aanval door scheepsgolven vormde oeverprofielen van variërende sterktes met een flauw hellend terras. De aanwezigheid van geïsoleerde bomen op de uiterwaard vertraagt erosiesnelheden slechts lokaal. Snelheden waarmee oevers in individuele dwarsprofielen terugschrijden hangen primair af van de lithologie bij het laagste stuwpeil.

Ten derde legde de ontwikkeling van oeverprofielen de actieve rol bloot van scheepsgolven in de progressie van erosie, zelfs bij goed ontwikkelde terrassen. Stromingen dragen aanvankelijk bij aan alle fases van de erosiecyclus, maar zij oefenen geleidelijk minder schuifspanningen uit op het bovenste deel van de oever als het terras langer wordt. Hun latere rol bij tussenstadia van de ontwikkeling wordt teruggebracht tot het destabiliseren van steile hoge oevers door fluctuaties in de waterstand, zonder capaciteit om afgeschoven oeverblokken te transporteren. De weerstand van de oeverlithologie tegen erosie definieert de geometrische afmetingen van het terras en het tempo van de morfologische ontwikkeling van oeverprofielen. Bijvoorbeeld, op een bepaald tijdstip na verwijdering van verdediging kunnen minder cohesieve oevers bij tussenstadia van de ontwikkeling aanwezig zijn terwijl meer cohesieve oevers blijven bij vroege stadia. Die laatste laten kortere en minder diepe terrassen zien terwijl het tegenovergestelde geldt voor de eerstgenoemde. Begroeiing beschermt het bovenste deel van de oever tijdelijk tegen bezwijken en teenerosie, maar haar blijvende aanwezigheid is onderworpen aan terrasstabiliteit en effectiviteit in het dempen van golven. Biofilms zijn in staat om goed ontwikkelde terrassen gedeeltelijk te bedekken, waarbij ze de drempelwaarden voor het meenemen van deeltjes veranderen.

Ten vierde werd, gebaseerd op het bovengenoemde conceptuele raamwerk voor de ontwikkeling van oeverprofielen, een model ontwikkeld dat de waargenomen niet-lineaire morfodynamica vangt die wordt aangedreven door scheepsgolven in gestuwde omgevingen. Dit nieuwe instrument schat de terugschrijding op lange termijn door rekening te houden met de voornaamste aandrijvingen van erosie en essentiële mechanismen. Evenwichtsoeverprofielen worden bereikt zodra door golven geïnduceerde schuifspanningen beneden de drempelwaarden vallen voor het meenemen van deeltjes van cohesieve bodems. Anders dan bij voorgaande modellen van scheepsgeïnduceerde erosie, maakt de op processen gebaseerde aanpak het mogelijk om de erosiebijdrage van elke factor te onderscheiden. Gevonden wordt dat primaire golven de hoogste belastingen op het terras uitoefenen, waarmee ze de profielen op lange termijn vormen en de uiterste terugschrijding definiëren. Om het model toe te passen is het nodig om de grootste primaire golf en de cohesie van de grond te meten of te schatten bij het stuwpeil, bij voorkeur in het bereik van -1.00 m tot +0.50 m ten opzichte van dit peil.

Bovenstaande bevindingen zijn gebaseerd op cohesieve oevers in een recht traject van een gestuwde rivier. De aanwezigheid van grondlagen in de oevers verandert de morfologische respons op scheepsgolven als gevolg van het afpleisteren van lager gelegen lagen. In zulke gevallen kan het oeverterras een dwarshelling bereiken in een

door korrelgrootte bepaald dynamisch evenwicht, zolang stromingen in lengterichting het grind niet naar lagere delen van de oever transporteren. De lager gelegen niet-cohesieve laag van samengestelde oevers reageert op een vergelijkbare manier en bereikt uiteindelijk een dynamisch evenwicht, waarna de laatste terugschrijding van de hoger gelegen cohesieve laag mogelijk is. De ligging van de oevers in de plattegrond van de rivier beïnvloedt de grootte en de duur van de bijdrage van stromingen aan erosie van het bovenste deel van de oever. Hun directe impact kan, vooral tijdens hoge hoogwaters, gedurende lange periodes de oeverterugschrijding domineren als de stroming aanhoudend tegen de bovenste oever wordt gestuurd, zoals bij buitenbochten. Ongestuwde rivieren vertonen hogere schuifspanningen dan die met gestuwde peilen. Hun zandige lagen van samengestelde oevers worden normaal blootgesteld aan stromingen en golven, zodat ze grotere morfodynamica scheppen en meer uitdagende omstandigheden voor vegetatiegroei.

Het nieuwe model om de eindterugschrijding van cohesieve oevers te schatten kan gebruikt worden om een strategie op trajectschaal voor te bereiden die de handigste aanpak definieert voor stukken rivier met vergelijkbaar morfologisch gedrag en beschikbare ruimte om zich te ontwikkelen. Op deze manier wordt van tevoren de eventuele noodzaak bepaald om erosie te reduceren of te stoppen in secties met een toekomstig teveel aan terugschrijding. Om het meeste te halen uit weer natuurlijk gemaakte oevers in termen van hun baten voor ecologische processen en habitatdiversiteit in bevaarbare rivieren, zouden waar mogelijk de voordelen gezocht moeten worden van ondiepe gebieden met minder verstoorde zones. Twee interventiefases worden aanbevolen, een eerste fase waarin scheepsgolven de oever vrij bereiken voor het vormen van een terras, in reactie op lokale lithologieën, en een tweede fase met verlaagde erosieve belastingen, gefaciliteerd door net onder water gelegen vooroevers. De laatstgenoemde fase verhoogt de mogelijkheden voor vegetatie, en waarschijnlijk andere levende organismen, om zich te ontwikkelen.

De nu beschikbare kennis en instrumenten scheppen nieuwe mogelijkheden voor verbeterd beheer van weer natuurlijk gemaakte oevers langs bevaarbare rivieren. De gemaakte vooruitgang helpt om de bijdrage van verschillende aandrijvende mechanismen aan oevererosie beter te begrijpen en om te identificeren welke factoren de terugschrijding bepalen bij verschillende oevertypes, ontwikkelingsstadia, en omgevingen. De nieuwe inzichten leggen uit hoe SfM-UAV toegepast kan worden om oevererosieprocessen langs riviertrajecten te monitoren, hoe oeverlijnpatronen geïnterpreteerd kunnen worden, hoe de rol van geïsoleerde bomen in oeverterugschrijding bepaald kan worden, en hoe verwachtingen gemanaged kunnen worden ten aanzien van oeverterugschrijding en de rol van vegetatie voor het beheersen van erosie. Het begrip van erosieprocessen in gestuwde bevaarbare rivieren en de mogelijkheid om de uiteindelijke erosiegroottes te bepalen openen toekomstige kansen om het riviersysteem vanuit een holistisch perspectief te analyseren en om creatieve manieren te vinden om de verschillende rivierfuncties in balans te brengen.