

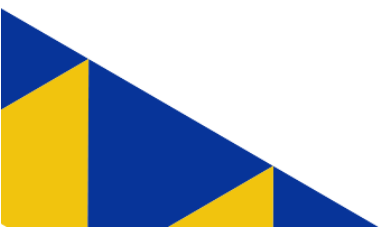


De stabiliteit van de Maasbodem

op de Gemeenschappelijke Maas tussen Borgharen en Maaseik

R.M. Frings
Rijkswaterstaat Zuid-Nederland
Maastricht







Voorwoord

Na de overstromingen in 2021 in het Maasstroomgebied hebben 11 partners uit België, Duitsland en Nederland de handen ineen geslagen om beter voorbereid te zijn op overstromingen en daarmee toekomstig verlies aan mensenlevens en sociaaleconomische schade te voorkomen. Daartoe is het EMfloodResilience-project (projectnummer EMR228) gelanceerd, dat mede mogelijk gemaakt werd dankzij een grote financiële bijdrage vanuit het Europese Interreg V-A EMR-programma. Een van de deelprojecten binnen het EMfloodResilience-project richt zich op de rivierbodemosierosieproblematiek op de Gemeenschappelijke Maas. Het voor u liggende rapport vormt het eindproduct (deliverable D.T5.6.2) van dit deelproject, waarin Rijkswaterstaat nauw samengewerkt heeft met de Vlaamse Waterweg nv (DVW) en het Vlaamse Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO) en een groot deel van het werk is uitgevoerd door BK Ingenieurs en Deltares. De informatie in het voor u liggende rapport is gebaseerd op drie uitgebreide rapporten (Ottevanger en Chavarrias, 2023; Van der Deijl en Ottevanger, 2023; BK Ingenieurs, 2023). Ik dank allen die bijgedragen hebben aan de totstandkoming van dit eindrapport, met name Wilbert van Pampus, Kees Wulfse en Koene Boverhoff (BK Ingenieurs), Frank Kok en Arjan Sieben (Rijkswaterstaat), Willem Ottevanger, Victor Chavarrias en Eveline van der Deijl (Deltares) en Andreas Carls (RWTH Aachen University). Ook dank ik Joke Verstraelen (DVW) en Alexander van Braeckel (INBO) voor de prettige samenwerking. Grensoverschrijdend rivierbeheer is broodnodig, inspirerend en ook gewoon heel plezierig.

De auteur

The EMfloodResilience project has being carried out within the context of Interreg V-A Euregio MeuseRhine and was 90% funded from the European Regional Development Fund.



Samenvatting

In de zomer van 2021 zorgde een lagedrukgebied voor enorme hoeveelheden neerslag in het Maasstroomgebied. De afvoer van de Maas steeg tot een niveau dat gemiddeld slechts eens in de 250 jaar voorkomt. De watermassa die door de Maas werd afgevoerd bracht veel sediment in beweging. Op de Gemeenschappelijke Maas, het deel van de rivier dat de grens vormt tussen Vlaanderen en Nederland, werden fijne zandafzettingen in de ondergrond bloot gespoeld. Tussen Maasband en Berg/Meeswijk ontstonden talrijke diepe erosiekuilen in de rivierbedding, zowel in het Vlaamse als het Nederlandse deel van de rivier, waardoor schade optrad aan veerstoeppen, pijpleidingen, oeververdedigingen en waterkeringen.

De Nederlandse en Vlaamse rivierbeheerders willen voorkomen dat er bij toekomstige hoogwaters opnieuw grote schade optreedt. Om het risico op de vorming van nieuwe erosiekuilen vast te kunnen stellen, is kennis nodig van (1) de korrelgroottesamenstelling van het riviersediment, (2) de kracht van de waterstroming tijdens hoogwater (de bodemschuifspanning) en (3) de omvang van de sedimentvrachten op de Gemeenschappelijke Maas. Het doel van deze studie was het verzamelen van deze informatie. De risicobeoordeling zelf vormde geen onderdeel van deze studie.

Ter bepaling van de korrelgroottesamenstelling van het Maassediment is de rivierbedding van de Gemeenschappelijke Maas tussen Borgharen en Maaseik op 162 locaties bemonsterd met een amfibische graafmachine, waarbij onderscheid gemaakt is tussen de toplaag en de onderlaag. Vervolgens is de korrelgrootteverdeling van de monsters bepaald door middel van een zeefanalyse. Daarbij is gebruik gemaakt van een set van 25 zeven met maaswijdtes variërend van 256 tot 0,063 mm. De korrelgrootte dataset laat zien dat de bodem van de Gemeenschappelijke Maas voornamelijk uit grind bestaat. De mediane korrelgrootte bedraagt 22 mm en het negentigste percentiel van de korrelgrootteverdeling 77 mm. De toplaagmonsters zijn over het algemeen iets grover dan de onderlaagmonsters en het bodemsediment wordt nauwelijks waarneembaar fijner in stroomrichting. Er is sprake van een grote, vrij willekeurige, korrelgroottevariatie op korte afstand.

Ter bepaling van de bodemschuifspanningen die optreden tijdens hoogwaters zijn stationaire berekeningen uitgevoerd met een numeriek tweedimensionaal stromingsmodel bij afvoeren 250, 750, 1400, 2100 en 3200 m³/s. Ook is een niet-stationaire simulatie van het hoogwater 2021 uitgevoerd. De berekeningen laten zien dat de bodemschuifspanning bij de laagste afvoer vrijwel overal tussen 0 en 10 N/m² ligt. Bij toenemende afvoer neemt de bodemschuifspanning toe, echter lang niet overal even sterk, waardoor bij hoogwater een aantal schuifspanningsmaxima ontstaan, onder andere op het erosiekuilentract Maasband-Berg/Meeswijk. Op locaties waar bij hoogwater een significant deel van het Maaswater via het winterbed wordt afgevoerd komt de maximale bodemschuifspanning ook bij de hoogste afvoeren niet of nauwelijks boven de kritieke waarde voor begin van beweging. Verwacht wordt dat het grillig verloop van de bodemschuifspanning zorgt voor sterke gradiënten in sedimenttransportcapaciteit, die erosie en sedimentatie in de hand werken.

Ter bepaling van de sedimentvrachten is een literatuuronderzoek uitgevoerd om een overzicht te verkrijgen van sedimenttransportmetingen en -berekeningen die in het verleden zijn uitgevoerd. Vervolgens is op basis van deze informatie een nieuwe schatting gemaakt van de sedimentvrachten. Uit de analyse wordt duidelijk dat de sedimentvrachten op de Gemeenschappelijke Maas sterk variëren van jaar tot jaar. Bij lage afvoeren is de grindlaag immobiel en is weinig sediment beschikbaar voor transport. Tijdens hoogwaters wordt de grindlaag opengebroken en komen ook de onderliggende fijnere sedimenten in beweging. De jaarvrachten nemen toe in stroomrichting, hetgeen in overeenstemming is met de langjarige beddingerosie op de Gemeenschappelijke Maas. Schattingen van de jaarvracht bij Maaseik variëren tussen 5000 m³/jaar voor een droog jaar tot 63 400 m³/jaar voor een nat jaar. Aangezien deze vrachten zijn gebaseerd op metingen in het verleden en de Maas sindsdien sterk is veranderd door menselijke ingrepen en klimaatverandering geven deze waarden geen betrouwbaar beeld van de huidige sedimentvrachten.



Aanbevolen wordt een gedetailleerde analyse uit te voeren naar het risico op nieuwe erosiekuilen, gebruik makend van de gegevens die zijn verzameld in deze studie. Het ligt voor de hand voor deze risicobeoordeling het tweedimensionale morfodynamische computermodel te gebruiken dat momenteel in ontwikkeling is. Daartoe zal eerst actuele informatie ingewonnen moeten worden over de diepteligging van de fijne zandlagen in de ondergrond. Verder wordt aanbevolen de internationale samenwerking rondom sediment in het Maasstroomgebied te intensiveren en te beginnen met een stroomgebiedsbrede inventarisatie van sedimentproblemen en sedimentdynamiek.

Abstract

In the summer of 2021, a low pressure system caused large amounts of precipitation in the Meuse basin. The discharge of the Meuse went up to a level that on average only occurs once every 120 years. The vast volumes of water discharged by the Meuse caused a lot of sediment to move. On the Common Meuse, the part of the river that forms the border between Flanders and the Netherlands, fine sand deposits in the substrate were exposed. Between Maasband and Berg/Meeswijk, numerous deep scour holes emerged in the riverbed, both in the Flemish and the Dutch part of the river, as a result of which damage was caused to ferry landings, pipelines, riverbank defences and embankments.

The Dutch and Flemish river managers want to prevent such major damage being caused in the event of future floods. To determine the risk of new scour holes being formed, knowledge needs to be acquired about (1) the grain size composition of the river sediment, (2) the force of the water flow during floods (the bed shear stress) and (3) the magnitude of the (annual) sediment loads on the Common Meuse. The aim of this study was to collect this information. The risk assessment itself was not a part of this study.

To determine the grain size composition of the Meuse sediments, samples were taken with an amphibious excavator at 162 locations along the riverbed of the Common Meuse between Borgharen and Maaseik, whereby a distinction was made between the surface layer and the subsurface layer. The grain size distribution of the samples was determined by sieve analysis. A set of 25 sieves, with mesh diameters ranging from 256 mm to 0.063 mm, was used for this. The grain size dataset shows that the riverbed of the Common Meuse primarily consists of gravel. The median grain size is 22 mm and the 90th percentile of the grain size distribution is 77 mm. The surface samples were generally somewhat coarser than the subsurface samples and the riverbed sediment becomes slightly finer downstream. There was a large, fairly random, grain size variation over short distances.

To determine the bed shear stresses that occur during floods, steady calculations were carried out with a two-dimensional numerical flow model for flow discharges of 250, 750, 1400, 2100 and 3200 m³/s. A non-steady simulation of the 2021 flood was also carried out. The calculations show that the bed shear stress for the lowest discharges ranges between 0 and 10 N/m² at most locations. If the discharge increases, the bed shear stress increases too, however not everywhere by the same amount. As a result a series of shear stress maxima is formed during floods, among other in the Maasband-Berg/Meeswijk scour-hole section. At locations where a significant part of the Meuse water is discharged via the winter bed during floods, the maximum bed shear stress, even at the highest discharges, does hardly exceed the critical value for incipient motion. The bed shear stress variations are expected to create strong gradients in sediment transport capacity, promoting erosion and sedimentation.

To determine the annual sediment loads, a literature study was carried out to obtain an overview of sediment transport measurements and calculations carried out in the past. Then a new estimate was made of the annual sediment loads on the basis of this information. The sediment loads on the Common Meuse were found to show a high interannual variability. When the flow discharge is low, the gravel layer is immobile and very little sediment is available for transport. During floods, the



gravel layer is mobile and the underlying finer sediments also start to move. The annual loads increase downstream, which is consistent with the long-term riverbed erosion on the Common Meuse. Estimates of the annual load at Maaseik vary between 5000 m³/year for a dry year, to 63400 m³/year for a wet year. Because these loads are based on measurements in the past and the Maas has changed considerably since then due to human interventions and climate change, these values do not give a reliable picture of the current sediment loads.

It is recommended that a detailed risk assessment is done to assess the risk of new scour holes being formed, making use of the information that was collected in this study. The two-dimensional morphodynamic computer model that is currently being developed for Rijkswaterstaat can be used for the risk assessment. To this end, first of all up-to-date information will need to be obtained about the depth level of the fine sand layers in the substrate. Furthermore, it is recommended to intensify the international collaboration with respect to sediment in the Meuse basin, and to start with a basin-wide survey of sediment problems and sediment dynamics.

Zusammenfassung

Im Sommer 2021 verursachte ein Tiefdruckgebiet enorme Niederschlagsmengen im Einzugsgebiet der Maas. Der Abfluss der Maas stieg auf ein Niveau, das im Durchschnitt nur einmal in 120 Jahren auftritt. Die abfließenden Wassermassen setzen hierbei eine hohe Menge an Sedimente in Bewegung. An der gemeinschaftlichen Maas, dem Abschnitt des Flusses, der die Grenze zwischen Flandern und den Niederlanden bildet, wurden die im Untergrund befindlichen Feinsandablagerungen freigespült. Zwischen Maasband und Berg/Meeswijk entstanden sowohl auf flämischer als auch auf niederländischer Seite des Flusses zahlreiche tiefe Auskolkungen im Flussbett, wodurch Schäden an Fähranlegern, Pipelines, Uferbefestigungen und Hochwasserschutzanlagen verursacht wurden.

Die niederländischen und flämischen Flussmanager wollen verhindern, dass bei künftigen Hochwassern erneut großen Schäden auftreten. Um das Risiko des Ausbildens solcher Auskolkungen abschätzen zu können, sind Kenntnisse über (1) die Korngrößenzusammensetzung des Sediments der Flusssohle, (2) die bei Hochwässern auftretende Strömungskräfte (Sohlschubspannungen) und (3) die Größe der Sedimentfracht der gemeinschaftlichen Maas erforderlich. Das Ziel dieser Studie war es, diese Informationsgrundlage zu schaffen. Die Risikobewertung selbst war nicht Teil dieser Studie.

Um die Korngrößenzusammensetzung des Sediments der Maas zu bestimmen, wurde das Flussbett der gemeinschaftlichen Maas zwischen Borgharen und Maaseik an 162 Stellen mit einem amphibischen Hydraulikbagger beprobt, schichtweise für Oberschicht und Unterschicht. Die Korngrößenverteilung der Proben wurde anschließend durch eine Siebanalyse bestimmt. Dazu wurde ein Satz von 25 Sieben mit Maschenweiten von 256 bis 0,063 mm verwendet. Der Datensatz zur Korngröße zeigt, dass der Boden der gemeinschaftlichen Maas hauptsächlich aus Kies besteht. Der mediane Korndurchmesser beträgt 22 mm und das neunzigste Perzentil der Korngrößenverteilung 77 mm. Im Allgemeinen ist die Oberschicht etwas feiner als die Unterschicht. Das Sohlsediment wird in Fließrichtung kaum merkbar feiner. Es gibt große lokale Korngrößenvariationen.

Um die bei Hochwasser auftretenden Sohlschubspannungen zu ermitteln, wurden stationäre Berechnungen mit einem numerischen zweidimensionalen Strömungsmodell bei Abflüssen von 250, 750, 1400, 2100 und 3200 m³/s durchgeführt. Zusätzlich wurde eine instationäre Simulation des Hochwassers 2021 durchgeführt. Die Berechnungen zeigen, dass die Sohlschubspannung beim niedrigsten Abfluss fast überall zwischen 0 und 10 N/m² liegt. Mit steigendem Abfluss nimmt die Sohlschubspannung grundsätzlich zu, jedoch nicht überall gleichmäßig, sodass bei Hochwasser Schubspannungsmaxima entstehen, unter anderem im Abschnitt der Flussstrecke Maasband-Berg/Meeswijk in der die Auskolkungen auftraten. Wo bei Hochwasser ein erheblicher Teil des



Maaswassers über das Winterbett abgeführt wird, übersteigt die maximale Sohlschubspannung im Hauptfluss selbst bei den höchsten Abflüssen den kritischen Wert für Bewegungsbeginn nicht oder kaum. Es wird erwartet, dass der unregelmäßige Verlauf der Sohlschubspannung zu starken Erosion und Sedimentation fördernden Gradienten in der Sedimenttransportkapazität führt.

Zur Ermittlung der Sedimentfracht wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, um einen Überblick über die in der Vergangenheit durchgeführten Feldmessungen und Berechnungen des Sedimenttransports zu erhalten. Auf der Grundlage dieser Informationen wurde dann eine neue Schätzung der Sedimentjahresfracht vorgenommen. Aus der Analyse geht hervor, dass die Sedimentfracht in der gemeinschaftlichen Maas von Jahr zu Jahr starken Schwankungen unterliegt. Bei niedrigen Abflüssen ist die Kiesschicht unbeweglich und steht nur wenig Sediment für den Transport zur Verfügung. Bei Hochwasser wird die Kiesschicht aufgebrochen und werden die darunter liegenden feineren Sedimente mobilisiert. Die Jahresfrachten nehmen in Fließrichtung zu, was mit der langfristigen Sohlerosion an der gemeinschaftlichen Maas übereinstimmt. Die Schätzungen der Jahresfracht in Maaseik liegen zwischen 5000 m³/Jahr für ein abflussarmes Jahr und 63.400 m³/Jahr für ein abflussreiches Jahr. Da diese Frachten auf in der Vergangenheit durchgeführten Messungen beruhen und sich die Maas seither aufgrund menschlicher Eingriffe und des Klimawandels erheblich verändert hat, können diese Werte keinesfalls als zuverlässige Darstellung der aktuellen Sedimentfrachten betrachtet werden.

Es wird empfohlen, anhand der in dieser Studie gesammelten Daten eine detaillierte Analyse des Risikos der Bildung neuer Auskolkungen vorzunehmen. Für diese Risikobewertung bietet sich die Verwendung des zweidimensionalen morphodynamischen Computermodells an, welches derzeit für Rijkswaterstaat entwickelt wird. Dazu ist es zunächst erforderlich, aktuelle Informationen über die Tiefe der Feinsandschichten im Untergrund zu erhalten. Außerdem wird empfohlen, die internationale Zusammenarbeit im Bereich der Sedimente im Einzugsgebiet der Maas zu intensivieren und mit einer flussgebietsweiten Bestandsaufnahme der sedimentbezogene Probleme und Sedimentdynamik zu beginnen.

Resumé

Au cours de l'été 2021, une dépression a provoqué d'énormes précipitations dans le bassin de la Meuse. Le débit de la Meuse a atteint un niveau qui ne surviennent en moyenne qu'une fois tous les 250 ans. La masse d'eau évacuée par la Meuse a remué de grandes quantités de sédiments. Dans la Meuse mitoyenne, la partie du fleuve qui marque la frontière entre la Flandre et les Pays-Bas, des dépôts de sable fin dans le sol ont été découverts. Entre Maasband et Berg/Meeswijk, de nombreuses fosses d'érosion profondes ont émergé dans le lit du fleuve, tant dans la partie flamande que dans la partie néerlandaise, entraînant des dommages aux débarcadères, aux canalisations, aux protections des berges et aux digues.

Les gestionnaires de rivières néerlandais et flamands veulent éviter que ces dommages importants ne se reproduisent lors de futures crues. Pour évaluer le risque de formation de nouvelles fosses d'érosion, il est nécessaire de connaître (1) la composition granulométrique des sédiments fluviaux, (2) la force du courant pendant les crues (la contrainte de cisaillement du fond) et (3) l'ampleur des charges sédimentaires sur la Meuse mitoyenne. L'objectif de cette étude était de recueillir ces informations. L'évaluation des risques elle-même ne faisait pas partie de cette étude.

Pour déterminer la composition granulométrique des sédiments de la Meuse, le lit de la Meuse mitoyenne entre Borgharen et Maaseik a été échantillonné à 162 endroits à l'aide d'une pelle amphibie, en distinguant la couche supérieure de la couche inférieure. La distribution granulométrique



des échantillons a ensuite été déterminée par analyse granulométrique en utilisant un ensemble de 25 tamis avec des mailles allant de 256 à 0,063 mm. Les données granulométriques montrent que le fond de la Meuse mitoyenne est principalement constitué de graviers. La taille médiane des grains est de 22 mm et le 90e centile de la distribution granulométrique est de 77 mm. Les échantillons de la couche supérieure sont généralement légèrement plus grossiers que les échantillons de la couche inférieure, et les sédiments du fond deviennent à peine plus fins dans le sens du courant. Il existe une variation importante, plutôt aléatoire, de la taille des grains sur de courtes distances.

Pour déterminer les contraintes de cisaillement du fond pendant les crues, des calculs stationnaires ont été effectués à l'aide d'un modèle numérique d'écoulement bidimensionnel pour des débits de 250, 750, 1400, 2100 et 3200 m³/s. Une simulation non stationnaire de la crue de 2021 a également été réalisée. Les calculs montrent que la contrainte de cisaillement du fond au débit le plus faible est comprise entre 0 et 10 N/m² presque partout. À mesure que le débit augmente, la contrainte de cisaillement du fond augmente, mais pas uniformément partout. Lors des crues, des pics de contrainte de cisaillement se produisent à Borgharen, Uikhoven, Kotem et sur le tronçon des fosses d'érosion Maasband-Berg/Meeswijk. Déjà à un débit de 750 m³/s, la contrainte de cisaillement du fond calculée dépasse la contrainte de cisaillement critique pour le début du mouvement. Les variations des contraintes de cisaillement du lit devraient créer de forts gradients dans la capacité de transport des sédiments, favorisant l'érosion et la sédimentation.

Pour déterminer les charges sédimentaires, une étude bibliographique a été réalisée afin d'obtenir une vue d'ensemble des mesures et des calculs de transport de sédiments effectués dans le passé. Une nouvelle estimation des charges sédimentaires a ensuite été réalisée sur la base de ces informations. L'analyse montre que les charges sédimentaires sur la Meuse mitoyenne varient fortement d'une année à l'autre. Lorsque les débits sont faibles, la couche de graviers est immobile et peu de sédiments sont disponibles pour le transport. Lors de fortes crues, la couche de graviers est dispersée et les sédiments plus fins sous-jacents sont également déplacés. Les charges annuelles augmentent dans le sens du courant, ce qui est cohérent avec l'érosion à long terme du lit de la Meuse mitoyenne. Les estimations des charges annuelles à Maaseik varient entre 5000 m³/an pour une année sèche et 63 400 m³/an pour une année humide. Étant donné que ces charges sont basées sur des mesures passées et que la Meuse a depuis subi des changements importants dus à des interventions humaines et au changement climatique, ces valeurs ne fournissent pas une image fiable des charges sédimentaires actuelles.

Une analyse détaillée du risque de nouvelles fosses d'érosion est recommandée, en utilisant les données recueillies dans cette étude. Le choix évident pour cette évaluation du risque est d'utiliser le modèle informatique morphodynamique bidimensionnel actuellement en développement. Pour ce faire, il sera tout d'abord nécessaire d'obtenir des informations actualisées sur la profondeur des couches de sable fin dans le sol. En outre, il est recommandé d'intensifier la coopération internationale sur les sédiments dans le bassin de la Meuse et de commencer par un recensement des mouvements de sédiments et de sols à l'échelle du bassin.



Inhoud

VOORWOORD	1
SAMENVATTING	2
ABSTRACT	3
ZUSAMMENFASSUNG	4
RESUMÉ.....	5
1. INLEIDING	8
2. DE SAMENSTELLING VAN HET RIVIERSEDIMENT	10
TEN GELEIDE	10
METHODE	10
RESULTATEN EN INTERPRETATIE.....	13
3. DE KRACHT VAN DE WATERSTROMING	14
TEN GELEIDE	14
METHODE	14
RESULTATEN EN INTERPRETATIE.....	14
4. DE OMVANG VAN HET SEDIMENTTRANSPORT	17
TEN GELEIDE	17
METHODE	17
RESULTATEN EN INTERPRETATIE.....	17
5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	21
LITERATUUR.....	22
BIJLAGEN	24



1. Inleiding

Na vier droge zomers met ernstige watertekorten was de zomer van 2021 uitzonderlijk nat. In juli kwam een lagedrukgebied tot stilstand boven de Ardennen, het Zuid-Limburgse heuvelland en de aangrenzende Duitse middelgebergten. In het Maasstroomgebied werden op een tijdsduur van slechts 48 uur neerslaghoeveelheden gemeten van tot wel 250 mm, hoeveelheden die statistisch slechts zeer zelden voorkomen. De stuwmuren en de regenbuffers konden deze hoeveelheden niet verwerken en de beken en riviertjes in het Maasstroomgebied zwollen tot ongekende hoogtes. In vele dorpen en steden vonden overstromingen plaats. In Wallonië voltrok zich een ramp, met tientallen dodelijke slachtoffers en grote economische schade. In Nederlands Limburg traden de rivieren Geul en Roer en vele beken buiten de oevers en veroorzaakten enorme overlast en schade, onder andere in Valkenburg.

Ook de Maas steeg. Terwijl op maandagochtend 12 juli nog een afvoer van 103 m³/s gemeten werd bij Sint Pieter, bedroeg de afvoer woensdagmiddag reeds 1008 m³/s. Een dag later werd voor de derde maal in de 110-jarige Nederlandse meetreeks het afvoerniveau van 3000 m³/s overschreden. De afvoerpiek van 3310 m³/s werd bereikt op donderdagavond 15 juli. Deze afvoer, de hoogste ooit gemeten, komt gemiddeld slechts eens in de 120 jaar voor (Task Force Fact Finding, 2021).

De enorme watermassa die door de Maas afgevoerd werd, bracht grote hoeveelheden sediment in beweging. Met name op de Gemeenschappelijke Maas, het deel van de rivier dat de grens vormt tussen Vlaanderen en Nederland, is veel erosie opgetreden (Flierman en Frings, 2023). Op sommige delen van de Gemeenschappelijke Maas bestaat de rivierbodem uit fijnkorrelige zandafzettingen bedekt met een dunne laag grind. Tijdens het hoogwater zijn deze zandafzettingen bloot gespoeld. Daardoor ontstonden er talrijke diepe erosiekuilen in de rivierbedding, zowel in het Vlaamse als het Nederlandse deel van de rivier (Beemster et al., 2023). De kuilen hadden een gemiddelde diepte van 6,5 m en lagen alle op een traject van 4,5 kilometer tussen Maasband en Berg/Meeswijk (RKM 34,6-39,1). Drie van de kuilen hadden een relatieve diepte van méér dan 10 m, waarbij de kuil bij het veer van Berg-Meeswijk (RKM 38,9) de kroon spande met een relatieve diepte van 19,9 m. De diameter van de kuilen varieerde van 25 tot 82 m en de meeste kuilen waren langgerekt. Het is niet voor het eerst dat op dit traject erosiekuilen ontstonden, maar het aantal en de omvang van de kuilen is wel nieuw.

De kuilen veroorzaakten aanzienlijke schade: veerstoepen zijn ingestort, pijpleidingen zijn bloot gespoeld en beschadigd, de stabiliteit van de oeververdedigingen en waterkeringen dijken kwam in gevaar en vaargeulen zijn dicht gespoeld met het vrijgekomen sediment (Flierman en Frings, 2023). In de maanden na het hoogwater zijn spoedreparaties uitgevoerd. Daarbij is een aantal kuilen opgevuld met riviereigen sediment.

Rijkswaterstaat en De Vlaamse Waterweg nv, de Nederlandse en Vlaamse rivierbeheerders, wensen vast te stellen hoe groot de kans is dat er bij toekomstige hoogwaters opnieuw op grote schaal erosiekuilen met bijbehorende schades ontstaan, om zo nodig preventieve maatregelen te kunnen treffen. Voor deze risicobeoordeling is fundamentele informatie nodig over (1) de samenstelling van het riviersediment, (2) de kracht van de waterstroming (ofwel de bodemschuifspanning) en (3) de omvang van de sedimenttransporten op de Gemeenschappelijke Maas. Het doel van de voor u liggende studie, een onderdeel van het Interreg-project EMfloodResilience, was het verzamelen van deze informatie. De risicobeoordeling zelf vormde geen onderdeel van Interreg EMfloodResilience. Daarvoor was de projectlooptijd te kort.

In de volgende drie hoofdstukken wordt achtereenvolgens ingegaan op de bemonstering van het riviersediment (Hoofdstuk 2), de berekening van de schuifspanningen en de sedimentmobiliteit (Hoofdstuk 3) en het onderzoek naar de omvang van de sedimenttransporten (Hoofdstuk 4). Daarbij



komen steeds zowel de gevolgde methode (literatuur, dataverzameling, analyse) als de belangrijkste resultaten aan bod. Afgesloten wordt met een overzicht van de belangrijkste conclusies. Ook worden een aantal aanbevelingen gedaan voor de verdere stappen die doorlopen moeten worden om te komen tot een gefundeerde beoordeling van het risico op nieuwe erosiekuilen langs de Gemeenschappelijke Maas (Hoofdstuk 5).

2. De samenstelling van het riviersediment

Ten geleide

Een inschatting van de stabiliteit van de rivierbodem van de Gemeenschappelijke Maas vereist gedegen informatie over de korrelgroottesamenstelling van het bodemsediment. De grootte van de sedimentkorrels bepaalt namelijk in sterke mate de mobiliteit van het sediment: hoe kleiner de korrels, hoe makkelijker ze in beweging komen onder invloed van de waterstroming.

Methode

Het bepalen van de korrelgroottesamenstelling van de Gemeenschappelijke Maas is niet eenvoudig. Meetgegevens uit het recente verleden zijn niet beschikbaar en nieuwe metingen zijn gecompliceerd om twee redenen. Ten eerste is een belangrijk deel van de Gemeenschappelijke Maas (met name het traject Borgharen-Maaseik, ofwel RKM 15-52,4) niet bevaarbaar, waardoor de bemonsteringslocaties moeilijk bereikbaar zijn. Ten tweede is het sediment op dit riviertraject zeer grof, waardoor gebruikelijke monsternametoestellen (zoals Van Veen- en Hamonhappers) niet toepasbaar zijn en waardoor zeer grote monstervolumes nodig zijn om representatieve monsters te verkrijgen.

Vanwege het belang van gedegen korrelgrootte-informatie is toch gekozen voor een bemonstering (BK Ingenieurs, 2023), waarbij een maatwerk aanpak gehanteerd is. Allereerst zijn de bemonsteringslocaties geselecteerd, 164 in totaal. Ongeveer de twee derde van de bemonsteringslocaties lag op een regelmatig grid in de hoofdgeul (zie Fig. 1). De rest lag verspreid over de hoofdgeul, banken, plassen, stroomgeulverbredingen en weerden. Alle meetlocaties lagen op het niet bevaarbare traject Borgharen-Maaseik, deels in Nederland en deels in Vlaanderen.

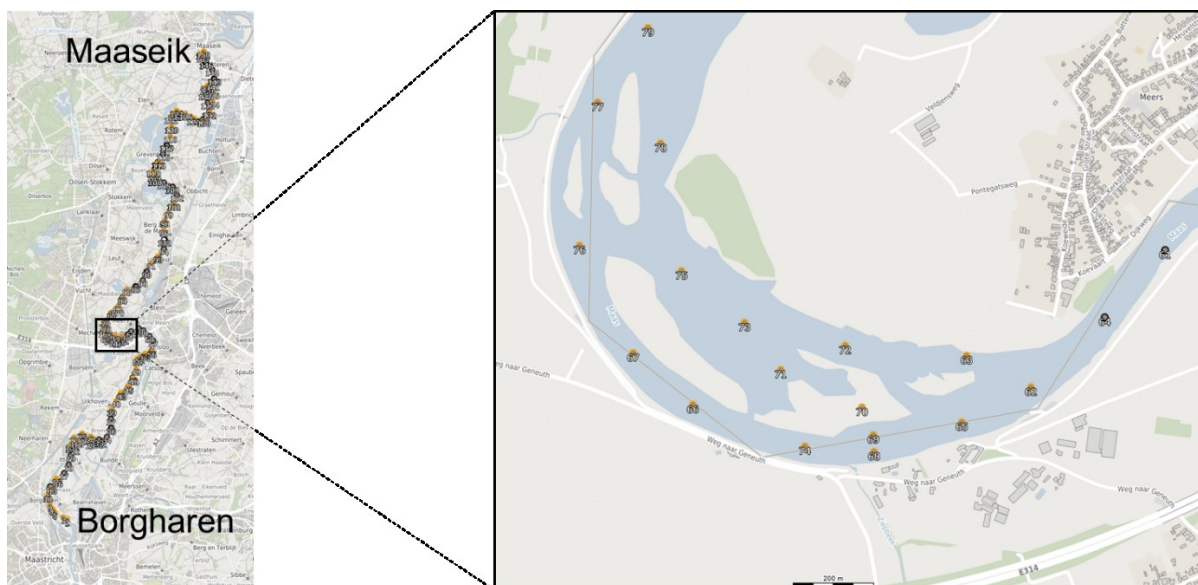
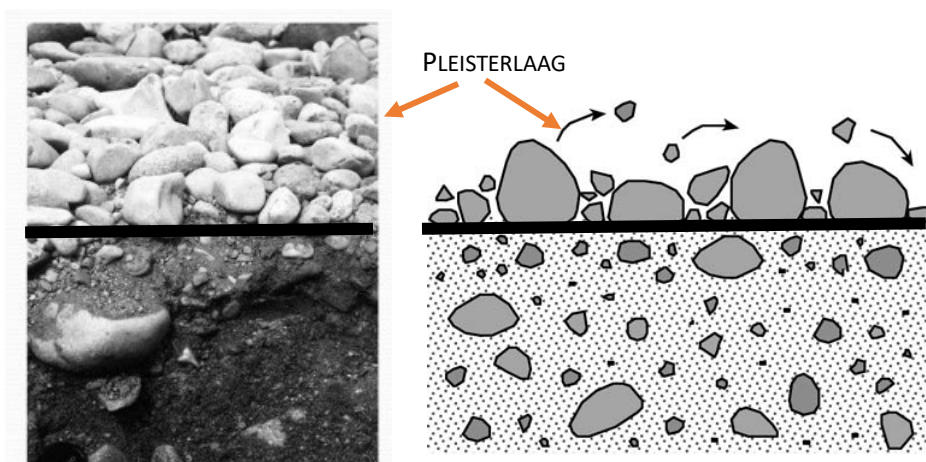


Fig. 1. Ligging van de bemonsteringslocaties in de omgeving van Meers (BK Ingenieurs, 2023).

Omdat de rivierbodem van de Maas in het studiegebied gelaagd is, zijn op elke locatie twee monsters genomen. Het eerste monster betrof de bovenste 12 cm van de rivierbedding (de zogenaamde pleisterlaag, zie Fig. 2). Het tweede monster betrof de daaronder liggende bodemlaag van 12 tot 50

cm onder de rivierbedding, die doorgaans iets fijner is. Op twee locaties konden geen monsters genomen worden door de aanwezigheid van stortsteen. Het totaal aantal gerealiseerde bemonsteringslocaties bedroeg daarom 162. Zeven monsters zijn in duplo genomen, hetgeen het totaal aantal monsters op 331 brengt.



Figuur 2: Pleisterlaag (links: naar Wilcock, 2005; rechts: naar Pitlick et al., 2009)

De monsters zijn ontgraven met behulp van een amfibische kraan met bak (Fig. 3) in de periode van eind juli t/m half oktober 2023. Tijdens de bemonstering is de daadwerkelijke horizontale (x-y) positie van een monsterlocatie geregistreerd met behulp van GPS, waarbij als richtlijn gold dat de daadwerkelijke positie maximaal 2 meter mocht afwijken van de beoogde locatie. De verticale tolerantie tijdens monsternamen bedroeg 2 cm (standaarddeviatie) voor de grens toplaag-onderlaag en 5 cm voor de basis van de onderlaag. De monsteromvang varieerde tussen 216 en 1079 kg nat gewicht, afhankelijk van de grofheid van het sediment. Als criterium gold dat de massa van grootste steen in het sedimentmonster niet meer dan 2 procent van de droge massa van het gehele monster mocht bedragen, om te voorkomen dat individuele grote stenen een stempel drukken op het resultaat van de korrelgroottebepaling.



Fig. 3. Bemonstering van de Maas met de amfibische kraan (BK Ingenieurs, 2023).

Van de veldwerkzaamheden is een fotoreportage gemaakt waarin de diverse werkzaamheden zijn vastgelegd. Ook is een logboek bijgehouden waarin de omstandigheden tijdens bemonstering, het gebruikte materieel en verdere bijzonderheden zijn opgetekend. Na monsternamen zijn de monsters in plastic bigboxen (1,2 x 1,0 x 0,8 m), voorzien van een unieke codering, vervoerd naar een verwerkingslocatie gelegen in Echt.



Fig. 4. Zeefinstallatie op de verwerkingslocatie in Echt (BK Ingenieurs, 2023).

Op de verwerkingslocatie in Echt zijn alle boxen ontdaan van overtollig water en gewogen. Vervolgens is het gehele monster gezeefd over een voor dit project samengestelde industriële zeefinstallatie (Fig. 4), voorzien van vijf zeven met vierkante openingen met de volgende maaswijdtes: 256 mm, 181 mm, 128 mm, 90 mm en 64 mm. Iedere deelfractie is gewogen en gefotografeerd. Van de grootste steen uit het sedimentmonster zijn de massa en de diameter van de middelste korrelas bepaald. Van het residu (de fractie < 64 mm) is een representatief deelmonster van 10 liter samengesteld en naar het sedimentologisch laboratorium van Geolab Wiertsema B.V. in Tolbert gebracht. In het laboratorium is het deelmonster volledig in behandeling genomen. Eerst is het deelmonster gedroogd totdat de massa constant was, waarna een kwalitatieve beschrijving van het monster is vervat. Daarbij is gelet op de aanwezigheid van schelpen, organisch materiaal en sedimentvreemde objecten. Ook zijn het kleigehalte, de mate van afronding en de oorsprong van het sediment (natuurlijk/gestort) vastgesteld. Vervolgens is het monster ontdaan van schelpen, organische bestanddelen (zoals takjes) en antropogene bestanddelen (zoals metaal, plastic en rubber). Het schone, droge monster is vervolgens gezeefd over een zeeftoeren met vierkante zeven met maaswijdtes van 45 mm, 32 mm, 22.4 mm, 16.0 mm, 11.2 mm, 8.0 mm, 5.6 mm, 4.0 mm, 2.8 mm en 2.0 mm. Van het residu (de fractie < 2.0 mm) is een deelmonster genomen, dat vervolgens gezeefd is over zeven met vierkante openingen met maaswijdtes van 1.4 mm, 1.0 mm, 0.71 mm, 0.5 mm, 0.355 mm, 0.25 mm, 0.18 mm, 0.125 mm, 0.09 mm, 0.063 mm. Het residu (< 0.063 mm) is behandeld als een afzonderlijke sedimentfractie. Voor elk van de sedimentfracties is de massa bepaald. Tijdens de korrelgroottebepalingen, zowel in het veld als

in het lab, is een logboek bijgehouden. Van de werkzaamheden rondom de korrelgroottebepaling is een fotoreportage gemaakt waarin de diverse onderdelen zijn vastgelegd.

Tot slot zijn alle zeefresultaten gecombineerd en is daaruit de korrelgrootteverdeling van het oorspronkelijke monster gereconstrueerd. Op basis daarvan zijn de volgende korrelgroottekenmerken bepaald: de percentielen D5, D10, D35, D50, D65, D90 en D95, het gehalte aan slib, zand, grind en stenen; en de geometrische korrelgrootte van de zandfractie, grindfractie en het gehele monster.

De sedimentbemonstering op de Gemeenschappelijke Maas is uitgevoerd door BK Ingenieurs in opdracht van Rijkswaterstaat.

Resultaten en interpretatie

De korrelgroottedataset (voor een extract zie Bijlage B) laat zien dat het Maassediment gemiddeld <1% slib, 18% zand, 65% grind en 16% stenen bevat. De bodem van de Gemeenschappelijke Maas bestaat dus voornamelijk uit grind. De D50 bedraagt gemiddeld 22 mm en de D90 77 mm (Fig. 5). Er is sprake van een grote variatie in korrelgrootte, waarbij opvalt, dat de D50 over het algemeen tussen de 8 en 64 mm ligt, terwijl een klein aantal monsters beduidend fijner is met D50-waarden in het zandbereik (< 2 mm). Dit betreft vooral monsters in plassen en op den droge. De top laagmonsters zijn over het algemeen iets grover dan de onderlaagmonsters, maar de verschillen zijn beperkt. Er is sprake van een lichte, nauwelijks waarneembare, korrelgrootteafname in stroomrichting (downstream fining). Geconcludeerd wordt, dat het korrelgroottepatroon op de Gemeenschappelijke Maas vrij chaotisch is.

Voor een uitgebreide beschrijving van de sedimentbemonstering wordt verwezen naar BK Ingenieurs (2023).

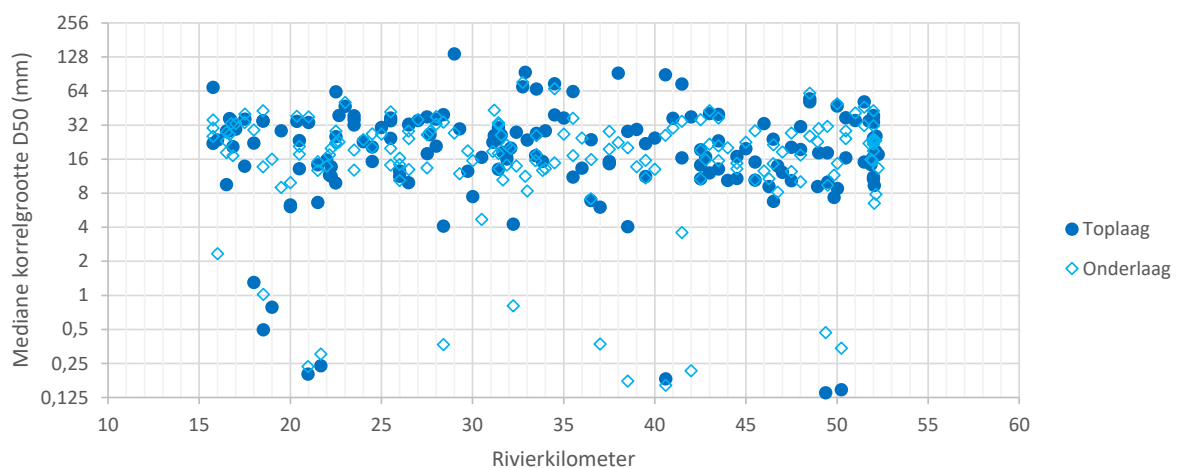


Fig. 5. Mediane korrelgrootte van het sediment op de Gemeenschappelijke Maas.

3. De kracht van de waterstroming

Ten geleide

Een inschatting van de stabiliteit van de rivierbodem van de Gemeenschappelijke Maas vereist naast korrelgrootteinformatie ook kennis van de schuifkracht die de waterstroming op de bodem uitoefent. Deze kracht wordt meestal uitgedrukt per vierkante meter bodemoppervlak en schuifspanning (eenheid N/m²) genoemd.

Methode

De bodemschuifspanningen in de Gemeenschappelijke Maas zijn in het kader van dit Interregproject berekend door Van der Deijl en Ottevanger (2023) met het tweedimensionale stromingsmodel DFlowFM voor de volgende stationaire afvoercondities: 250, 750, 1400, 2100 en 3200 m³/s bij Borgharen dorp. Daarnaast is een niet-stationaire simulatie gedaan van de hele afvoergolf van juli 2023. Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van de D-HYDRO Suite 2023.01 en modelschematisatie dflowfm2d-maas-j21_6-v1a. Deze schematisatie is specifiek afgeleid om de condities tijdens het zomerhoogwater van 2021 optimaal af te beelden (Van der Deijl, 2023).

De bodemschuifspanning (variabele *mesh2d_taus*) is met behulp van de applicatie *dfm_tools* uit D-HYDRO geëxporteerd naar *shape*bestanden voor locaties met waterdiepte groter dan 1 cm. Bij de stationaire simulaties is de waarde van *mesh2d_taus* in de laatste tijdstap geëxporteerd. Bij de niet-stationaire simulatie is de maximale waarde van *mesh2d_taus* die is opgetreden tijdens de golf geëxporteerd (Van der Deijl en Ottevanger, 2023).

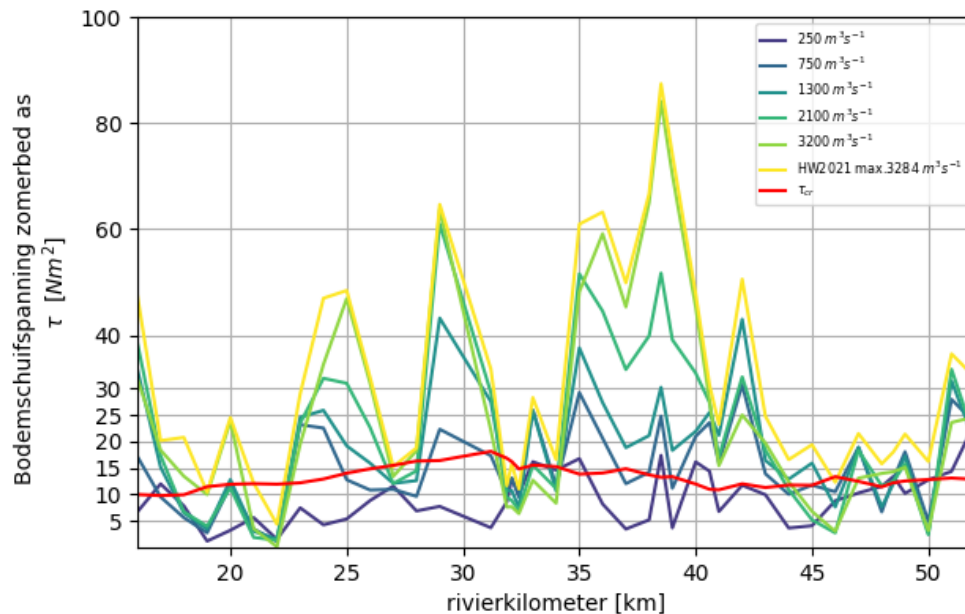
De aldus berekende bodemschuifspanningen zijn vergeleken met de kritieke bodemschuifspanning voor begin van beweging, om te bepalen of het bodemsediment mobiel is bij de heersende bodemschuifspanning. De kritieke bodemschuifspanning is in drie stappen bepaald. Eerst zijn de korrelgrootteverdelingen van de toplaag van de rivierbodem (Hoofdstuk 2) langs vijf zones (links van, rondom en rechts van de rivieras, winterbed links en rechts) geïnterpoleerd langs trajecten van 10 km. Vervolgens is daaruit de geometrisch gemiddelde korreldiameter afgeleid (Bijlage C1). Op basis van deze korreldiameter is tot slot de kritieke bodemschuifspanning berekend met $\tau_{cr} = \theta_{cr}(\rho_s - \rho)gD$, waarin τ_{cr} = kritieke bodemschuifspanning [N/m²], θ_{cr} = kritieke Shieldswaarde aldus Van Rijn (1984), ρ_s = dichtheid van sediment [kg m⁻³], ρ = dichtheid van water [kg m⁻³], g = zwaartekrachtversnelling [m s⁻²] en D = sedimentdiameter [m] (Van der Deijl en Ottevanger, 2023).

Resultaten en interpretatie

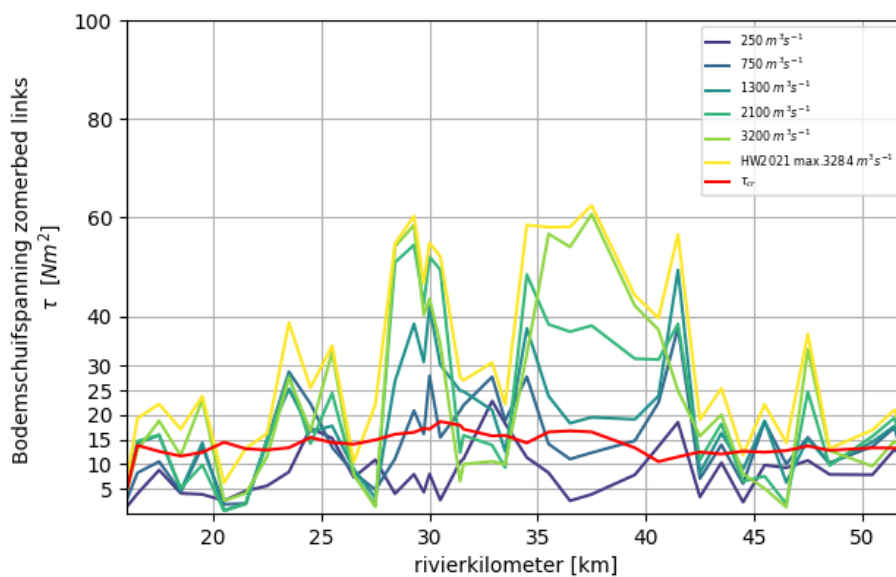
Voor een stationaire afvoer van 250 m³/s bij Borgharen ligt de bodemschuifspanning voor het grootste deel van de Gemeenschappelijke Maas tussen 0 en 10 N/m² (Fig. 6-8, bijlage A1-A6). Op enkele smallere delen en in bochten van de gemeenschappelijke Maas zijn hogere schuifspanningen aanwezig in de orde van 20 tot 30 N/m². Bij toenemende afvoer neemt de bodemschuifspanning op de meeste plaatsen toe, echter lang niet overal even sterk. Bij hoogwater is daardoor een patroon aanwezig van hoge schuifspanningen (30-60 N/m²) bij Borgharen (RKM 16), Uikhoven (RKM 23-26), Kotem (RKM 28-31) en bij Obbicht (RKM 42), met daar tussenin duidelijk lagere schuifspanningen (Fig. 6-8, bijlage A1-A6). Ook het erosiekuilentract Maasband-Berg/Meeswijk (RKM 34-40) wordt gekenmerkt door hoge schuifspanningen (30-90 N/m²). Verwacht mag worden dat het grillig verloop van de

bodemschuifspanning zorgt voor sterke gradiënten in sedimenttransportcapaciteit, die erosie en sedimentatie in de hand werken.

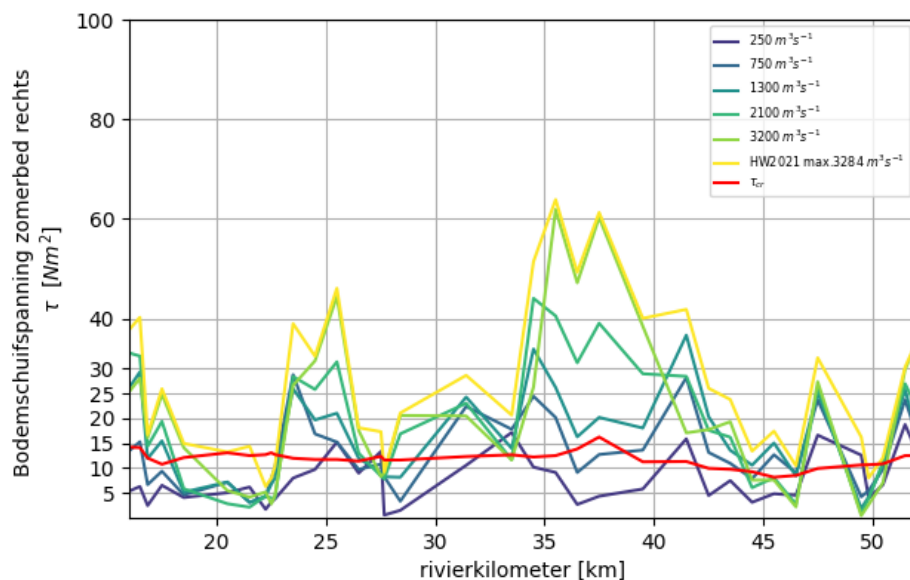
Over de gehele Gemeenschappelijke Maas is zichtbaar dat de maximale schuifspanning tijdens het hoogwater van juli 2021 hoger is dan voor een stationaire afvoer van $3200 \text{ m}^3/\text{s}$. Wel komen de locaties met hoge schuifspanningen overeen. Beduidende verschillen tussen de bodemschuifspanning links en rechts van de rivieras zijn te zien bij Borgharen (RKM 16), Obbicht (RKM 42) en Maaseik (RKM 52).



Figuur 6 Bodemschuifspanningen rondom de rivieras langs de Gemeenschappelijke Maas (Van der Deijl en Ottevanger, 2023)



Figuur 7 Bodemschuifspanningen links van de rivieras langs de Gemeenschappelijke Maas (Van der Deijl en Ottevanger, 2023)



Figuur 8 Bodemschuifspanningen rechts van de rivieras langs de Gemeenschappelijke Maas (Van der Deijl en Ottevanger, 2023)

Bij vergelijking van de bodemschuifspanning in het zomerbed met de kritieke bodemschuifspanning (Fig. 6-8, bijlage A7-A13) valt op dat al bij een afvoer tussen $250 \text{ m}^3/\text{s}$ en $750 \text{ m}^3/\text{s}$ het bodemmateriaal op veel plaatsen mobiel wordt. Tegelijkertijd zijn er enkele riviertrajecten waarbij de maximale bodemschuifspanning niet of nauwelijks boven de kritieke waarde voor begin van beweging uitkomt, ook niet bij de hoogste afvoeren. Dit betreft locaties waarbij een significant deel van het Maaswater bij hogere afvoeren via het winterbed wordt afgevoerd, zoals bij Itteren (RKM 22), Geulle aan de Maas (RKM 27), Meers (RKM 33) en Koeweide (RKM 46). Benadrukt wordt dat de berekende waarden voor de kritieke schuifspanning een benadering van de werkelijkheid zijn, waarbij geen rekening is gehouden met het verschil in mobiliteit tussen de fijne en grove fracties uit de bedding en afpleisteringseffecten onvoldoende zijn verdisconteerd. Bovendien was het aantal sedimentbemonsteringslocaties onvoldoende om de ruimtelijk variatie in korrelgrootte (en daarmee kritieke schuifspanning) afdoende te kwantificeren.

Voor een uitgebreide beschrijving van het schuifspanningsonderzoek wordt verwezen naar Van der Deijl en Ottevanger (2023).

4. De omvang van het sedimenttransport

Ten geleide

Met rekenkundige simulatiemodellen kan heel gedetailleerd beoordeeld worden hoe groot het risico is op de vorming van erosiekuilen. Toepassing van zulke modellen vereist kennis van de sedimentvrachten op de Gemeenschappelijke Maas. In de huidige praktijk wordt gebruik gemaakt van schattingen van sedimentvrachten die zijn gebaseerd op metingen van tientallen jaren geleden. Het is onduidelijk in hoeverre deze schattingen vandaag de dag nog toepasbaar zijn, vooral ook omdat de rivier door menselijke ingrepen en klimaatverandering sterk is veranderd.

Methode

In het kader van dit Interregproject heeft Rijkswaterstaat Deltares gevraagd een inventarisatie te maken van de onderzoeken naar sedimenttransport op de Maas in de afgelopen 50 jaar en vervolgens te beoordelen in hoeverre de daaruit in de jaren '90 afgeleide jaarvrachten vandaag de dag nog geldig zijn. Als onderzoeksgebied gold de gehele Nederlandse Maas, maar de focus lag op de Gemeenschappelijke Maas. Deltares heeft bij zijn literatuuronderzoek zowel gekeken naar jaarvrachten gebaseerd op veldmetingen als naar jaarvrachten gebaseerd op modelberekeningen (Ottevanger en Chavarrias, 2023).

Omdat er sinds de laatste studies van de jaarvrachten in de jaren '90 nog nieuwe sedimenttransportmetingen zijn uitgevoerd op de Gemeenschappelijke Maas en er meer inzicht is ontstaan in de systematische fouten van eerdere metingen, loont het om nieuwe jaarvrachten af te leiden voor de Gemeenschappelijke Maas. Dit is gebeurd voor twee locaties Borgharen (RKM 16) en Maaseik (RKM 52,4-54,0). Eerst zijn alle beschikbare meetgegevens samengebracht, zo nodig gecorrigeerd, en geplot tegen de afvoer. Vervolgens zijn mathematische functies gefit door de puntenwolk om de relatie tussen transport en afvoer te beschrijven. Er is gebruik gemaakt van drie soorten functies: twee lineaire functies ($S=aQ$ en $S=aQ+b$) en een machtsfunctie ($S=aQ^b$). Hierbij staat S voor sedimenttransport en Q voor de afvoer bij Borgharen. Met behulp van de transportafvoerrelaties is de afvoerreeks voor Borgharen met dagelijkse afvoeren tussen 1911 en 2022 omgezet naar dagelijkse sedimenttransporten. Vervolgens zijn daaruit de jaarvrachten bij Borgharen en Maaseik voor de periode 1911-2022 bepaald. Voor een uitgebreide beschrijving van de toegepaste methodiek wordt verwezen naar Ottevanger en Chavarrias (2023).

Resultaten en interpretatie

Veldmetingen van het sedimenttransport

Sinds 1959 zijn langs de Maas met verschillende technieken sedimenttransportmetingen uitgevoerd. Voor de meting van zwevend transport is veelal gebruik gemaakt van de Delftse Fles (DF) en de Akoestische Zandtransportmeter (AZTM), terwijl voor de meting van bodemtransport meestal gebruik is gemaakt van de Bodemtransportmeter Arnhem (BTMA) of de Helley-Smith. Daarnaast zijn ook aan de hand van duinverplaatsing inschattingen gemaakt van het bodemtransport. Alle metingen hadden plaats vóór 2003. In de afgelopen 20 jaar zijn geen nieuwe metingen verricht.

De resultaten van de sedimenttransportmetingen op de Maas (Gerretsen, 1968; De Wildt, 1981; Schoonman, 1991; Burgdorffer, 1993; Duizendstra et al., 1994; Duizendstra en Scheers, 1995; Wilkens en Lambeek, 1997; Duizendstra, 1999; Schropp et al., 2000; Jesse, 2001; Frings, 2002; Frings



2003) vertonen een grote mate van spreiding. Deze komt enerzijds voort uit de grote temporele en ruimtelijke variatie in sedimenttransport en anderzijds uit meetonzekerheden. De meet- en analyserapporten van de metingen op de Maas geven onvoldoende inzicht in de absolute grootte van deze onzekerheden. Op basis van algemene literatuur mag geconcludeerd worden dat de onzekerheid in de gerapporteerde sedimenttransporten minimaal 20% tot 50% bedraagt, maar het is verstandig een grotere onzekerheidsbandbreedte te hanteren, zeker bij de oudere metingen.

Jaarvrachten op de Gemeenschappelijke Maas: studies uit het verleden

Op basis van de hierboven genoemde sedimenttransportmetingen is door verschillende onderzoekers getracht een relatie te leggen tussen sedimenttransport en afvoer. Zulke transportafvoerrelaties kennen een grote mate van onzekerheid, voortkomend uit de spreiding in meetresultaten en het gebrek aan sedimenttransportmetingen bij hoge afvoeren. Transportafvoerrelaties zijn niettemin geschikt om, met behulp van gemeten afvoerreeksen, een inschatting te maken van de jaarvrachten.

Mede op basis van een eerdere studie van Gerretsen (1968) schatten Helmer et al. (1991) de jaarvracht op de Gemeenschappelijke Maas op 35 000 m³/jaar. Het is echter onduidelijk hoe Helmer et al. deze waarde precies hebben afgeleid. Een systematische wetenschappelijke onderbouwing ontbreekt. Desondanks wordt in vele publicaties sinds de jaren '90 uitgegaan van een jaarlijkse sedimentvracht van 35 000 m³/jaar op de Gemeenschappelijke Maas.

Duizendstra (1999) heeft een beter onderbouwde berekening uitgevoerd. Hij leidde de jaarvracht bij Maaseik af uit transportafvoerrelaties voor twee periodes: de periode 1978-1987 en de periode 1988-1995. Voor de eerste periode vond hij een gemiddelde jaarvracht van 11 100 m³/jaar voor condities waarbij de pleisterlaag intact is en een gemiddelde jaarvracht van 61 500 m³/jaar bij een opgebroken pleisterlaag. Voor de tweede periode vond hij jaarvrachten van respectievelijk 13 000 m³/jaar en 73 600 m³/jaar.

Wilbers (1996) hanteerde een andere methode om de jaarvrachten te berekenen. Hij nam aan dat er geen sediment voorbij stuw Borgharen wordt getransporteerd en kwam op basis van een vereenvoudigde sedimentbalansanalyse voor Maaseik tot een cumulatief sedimentverlies in de periode 1978-1995 van 920 000 m³, hetgeen neerkomt op een jaarvracht van ca. 54 000 m³/jaar bij Maaseik.

Sinds 1990 zijn ook verschillende morfologische rekenmodellen ontwikkeld om de morfologische ontwikkeling van de Maas te simuleren. Deze modellen gebruiken (semi-empirische) sedimenttransportrelaties zoals de formule van Meyer-Peter en Müller (1948) om het sedimenttransport te berekenen en – op basis daarvan – de morfologische verandering van de rivierbodem. De berekende sedimentvrachten zijn afhankelijk van vele factoren, zoals de bovenstroomse sedimentrandvoorwaarde (hoeveel sediment komt er aan de bovenrand het modelgebied binnen?), de gekozen sedimenttransportformule, de initiële bodemsamenstelling (sedimentkorrelgrootte) en de keuzes die gemaakt zijn bij de kalibratie van het model. Daardoor zijn de sedimentvrachten met grote zekerheid omgeven. Niettemin geven de modellen wel inzicht in de variabiliteit van de jaarvrachten. Zo varieert de jaarvracht bij Borgharen in de periode 2011-2019 volgens het model van Berends et al. (2020) tussen 0 en 70 000 m³/jaar en de jaarvracht bij Maaseik (RKM 52.4) tussen 14 000 en 230 000 m³/jaar (Busnelli en De Jong, 2020).

Duidelijk is dat de sedimentvrachten op de Gemeenschappelijke Maas met grote onzekerheid zijn omgeven. Ze variëren bovendien sterk van jaar tot jaar en is er sprake van een duidelijke toename van de sedimentvrachten in stroomrichting. Deze temporele en ruimtelijke trends worden veroorzaakt door verschillen in sedimentbeschikbaarheid. Bij lage afvoeren is de bodem van de Gemeenschappelijke Maas afgepleisterd en is weinig sediment beschikbaar voor transport. Tijdens hoogwaters wordt de pleisterlaag opengebroken en nemen de sedimenttransporten sterk toe doordat de onderliggende fijnere sedimenten worden blootgesteld aan de stroming. Daarom worden jaren met

een groot hoogwater gekenmerkt door hoge sedimentvrachten en jaren zonder grote hoogwaters door lage sedimentvrachten. Het sediment dat vrijkomt na openbreking van de pleisterlaag wordt voor een belangrijk deel naar benedenstrooms afgevoerd. Daardoor nemen de sedimenttransporten en jaarvrachten op de Gemeenschappelijke Maas toe in stroomrichting.

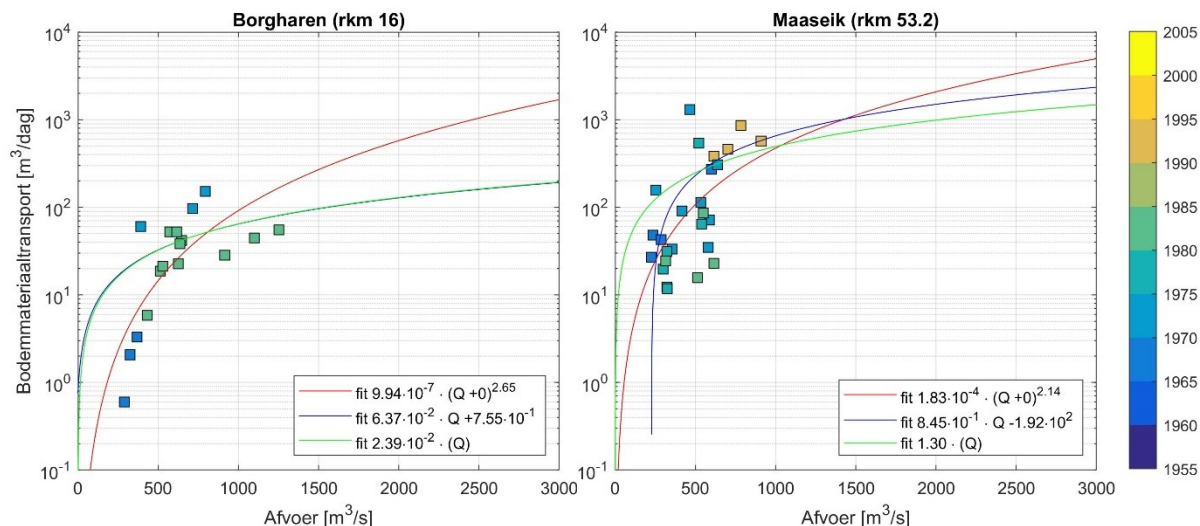


Fig. 9. Transportafvoerrelaties voor bodemmateriaaltransport.

Jaarvrachten op de Gemeenschappelijke Maas: nieuwe studie

De nieuwe transportafvoerrelaties die in het kader van dit Interregproject zijn afgeleid door Ottevanger en Chavarrias (2023) zijn afgebeeld in Fig. 9. Duidelijk is dat geen van de functietypen in staat is de waargenomen variatie in transport afdoende te beschrijven. De jaarvrachten die zijn bepaald door Ottevanger en Chavarrias (2023) (Tabel 1 en 2) bevestigen het beeld van een sterke variatie van jaar tot jaar met een toename van de vrachten in stroomrichting. De jaarvrachten bij Maaseik (600 – 9400 m³/jaar) zijn een grootte-orde hoger dan de jaarvrachten bij Borgharen (5000 – 63400 m³/jaar).

Tabel 1 Jaarvracht bij Borgharen [m³/jaar].

Percentiel	Functie $S=aQ^b$	Functie $S=aQ+b$	Functie $S=aQ$
5%	600	3100	2900
10%	900	3500	3300
50%	3200	6000	5800
90%	7000	8000	7900
95%	9400	8500	8300

Tabel 2 Jaarvracht bij Maaseik [m³/jaar].

Percentiel	Functie $S=aQ^b$	Functie $S=aQ+b$	Functie $S=aQ$
5%	5000	6700	22 200
10%	6500	10 400	25 000
50%	19 700	29 100	44 500
90%	36 200	49 300	60 100
95%	43 800	57 800	63 400



De toename van de jaarvrachten tussen Borgharen tot en met Maaseik sluit aan bij de langjarige bodemtrend op dit riviertraject. Nederland gaat binnen het programma Integraal Riviermanagement (IRM) voor de Gemeenschappelijke Maas uit van een bodemtrend van -2 cm per jaar (Sloff, 2021). Als we deze prognose van -2 cm/jaar toepassen op het traject Borgharen (RKM 16) - Maaseik (RKM 53,2) dan volgt, uitgaande van een breedte van 60 m, hieruit een toename van de sedimentvracht tussen Borgharen en Maaseik van circa 45 000 m³/jaar.

Het is van belang te benadrukken, dat bovenstaande jaarvrachten zijn afgeleid op basis van metingen uit de periode 1959-2002 die niet geldig zijn voor de huidige situatie. Na de laatste transportmeting zijn er grote ingrepen geweest in de Gemeenschappelijke Maas, variërend van oeverontstening tot winterbedverruiming. Hierdoor zijn de stromingscondities veranderd, hetgeen zijn weerslag heeft op de sedimenttransporten en jaarvrachten. Op dit moment is de sedimentbalans van de Maas verstoord en bevindt de Maas zich niet in een morfologische evenwichtstoestand. Dat betekent dat de rivier een transitie ondergaat in de tijd waarbij de rivier zich lokaal kan insnijden of juist de bedding kan opvullen. Deze transitie leidt ertoe dat sedimenttransporten langs de rivier in de loop van de tijd veranderen. Jaarvrachten gebaseerd op metingen uit het verleden bieden op dit moment, maar ook voor de toekomst, geen betrouwbaar beeld van de werkelijke sedimenttransporten.

Om een goed beeld te krijgen van de daadwerkelijke tegenwoordige sedimentvrachten op de Maas zouden nieuwe sedimenttransportmetingen uitkomst kunnen bieden. Bij het uitvoeren van zulke nieuwe metingen dient eerst goed nagedacht te worden over hoe de meetonzekerheden kunnen worden gereduceerd.

Voor een uitgebreide beschrijving van de sedimenttransportevaluatie wordt verwezen naar Ottevanger en Chavarrias (2023).



5. Conclusies en aanbevelingen

De kennis van de sedimentdynamiek op de Gemeenschappelijke Maas is sterk toegenomen door de sedimentbemonstering, schuifspanningsanalyse en sedimenttransportevaluatie die zijn uitgevoerd in het kader van het Interregproject EMfloodResilience.

Vastgesteld werd dat de Maasbodem voornamelijk uit grind bestaat, iets fijner wordt in stroomafwaartse richting en gekenmerkt wordt door een vrij chaotische korrelgroottevariatie op korte afstand. De top laag is doorgaans iets grover dan de onderlaag.

De bodemschuifspanning in de Gemeenschappelijke Maas vertoont bij hoogwater een grillig verloop, dat zorgt voor sterke gradiënten in sedimenttransportcapaciteit, die erosie en sedimentatie in de hand werken. Zones met zeer hoge schuifspanningen worden afgewisseld met zones waarin zelfs de kritieke schuifspanning voor bewegingsbegin nauwelijks overschreden wordt.

De sedimentvrachten op de Gemeenschappelijke Maas variëren aanzienlijk van jaar tot jaar en nemen als gevolg van de langjarige beddingerosie toe in stroomrichting. Dit patroon wordt sterk bepaald door variaties in sedimentbeschikbaarheid. Schattingen van de jaarvracht bij Maaseik variëren tussen 5000 m³/jaar voor een droog jaar tot 63 400 m³/jaar voor een nat jaar.

Aanbevolen wordt een gedetailleerde analyse uit te voeren naar de stabiliteit van de bodem van de Gemeenschappelijke Maas in het algemeen, en het risico op nieuwe erosiekuilen in het bijzonder, gebruik makend van de gegevens die zijn verzameld in deze studie. Het ligt voor de hand voor deze risicobeoordeling het tweedimensionale morfodynamische computermodel te gebruiken dat momenteel door Deltares ontwikkeld wordt voor Rijkswaterstaat. Aan dit model zal ook informatie over de geologische ondergrond moeten worden toegevoegd, waarvoor het wenselijk is eerst actuele informatie in te winnen over de diepteligging van de fijne zandlagen in de ondergrond.

Internationale samenwerking op sedimentgebied is essentieel voor goed en duurzaam rivierbeheer. Het verdient aanbeveling de internationale samenwerking rondom sediment in het Maasstroomgebied te intensiveren. Begonnen zou moeten worden met een stroomgebiedsbrede inventarisatie van de sedimentdynamiek en sedimentgerelateerde problemen.



Literatuur

- Beemster, J.G.W., Vermeulen B., Hoitink A.J.F., van Tilburg, F (2023): Erosiekuilen in de Gemeenschappelijke Maas, in: Flierman, M. en Frings, R.M. (eds), Sedimentatie en erosie tijdens het zomerhoogwater van de Maas in 2021. Rijkswaterstaat Zuid-Nederland, Maastricht.
- BK Ingenieurs (2023): Eindrapport Sedimentbemonstering Zuidelijke Maasdelen. BK Ingenieurs, Velserbroek.
- Berends, K., R. Daggenvoorde en K. Sloff (2020). Morphological models for IRM: Meuse 1D. Tech. Rep. 11203684-015-ZWS-0016, Deltares and HKV.
- Burgdorffer, M. (1993). Sedimenttransportmetingen in de Maas te Eijsden en Maaseik Januari 1991. Tech. Rapp. C14124-10, Institute of Inland Water Management and Waste Water Treatment (RIZA), Arnhem, the Netherlands.
- Busnelli, M. en H. de Jong (2020). Testcasus 1D Morfologisch Model Maas: Testcasus 1D Morfologisch Model Maas. Tech. Rapp. BH5379-RHD-ZZ-XX-RP-Z-0002, HaskoningDHV Nederland B.V., the Netherlands.
- Duizendstra, D. (1999). Sedimenttransport in de Grensmaas: Transportcapaciteit en aanbod van sediment. Tech. Rapp. werkdocument 99.158X, Rijkswaterstaat RIZA.
- Duizendstra, H. D., T. J. M. Kos en L. W. J. van Hal (1994). Bodemtransportmetingen in de Grensmaas vanaf bruggen: eerste testmetingen. Tech. Rapp. Werkdocument 94.059X, Rijkswaterstaat, RIZA.
- Duizendstra, H. D. en W. H. Scheers (1995). Ontwerp van een aangepaste Helley-Smith voor de Grensmaas. Tech. Rapp. Werkdocument 95.143X, Rijkswaterstaat RIZA en Directie Oost-Nederland.
- Flierman, M. en Frings, R.M. (2023): Sedimentatie en erosie tijdens het zomerhoogwater van de Maas in 2021. Rijkswaterstaat Zuid-Nederland, Maastricht.
- Frings, R. M. (2002). Duinen, hydraulische ruwheid en bodemtransport in het zomerbed van de Maas bij Broekhuizen. Tech. rapp., Interuniversitair Centrum voor Geo-ecologisch onderzoek / Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Universiteit Utrecht, Utrecht. ICG 02/1.
- Frings, R. M. (2003). Duinen en bodemtransport in het zomerbed van de Maas bij Broekhuizen II. Fysische Geografie, Faculteit der Geowetenschappen, Universiteit Utrecht & Interuniversitair Centrum voor Geo-ecologisch onderzoek Amsterdam.
- Gerretsen (1968). Materiaaltransport door de Maas. Tech. Rapp. 68.8, Rijkswaterstaat, Directie Limburg, Studiedienst Maas, Maastricht, the Netherlands. Nota 68.8 RWS.
- Helmer, W., G. J. Klaassen en W. Silva (1991). Toekomst voor een grindrivier, deel 5: rivierkundige aspecten van natuurontwikkeling. Tech. Rapp. 91.007, RIZA Rijkswaterstaat.
- Jesse, P. (2001). Uitwerking sedimenttransportmetingen: Zandmaas rkm 141,3: december 1999. rapport 2001.141x, RIZA, Lelystad.
- Meyer-Peter, E. en R. Müller (1948). "Formulas for bed-load transport." In Proc. 2nd IAHR World Congress, 6–9 June, Stockholm, Sweden, pag. 39–64.
- Ottevanger, W. en Chavarrias, V. (2023): Sedimenttransport Maas - Duiding op basis van literatuuronderzoek. Deltares, Delft.
- Schoonman, H. B. (1991). Bodemtransportmetingen op de Grensmaas. Tech. Rep. B241, W.L. | Delft Hydraulics Laboratory, Delft, the Netherlands.
- Schropp, M. H. I., P. Jesse en J. A. F. van Essen (2000). Morfologie en zandtransport Maas zomerbedverdieping Gennep - Grave: Monitoringsresultaten 1996 -1999. rapport 2000.001, RIZA, Arnhem.

- 
- Sloff, K. (2021). Prognose bodemligging Maas 2050 voor IRM. Memo 11206795-010, Deltares, Delft, the Netherlands.
- Task Force Fact Finding (2021): Hoogwater 2021 Feiten en Duiding. Expertise Netwerk Hoogwaterveiligheid.
- Van der Deijl, E.C. (2023). Validatie hoogwater Maas juli 2021. Rapport 11208053-002-ZWS-0006 v1, Deltares, Delft.
- Van der Deijl, E.C. en Ottevanger, W. (2023): Bodemschuifspanning Gemeenschappelijke Maas - Duiding op basis van modelberekeningen en veldmetingen. Deltares, Delft.
- Van Rijn, L.C. (1984). Sediment transport, Part I: bed load transport. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.110, No.10, pp.1431-1456.
- Wilbers, A. (1996). The Border Meuse over the years. A study into the morphological changes of the bed of the Meuse River in the period 1978 through 1998. Tech. rapp., Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Vakgroep Fysische Geografie, Universiteit Utrecht. Nederland.
- De Wildt, P. J. W. (1981). Sedimenttransport in de Maas. Nota 81.24, Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Zuidoost - Afdeling Maas. Nota 81.24 RWS.
- Wilkens, D. H. en J. J. P. Lambeek (1997). Bodemtransportmetingen Grensmaas. Tech. Rapp. Q2354, W.L. | Delft Hydraulics Laboratory, Delft, the Netherlands.



Bijlagen

- A.1 Bodemschuifspanning S_250 (geometrie voorjaar 2021)
- A.2 Bodemschuifspanning S_750 (geometrie voorjaar 2021)
- A.3 Bodemschuifspanning S1300 (geometrie voorjaar 2021)
- A.4 Bodemschuifspanning S2100 (geometrie voorjaar 2021)
- A.5 Bodemschuifspanning S3200 (geometrie voorjaar 2021)
- A.6 Bodemschuifspanning HW2021 (geometrie voorjaar 2021)
- A.7 Kritische bodemschuifspanning (op basis van najaar 2023 kor)
- A.8 Overschrijding kritische bodemschuifspanning_S_250
- A.9 Overschrijding kritische bodemschuifspanning_S_750
- A.10 Overschrijding kritische bodemschuifspanning_S1300
- A.11 Overschrijding kritische bodemschuifspanning_S2100
- A.12 Overschrijding kritische bodemschuifspanning_S3200
- A.13 Overschrijding kritische bodemschuifspanning HW2021

- B.1 Extract uit de korrelgroottedataset

- C.1 Geometrisch_gemiddelde_korreldiameter

De bijlagen zijn zeer groot (0,5 GB). U kunt de bijlagen opvragen via de IPLO website, onder vermelding van de naam van het rapport en de auteur: <https://iplo.nl/contact/vragenformulier/>