Morfodynamiek van de Noor

Dr. H.A.G. Woolderink, T.T.L. Harkema, MSc

WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Morfodynamiek van de Noor

Dr. H.A.G. Woolderink, T.T.L. Harkema, MSc

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research in opdracht van Vereniging tot Behoud van Natuurmonumenten in Nederland.

Wageningen Environmental Research
Wageningen, november 2023

Gereviewd door:
Ir. Ab Veldhuizen, Hydroloog (Wageningen Environmental Research)

Akkoord voor publicatie:
Dr. ir. Mirjam Hack-ten Broeke, teamleider van Bodem, Water en Landgebruik

Rapport 3298
ISSN 1566-7197

WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Woolderink, H.A.G. & T.T.L. Harkema, 2023. *Morfodynamiek van de Noor.* Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3298. 64 blz.; 25 fig.; 4 tab.; 21 ref.

De geul van de Noor ligt in Zuid-Limburg diep ingesneden ten opzichte van de omringende beemden. Met een toenemende kans op hevige neerslag bestaat het risico op verdere insnijding van de geul ten opzichte van de dalbodem. Een verdere insnijding is onwenselijk, omdat het op (ten minste) twee manieren kan bijdragen aan verdroging van de aangrenzende beemden, namelijk: i) diepere insnijding kan ervoor zorgen dat de geul van de Noor meer kwelwater aantrekt doordat op deze locaties de weerstand van de dalopvulling vermindert of in het ergste geval volledig verdwijnt, ii) de drainagebasis wordt verlaagd, waardoor zowel de grondwaterspiegel nabij de geul wordt verlaagd alsook dit voor terugschrijdende (in stroomopwaartse richting) erosie in de zijstromen van de dalbodem van de Noor zorgt. Dit project heeft twee mogelijkheden voor ingrepen in de geul van de Noor verkend om verdere insnijding te voorkomen en mogelijk bij te dragen aan het verhogen van de drainagebasis van de Noor. Er is bepaald in welke mate de waterstanden/afvoeren verlaagd moeten worden om ervoor te zorgen dat het huidige beddingmateriaal minder in transport komt. Daarnaast is verkend welke korrelgroottes bestand zullen zijn tegen de huidige bandbreedte aan voorkomende waterstanden/afvoeren over het lengteprofiel van de Noor indien er besloten wordt om een beddingsuppletie uit te voeren. Resultaten laten zien dat voor het tegengaan van verdere insnijding van de Noor maatregelen aan de waterzijde (afvoer) en/of sedimentzijde (korrelgrootte) nodig zijn. Wanneer gekozen wordt voor suppletie en/of ophoging van de beekdalbodem, dan moet dit gebeuren met gebiedseigen materiaal en dient het afgestemd te worden op de verschillende gradiënten in het lengteprofiel van de Noor. Suppletie die bestand is tegen de huidige bandbreedte aan stroomsnelheden zal echter leiden tot aanzienlijke vergroving van de bedding van de Noor (zeer grof grind en stenen fractie). Het is daarom sterk aan te raden om in te zetten op het reduceren van de piekafvoeren van de Noor. Alle mogelijk te nemen maatregelen dienen zorgvuldig te worden gemonitord om de effectiviteit te beoordelen en ervoor te zorgen dat deze effectiviteit behouden blijft. Het is belangrijk om te beseffen dat een eventuele suppletie voor verondieping van de Noor geen eenmalige ingreep is, maar een langdurig proces van maatwerk, waarbij monitoring en aanpassingen essentieel zijn.

The Noor’s channel is deeply incised compared to the surrounding floodplains. Increasing risk for heavy rainfall might result in further incision of the channel relative to the valley floor. Further incision is undesirable because it can contribute to the drying of the adjacent floodplains in at least two ways: i) deeper incision can lead to the channel attracting more seepage water because the resistance of the valley fill decreases at these locations or even disappears entirely, ii) the drainage base is lowered, reducing both the groundwater level near the channel and causing retrogressive erosion in the tributaries of the Noor’s valley floor. This project explored two possible interventions in the Noor’s channel to prevent further incision and possibly increase the drainage base of the Noor. It has been determined to what extent water levels/discharges need to be reduced to ensure that the current bed sediment is less transported. Additionally, it has been explored which particle sizes will withstand the current range of water levels/discharges along the length profile of the Noor if it is decided to carry out a channel bed supplementation. Results show that to prevent further incision of the Noor, measures on the water side (discharge) and/or sediment side (particle size) are necessary. If channel bed supplementation is carried out, it must be done with local material and it should be tailored to the different gradients in the Noor’s length profile. Supplementation capable of withstanding the current range of flow velocities will, however, lead to a significant coarsening of the Noor’s bed (coarse gravel and cobble fraction). Therefore, it is strongly recommended to proactively reduce the peak flows of the Noor. All possible measures should be carefully monitored to assess their effectiveness and ensure their preservation. It is important to realize that any channel bed supplementation of the Noor is not a one-time intervention but a long-term customized process where monitoring and adjustments are essential.

Trefwoorden: Morfologie, Morfodynamiek, Noor, Sediment, Ecologie

Dit rapport is gratis te downloaden van https://doi.org/10.18174/642314 of op www.wur.nl/environmental-research (ga naar ‘Wageningen Environmental Research’ in de grijze balk onderaan). Wageningen Environmental Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

© 2023 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, www.wur.nl/environmental-research. Wageningen Environmental Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Wageningen Environmental Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Wageningen Environmental Research werkt sinds 2003 met een ISO 9001 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem.
In 2006 heeft Wageningen Environmental Research een milieuzorgsysteem geïmplementeerd, gecertificeerd volgens de norm ISO 14001.
Wageningen Environmental Research geeft via ISO 26000 invulling aan haar maatschappelijke verantwoordelijkheid.

Wageningen Environmental Research Rapport 3298 | ISSN 1566-7197

Foto omslag: Riffle-pool morfologie in de Noor (foto: Hessel Woolderink)

Inhoud

Verantwoording **7**

Samenvatting **9**

1 Inleiding **11**

1.1 Aanleiding 11
1.2 Doel 11
1.3 Gebiedsbeschrijving 11
1.3.1 Geografie en Geologie 11
1.3.2 Beektype en morfologie 15

2 Theoretisch kader **19**

2.1 Generieke genese Zuid-Limburgse beekdalen 19
2.2 Water-sediment-balans 19
2.3 Bed armor 22
2.4 Begin van beweging van beddingsediment 22
2.5 Invloedsafstand drainerende werking Noor 23

3 Methode **25**

3.1 Waterstanden 25
3.1.1 Riooloverstort 25
3.2 Lengteprofiel en gradiënten 26
3.2.1 Lengteprofiel 26
3.2.2 Gradiënten 26
3.3 Sinuositeit en geulpatroonvoorspelling 27
3.3.1 Sinuositeit 27
3.3.2 Geulpatroonvoorspelling 27
3.4 Hydraulische geometrie 28

4 Resultaten **29**

4.1 Waterstanden 29
4.2 Lengteprofiel en gradiënten 30
4.2.1 Lengteprofiel 30
4.2.2 Gradiënten 30
4.3 Sinuositeit en geulpatroonvoorspelling 34
4.3.1 Sinuositeit 34
4.3.2 Geulpatroonvoorspelling 35
4.4 Hydraulische geometrie 36
4.5 Samenstelling beddingmateriaal 36
4.5.1 Hydrologische grenswaarden op basis van Shields 39
4.5.2 Benodigde korrelgroottes om erosie te weerstaan 39

5 Voorkomen verdere insnijding en verhoging van de Noorbedding **40**

5.1 Voorkomen verdere insnijding van de bedding van de Noor door verlagen piekafvoeren 40
5.2 Voorkomen verdere insnijding door suppletie van de Noorbedding 41
5.3 Mogelijke laterale verplaatsing en herinsnijding door verhogen drainagebasis 42

6 Mogelijk streefbeeld morfologisch-dynamisch evenwicht voor de Noor **45**

7 Morfologisch-dynamisch evenwicht van de Noor in relatie tot ecologie **48**

8 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek 49

9 Conclusies 50

Woord van dank 51

Literatuur 52

Bijlage 1 53

Bijlage 2 54

Bijlage 3 55

Bijlage 4 63

Verantwoording

Rapport: 3298
Projectnummer: 47879

Wageningen Environmental Research (WENR) hecht grote waarde aan de kwaliteit van zijn eindproducten. Een review van de rapporten op wetenschappelijke kwaliteit door een referent maakt standaard onderdeel uit van ons kwaliteitsbeleid.

Akkoord referent die het rapport heeft beoordeeld,

functie: Hydroloog

naam: ir. Ab Veldhuizen

Datum: 07-11-2023

Akkoord teamleider voor de inhoud,

Naam: dr. ir. Mirjam Hack-ten Broeke

Datum: 07-11-2023

Samenvatting

Op dit moment is de Noor een morfologisch actieve beek waarin natuurlijke erosie- en sedimentatieprocessen plaatsvinden. Verticale insnijding heeft de afgelopen decennia de overhand gehad, waardoor de bedding van de Noor op sommige locaties tot wel 2 meter dieper ligt dan de aangrenzende beemden die de beekdalbodem vormen. Op basis van de huidige geulvormende afvoer van de Noor zou een breedte van circa 3 meter en diepte van circa 0.6 meter passend zijn voor een geul in evenwichtsconditie.

Een verdere insnijding van de geul van de Noor is onwenselijk, omdat het op ten minste twee manieren kan bijdragen aan verdroging van de aangrenzende beemden, namelijk: i) diepere insnijding kan ervoor zorgen dat de geul van de Noor meer kwelwater aantrekt doordat op deze locaties de weerstand van de dalopvulling vermindert of zelfs verdwijnt, ii) de drainagebasis wordt verlaagd, wat zorgt voor een verlaging van de grondwaterspiegel nabij de geul en eveneens zorgt voor terugschrijdende (in stroomopwaartse richting) erosie in de zijstromen van de Noor. Daarom richt deze studie zich op het bepalen van een streefbeeld voor een morfologisch dynamisch evenwicht voor de Noor dat kan helpen bij het tegengaan van de verdroging van de Noorbeemden, terwijl de kenmerkende morfologie van de Noor behouden blijft of wordt geëvenaard.

Een mogelijk morfologisch-dynamisch evenwicht voor de Noor om op termijn naar te streven, is dat van een relatief rustige en ondiepe beek met een vochtige alluviale vlakte (zoals deze in het verleden voorkwam). Dit betekent echter niet dat er geen morfologische processen en gradiënten aanwezig zijn in de beek zelf. Vanwege de unieke landschappelijke ligging is het belangrijk dat het streefbeeld voor het morfologisch-dynamische evenwicht de kenmerkende morfologische eigenschappen van de Noor weerspiegelt, zoals een onregelmatig dwars- en lengteprofiel met grindbanken, variaties in stroomsnelheden, substraat en de aanwezigheid van takken en boomstammen.

Voor het realiseren en duurzaam in stand houden van een dergelijk beeksysteem zijn bijbehorende hydrologische en sedimentologische omstandigheden nodig; dit vergt meer gedempte afvoeren en beperkte sedimenttoevoer uit het achterland. Het is belangrijk dat verticale erosie beperkt of afwezig is en dat is realiseerbeer met een sterke bedding. Een bedding die bestand is tegen de huidige bandbreedte aan stroomsnelheden zal echter moeten worden gecreëerd door suppletie en zal door toevoeging van zeer grof grind en stenen leiden tot aanzienlijke vergroving van de bedding van de Noor. Ook dan blijft het risico bestaan op hernieuwde insnijding wanneer de geul door laterale migratie verplaatst. Het is daarom essentieel om in te zetten op het reduceren van de piekafvoeren van de Noor om hoge stroomsnelheden en erosiecapaciteit in de geul van de Noor tegen te gaan die de sterke insnijding veroorzaken.

Realisatie van een duurzame situatie voor de Noor vraagt om systeemingrepen in het stroomgebied van de Noor die deels buiten de alluviale vlakte moeten worden genomen. Het is echter ook noodzakelijk om de bestaande riooloverstort op de Noor te saneren en oppervlakkige afspoeling uit bebouwd gebied verder te verminderen, aangezien dit bijdraagt aan een piekbelasting in de afvoer. Een eerder uitgevoerde modelstudie laat namelijk zien dat een significant deel van de totale afvoer bij hevige neerslag afkomstig is van de externe overstort van de bergbezinkvoorziening bij Wesch en dus vanuit de kern van de dorpen Noorbeek en Bergenhuizen. Pas wanneer deze sanering is gerealiseerd, wordt het zinvol om maatregelen in de geul van de Noor uit te voeren.

Na het terugbrengen van de afvoer kunnen de beoogde dimensies van de geul berekend worden aan de hand van de nieuwe afvoeren. Ook dient er een beschermende beddinglaag aangebracht te worden die is afgestemd op de nieuwe bandbreedte aan afvoeren en verschillen in gradiënt over het lengteprofiel van de Noor. Deze ingrepen dienen zorgvuldig te worden gemonitord om de effectiviteit voor het behoud van de bedding te beoordelen en ervoor te kunnen zorgen dat deze effectiviteit behouden blijft. Het is belangrijk om te beseffen dat een eventuele suppletie als verondieping van de Noor geen eenmalige ingreep is, maar een langdurig proces van maatwerk, waarbij monitoring en aanpassingen essentieel zijn.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De geul van de Noor ligt in Zuid-Limburg diep ingesneden ten opzichte van de omringende beemden. Met een toenemende kans op hevige neerslag bestaat het risico op verdere insnijding van de geul ten opzichte van de dalbodem. Een verdere insnijding is onwenselijk, omdat het op (ten minste) twee manieren kan bijdragen aan verdroging van de aangrenzende beemden, namelijk: i) een diepere insnijding kan ervoor zorgen dat de geul van de Noor meer kwelwater aantrekt doordat op deze locaties de weerstand van de dalopvulling vermindert of in het ergste geval volledig verdwijnt, ii) de drainagebasis wordt verlaagd, waardoor zowel de grondwaterspiegel nabij de geul wordt verlaagd alsook dit voor terugschrijdende (in stroomopwaartse richting) erosie in de zijstromen van de dalbodem van de Noor zorgt. Er dient dan ook gezocht te worden naar maatregelen om deze verdere insnijding te voorkomen. In een scenario waarin geen actie ondernomen wordt, zal de situatie zeer waarschijnlijk blijven verslechteren. In recent onderzoek is aangegeven dat er gestreefd moet worden naar een verhoging van de drainagebasis van de Noor om sluipende verdroging van de beemden tegen te gaan (De Mars en Van der Weijden, 2021). Hoe dit gerealiseerd kan worden, is de vraag. De afgelopen jaren is geprobeerd om met relatief kleine maatregelen de insnijding tegen te gaan en de beekbodem op te hogen. Deze maatregelen zijn intensief gemonitord en nog niet afdoende gebleken. De maatregelen die tot nu toe zijn uitgeprobeerd, zijn beperkt van omvang en voorzichtig omwille van bescherming van de aanwezige bijzondere macrofauna in de beek. Momenteel zijn de piekafvoeren uit het achterliggende stroomgebied nog te hoog, waardoor de uitgevoerde maatregelen relatief weinig effect hadden. Daarnaast vinden er nog te veel overstorten uit het riool plaats, waardoor de waterkwaliteit onvoldoende is. Momenteel wordt aan beide zaken gewerkt. Tegelijkertijd is er de behoefte aan een goed onderbouwd plan van aanpak dat ervoor kan zorgen dat zowel een ondiepe Noor als een natte dalvlakte gerealiseerd kan worden. De vraag is naar welk morfologisch-dynamisch evenwicht hierbij gestreefd moet worden. Natuurlijke beken zijn dynamische systemen die seizoensgebonden variaties en periodieke aanpassingen als reactie op veranderingen in de omgeving ondergaan. Echter, op langere termijn moet het beeksysteem binnen bepaalde grenzen fluctueren en behoudt het een algemene stabiliteit in zijn vorm en kenmerken.

1.2 Doel

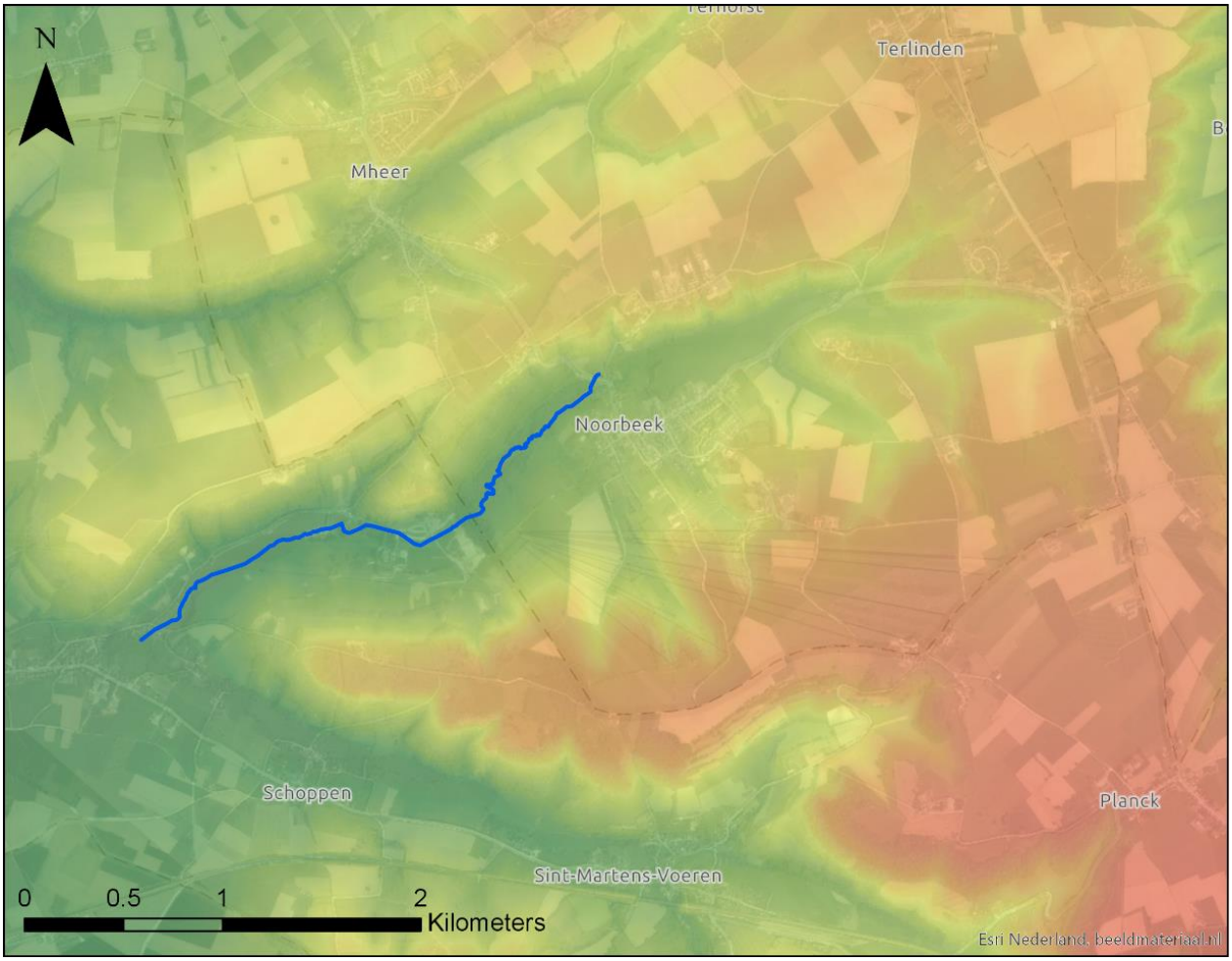
Het project heeft als doel om te bepalen naar welk morfologisch-dynamisch evenwicht toegewerkt kan worden om i) verdere insnijding van de Noor te voorkomen en ii) verhoging van de drainagebasis van de Noor te realiseren. Deze doelstellingen kunnen zowel los van elkaar als gezamenlijk gerealiseerd worden in een morfologisch-dynamisch evenwicht. De mate waarin maatregelen doorgevoerd moeten worden, kunnen verschillen in omvang.

1.3 Gebiedsbeschrijving

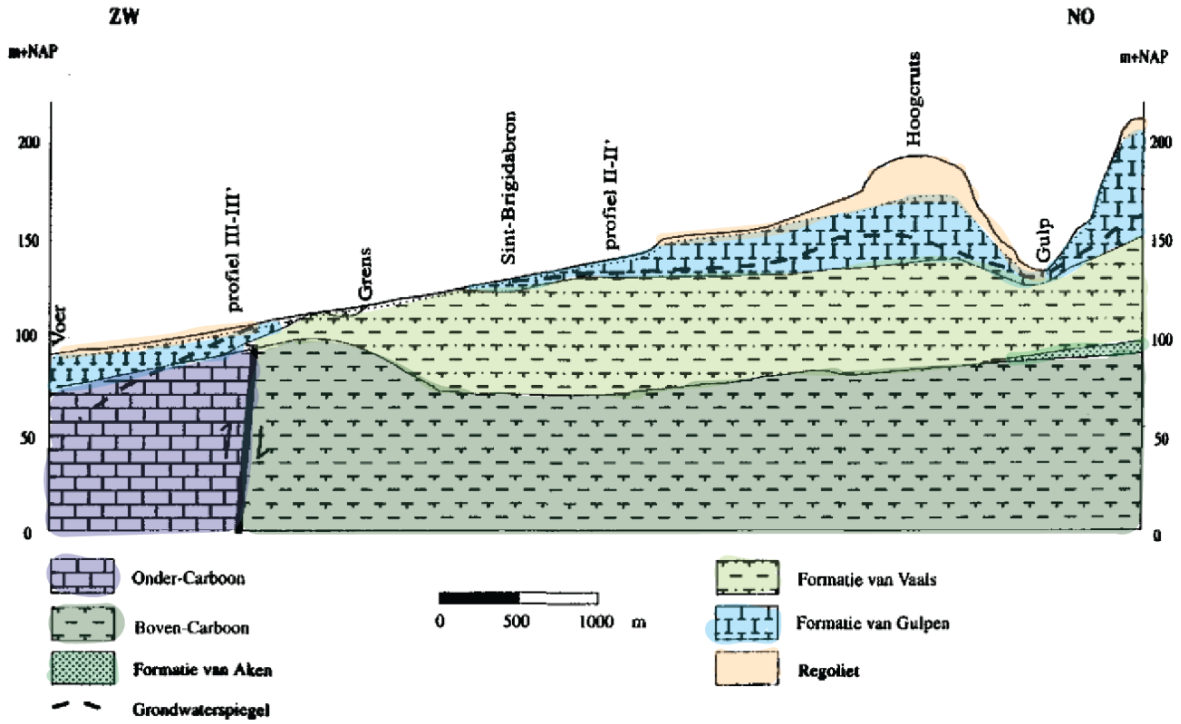
1.3.1 Geografie en Geologie

De Noor is een relatief kleine beek die haar bron heeft bij de Sint-Brigidabron in Noorbeek, Zuid-Limburg (Figuur 1.1). Het afvoergebied van de Noor beslaat circa 10,56 km^2 en is onderdeel van het grotere stroomgebied van de Voer (31,56 km^2) (Van Lanen et al., 1995). Het droge dal van de Noor begint op een hoogte van 240 m +NAP, terwijl het watervoerende deel van het beeksysteem begint op een hoogte van 138 m +NAP. De samenvloeiing met de Voer vindt plaats nabij ‘s Gravenvoeren in België op een hoogte van circa 88 m +NAP (Figuur 1.1; Van Lanen et al., 1995). Van de in totaal 21 kilometer aan dal-lengte is slechts de laatste 3 kilometer watervoerend. Het stroomgebied van de Noor ligt in een relatief complexe geologische

en geohydrologische setting, welke in detail is omschreven in onder meer Van Lanen et al. (1995) en Kessels (2012). De aanwezige Mesozoïsche en Cenozoïsche formaties hellen voornamelijk in een noordwestelijke richting en zijn door opheffing van het gebied diep ingesneden door (voorlopers van) de aanwezige beken en rivieren. Doordat er sprake is van een relatief steile noordzijde en een flauwere zuidzijde van de Noor, kan het dal omschreven worden als een asymmetrisch dal. Deze asymmetrie heeft niet alleen een grote invloed op het landgebruik en zodoende op de verdamping, maar ook op de infiltratiemogelijkheden en de grondwatersamenstelling (Van Lanen et al., 1995). De bodem van het Noordal is opgevuld met afzettingen uit het Laat Weichselien en het Holoceen. Vooral de grove zand- en grindafzettingen aan de basis van de dalopvulling liggen direct op de oudere afzettingen van de Formatie van Gulpen (zacht kalksteen) of de Formatie van Vaals (glauconiet en kleihoudende zanden). Een geologische dwarsdoorsnede in de lengterichting van de Noor is gegeven in Figuur 1.2. Wat hierin opvalt, is de overgang van de Formatie van Gulpen naar de Formatie van Vaals, niet ver van de Sint-Brigidabron in Noorbeek. Wat daarnaast opgemerkt moet worden uit het geologisch profiel is dat net na de landgrens met België de Formatie van Gulpen – met daaronder de kalkstenen van het Onder-Carboon – ondiep voorkomen, hetgeen samenhangt met de aanwezige breukzone. Een belangrijk gegeven van de over het algemeen genomen relatief fijnkorrelige dalvulling van de Noor is dat deze een hoge weerstand heeft, wat bijdraagt aan de kweldruk in het Noordal. Wanneer deze doorsneden zou raken en de basis van de geul van de Noor in contact zou komen met de onderliggende grove afzettingen uit het Weichselien of Formatie van Gulpen/Vaals, zal het kwelwater versneld afgevoerd worden via de geul van de Noor en is het aannemelijk dat de kwel(druk) in de aangrenzende beemden zal afnemen. Als gevolg hiervan staat het voortbestaan van de kwelafhankelijke flora en fauna in het gebied onder druk. Voor een verdere gedetailleerde (hydro)geologische omschrijving van het studiegebied wordt verwezen naar Van Lanen et al. (1995) en naar De Mars en Van der Weijden (2021).

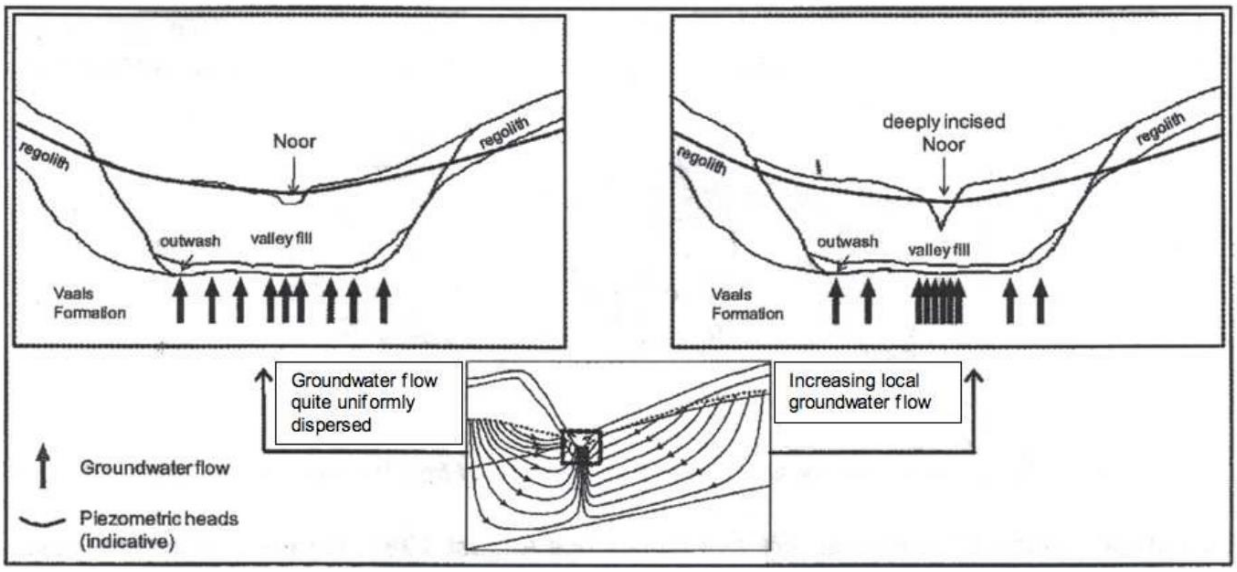


Figuur 1.1 *Overzicht van het Noordal met door de blauwe lijn het watervoerende deel van de Noor weergegeven. Tevens zichtbaar zijn de duidelijke asymmetrie van het dal en de verschillende droge dalen die in het Noordal uitkomen.*

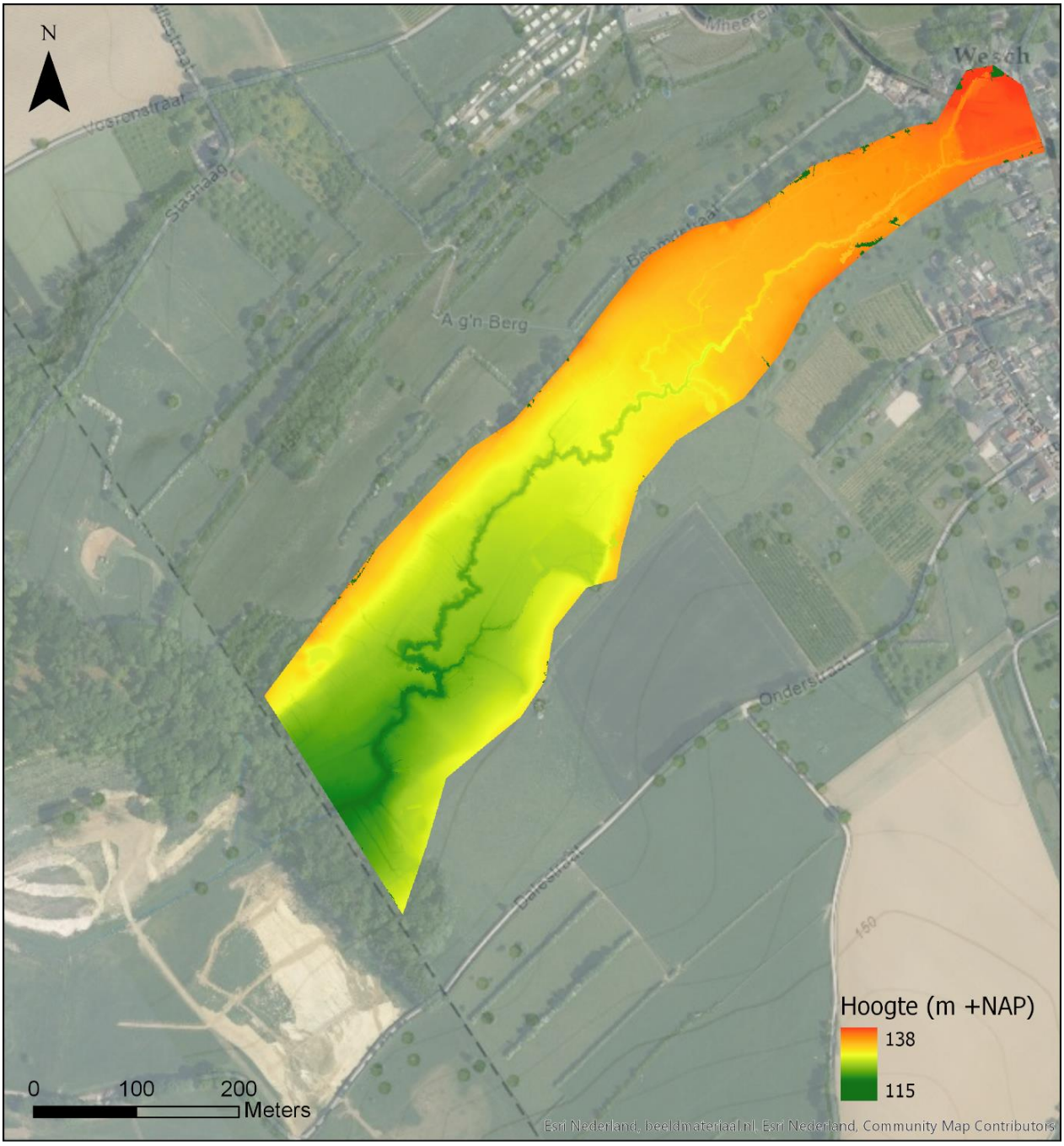


Figuur 1.2 *Geologische doorsnede door het lengteprofiel van de Noor. Opvallend is de overgang tussen de Formatie van Gulpen en Vaals op korte afstand na de Sint-Brigidabron en de aanwezigheid van de breuk net na de Grens met België (Van Lanen et al., 1995).*

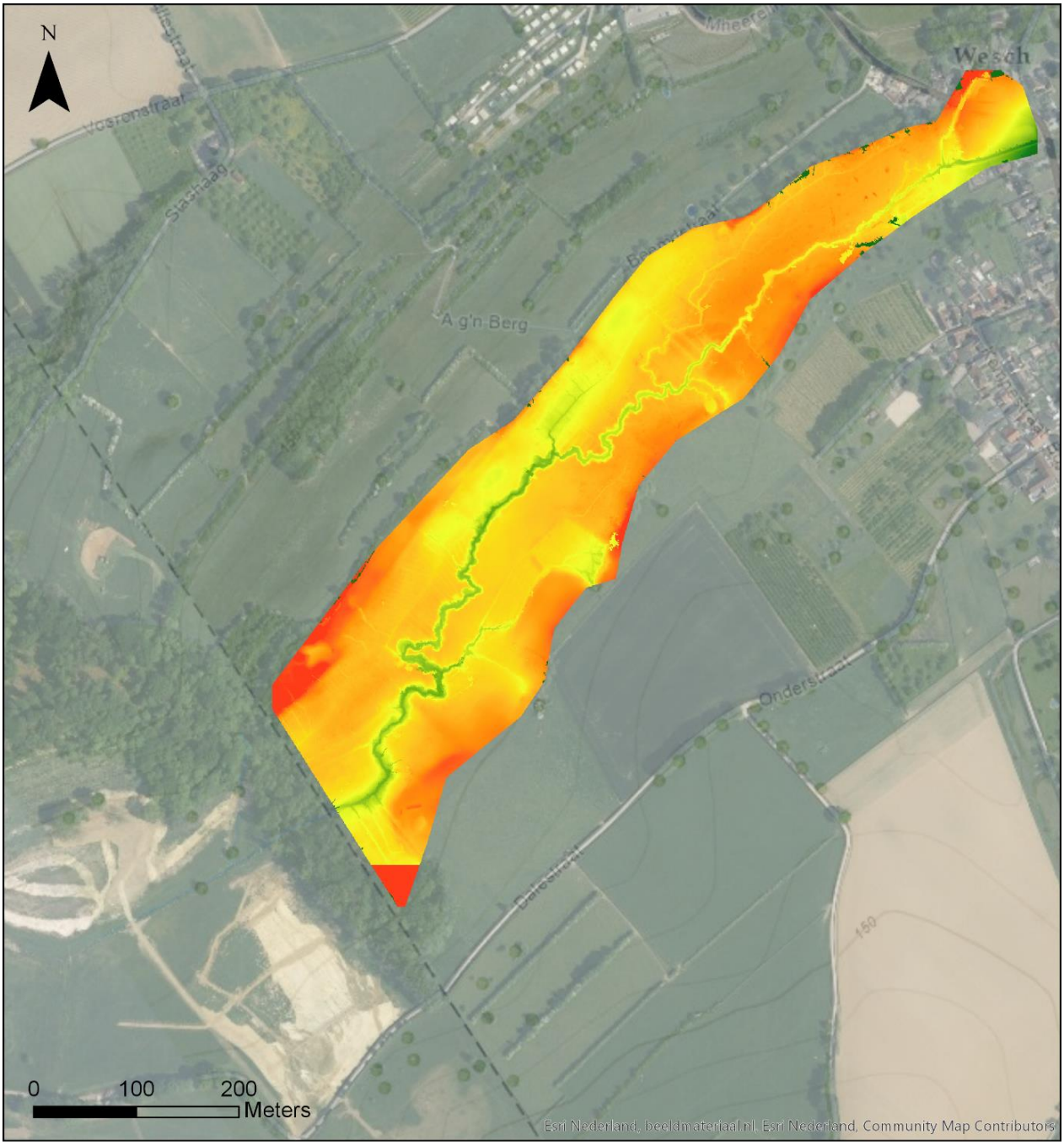
Uit Figuur 1.4 komt duidelijk het steile verhang van de Noorvallei (circa 10m/km) naar voren en is goed te zien hoe de mate van kronkeligheid van de geul van de Noor verandert over het lengteprofiel. Wat opvalt, is dat er ter hoogte van het zuidoostelijke droogdal dat nabij Noorbeek bij het dal van de Noor komt een relatief steile gradiënt in het maaiveld van de dalbodem van de Noor voorkomt (Figuur 1.4). In Figuur 1.5 is een relatief hoogtemodel van de Noor weergegeven, waarbij de grootschalige gradiënt van het Noordal van het AHN4 is afgetrokken. Door deze bewerking is duidelijk te zien dat de Noor diep ingesneden ligt in de aangrenzende beemden. Daarnaast komen ook de verschillende zijlopen van de Noor duidelijk naar voren en zijn relatieve laagten in het gebied goed te herkennen.



Figuur 1.3 *Mogelijke effect van verdere insnijding van de Noor op de grondwaterstromingen in de Noorbeemden (Tiernego, 2010).*



Figuur 1.4 *Maaiveldhoogte van de vallei van de Noor (AHN4).*



Figuur 1.5 *Relatief hoogtemodel van de Noor waarbij de grootschalige gradiënt van het Noordal van het AHN is afgetrokken.*

1.3.2 Beektype en morfologie

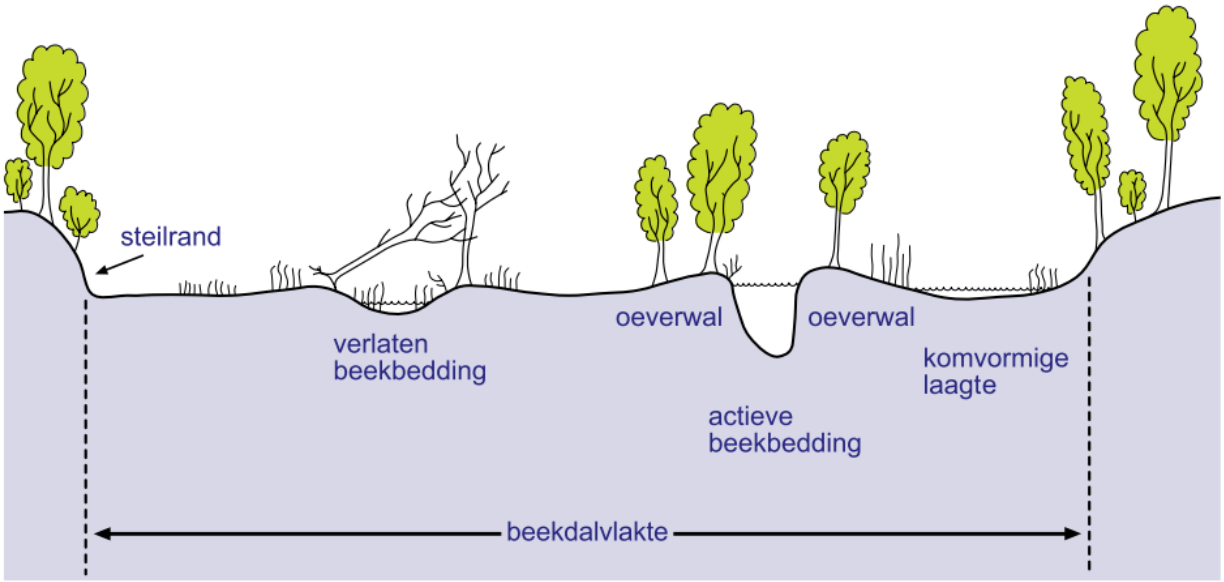
De Noor behoort tot het KRW-type R17: snelstromende bovenloop op kalkhoudende bodem, een veelvoorkomend KRW-type in het heuvelland. De beek heeft één (hoofd)geul waaraan een aantal kleinere zijlopen is verbonden. De zijlopen zijn voornamelijk te karakteriseren als bronbeek (KRW-type R2). De Noor heeft het karakter van een morfologisch actieve beek, waarin zowel sedimentatie als erosie voorkomt. De bochtigheid van de beek verandert over de loop van relatief recht naar zeer bochtig, waar er bij de laatstgenoemde soms ook sprake is van actieve meandervorming. De Noor voldoet grotendeels aan de generieke doorsnede van een beekdalvlakte van Stowa (Figuur 1.6). Binnen het beekdal zijn geen indicaties te vinden van verlaten beekbeddingen (van de hoofdgeul) aan de oppervlakte, maar er is wel een aantal zijlopen te vinden met een soortgelijke structuur als in Figuur 1.6. Verder heeft de Noor geen duidelijke oeverwallen en slechts een paar kleinere komvormige laagten (te zien in Figuur 1.5), omdat het beschikbare materiaal ter transport voornamelijk bestaat uit löss (in eerste instantie door de wind afgezette fijne

sedimenten in voornamelijk de silt-fractie). Wanneer de beek overstroomt, wordt het materiaal relatief effen verspreid over de overstromingsvlakte (de Noorbeemden) waarbij geen grote reliëfverschillen ontstaan. Tijdens een overstroming blijft het grind en eventueel grof zand voornamelijk in de geul, waar ze in benedenstroomse richting worden getransporteerd en waardoor er dus erosie en sedimentatie optreedt in de geul tijdens piekafvoeren.

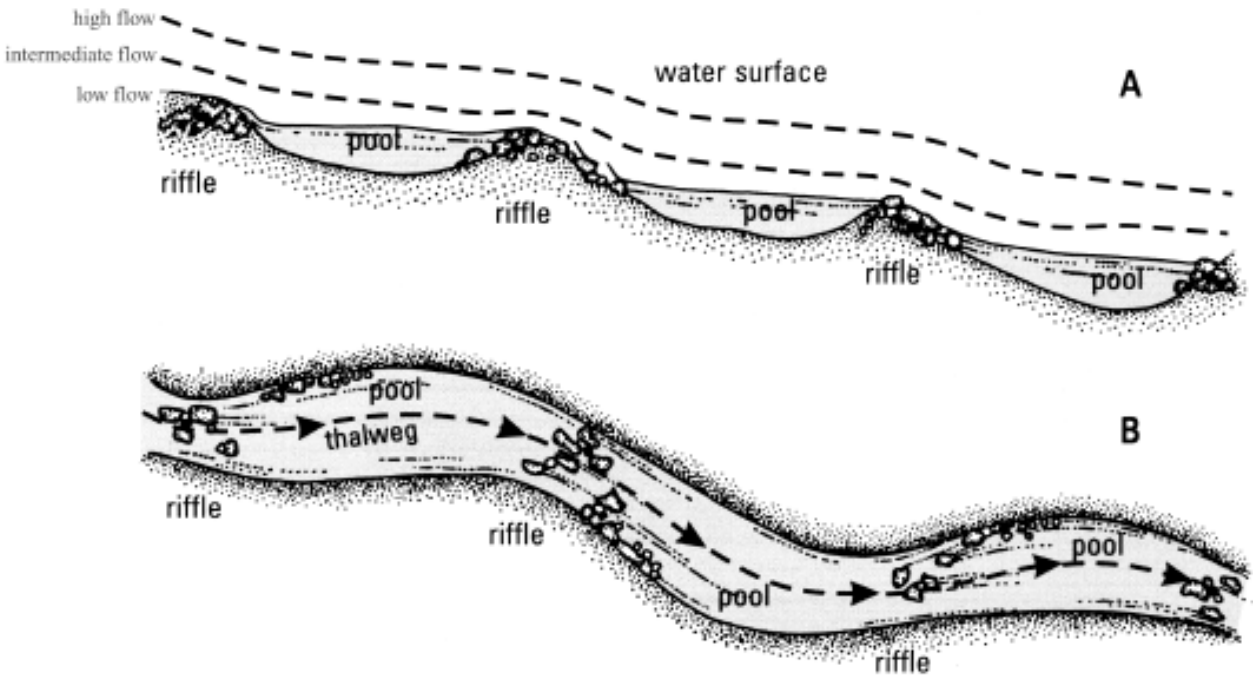
KRW Type R17 (Stowa, 2005)
Snelstromende bovenloop op kalkhoudende bodem

Nauwelijks meandering, breedte 2 tot 3 meter. Dwarsprofiel onregelmatig, met veel grindbankjes en overhangende oevers. Ook rustige plekken met aanslibbing, plaatselijk stroomversnellingen met grind en keien. Organisch materiaal aanwezig in de vorm van bladpakketten, slibzones, takken en boomstammen. Plaatsen met een sterk reliëf in het heuvelland. Vaak bosrijk. Gevoed vanuit dieper grondwater.

Het grind dat in de geul aanwezig is, vormt een riffle-pool morfologie (zie Figuur 1.7 en Figuur 1.8). Dit type morfologie is een afwisseling van banken bestaande uit grovere sedimenten zoals grind (riffles) en kolkgaten, waarin voornamelijk fijnere sedimenten liggen (pools). De banken staan doorgaans droog en komen alleen tijdens piekafvoeren onder water te staan; de pools zijn ook bij lage afvoeren watervoerend. In meanderende systemen komen de pools voornamelijk voor aan de buitenkant van de bocht en de riffles op de overgang van de binnenbocht naar de volgende binnenbocht benedenstrooms (Figuur 1.8). De meeste erosie van de oevers vindt tijdens piekafvoeren plaats op locaties waar pools zich bevinden.



Figuur 1.6 *Generieke doorsnede door een beekdal met de belangrijkste terreinvormen (Stowa, 2020).*



Figuur 1.7 *Riffle-pool morfologie (North Carolina Cooperative Extension Service, 1999).*

Figuur 1.8 *Riffle-pool morfologie in de Noor.*

2 Theoretisch kader

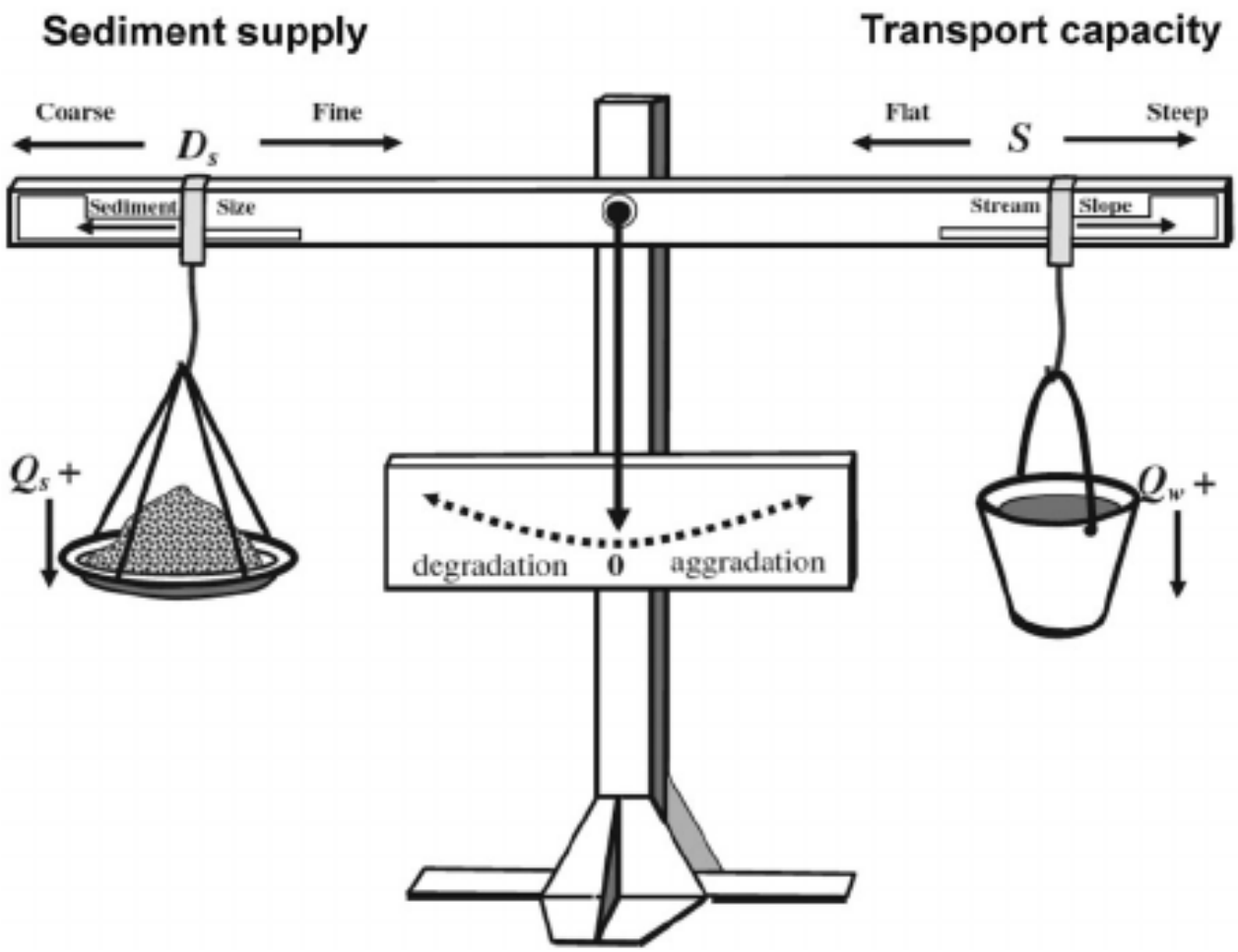
2.1 Generieke genese Zuid-Limburgse beekdalen

Zuid-Limburgse beken of kleine rivieren zoals de Noor en de Geul en aangrenzende rivieren zoals de Worm in Duitsland hebben verschillende rivierpatronen gekend sinds het Laatglaciaal, de laatste fase van de laatste ijstijd (De Moor et al., 2008; Maaß & Schüttrumpf, 2019). Tijdens het Laatglaciaal werden er grof grind, zand en (op lokale schaal) kleiige overstromingssedimenten afgezet. Doordat veel van het achterland nog maar gedeeltelijk begroeid was en er weinig tot geen bodem aanwezig was, was zowel de toelevering van sediment als afstromend oppervlaktewater naar de rivierdalen groot in deze tijd. Hier kwam verandering in tijdens het begin van de huidige warme periode: het Holoceen. Door een toename van de temperatuur, het verdwijnen van diepe seizoenale vorst en een verandering in het neerslagpatroon raakte het gebied geleidelijk bedekt met een dicht bos, met vochtige vegetatietypen in de rivierdalen en kon er bodemvorming plaatsvinden. Als gevolg hiervan kwam er minder sediment in de dalen terecht en werd ook oppervlakkige afvoer geringer en meer gedempt, met als gevolg lagere piekafvoeren in de rivierdalen. Op basis van onderzoek in o.a. het Geuldal, maar ook vergelijkbare riviersystemen in Duitsland (De Moor et al., 2008; Houben, 2003), is gebleken dat tijdens het begin en het midden van het Holoceen (van 11.700 tot 2500 jaar geleden) relatief weinig sediment beschikbaar was in de rivierdalen en dat er enkel fijne overstromingsafzettingen werden afgezet en er lokaal veenvorming plaats kon vinden. Vergelijkbare afzettingen zijn ook terug te vinden in het Noordal (Kessels, 2012; De Mars & Van der Weijden, 2021), hoewel de precieze ouderdom hiervan nog niet is vastgesteld. Het is aannemelijk dat rivieren als de Geul (De Moor et al., 2008) en de Noor in deze tijd relatief rustige en stabiele rivieren waren. Dit veranderde toen de menselijke activiteit in het gebied toenam. Uit vegetatiereconstructies blijkt dat tijdens de Late Bronstijd (1000-700 v.Chr.) de eerste landbouw en lokale ontbossing plaatsvonden. Het was pas echter tijdens de Romeinse tijd dat er grootschalige ontbossing in de regio plaatsvond (De Moor et al., 2008; Bunnik, 1999), wat leidde tot een toename van fijnkorrelige overstromingssedimenten in de valleien. Na een korte periode van hernieuwde bosvorming tijdens de vroege Middeleeuwen vond er tijdens de Hoge en Late Middeleeuwen wederom grootschalige ontbossing plaats (Bunnik, 1999), waarbij alleen de steilste hellingen en armste bodems bebost bleven (De Moor et al., 2008). Deze fase van ontbossing heeft geleid tot grootschalige bodemerosie, waarbij veel van de aanwezige lösssedimenten als colluviale en overstromingssedimenten in de rivierdalen terechtkwamen (De Moor et al., 2008; Houben, 2003). Deze konden zich blijven ophogen tot de hoogte van de maximale waterstanden in de dalbodem. De hoge ligging van de Noorbeemden ten opzichte van de rivierbedding is dan ook voor een deel toe te schrijven aan deze fase van instabiliteit in het riviersysteem als gevolg van de door de mens veranderde water-sediment-balans. Het overige deel van de diepe ligging is veroorzaakt door de insnijding van de Noor als gevolg van piekafvoeren. Deze piekafvoeren kunnen o.a. veroorzaakt door een toegenomen mate van bebouwing en verharding, veranderingen in landgebruik op de hellingen en plateaus, vermindering van bodemberging en riooloverstorten. De diepe ligging van de geulen in de Zuid-Limburgse riviersystemen, zoals de Noor, zorgt ervoor dat er hoge afvoeren en stroomsnelheden in de geulen kunnen voorkomen, wat leidt tot verdere insnijding van de bedding waardoor er sprake is van een zelfversterkend effect. Bovenstaande laat zien dat veranderingen in zowel de toevoer van water als sediment belangrijke sturende factoren zijn in de morfologie van het beeksysteem van de Noor en dat deze sturende factoren sterk reageren op (veranderingen in) landgebruik.

2.2 Water-sediment-balans

Erosie en sedimentatie zijn twee belangrijke processen in riviersystemen en hebben een directe invloed op de rivierdynamiek. Een concept dat is ontwikkeld om te begrijpen hoe erosie en sedimentatie elkaar beïnvloeden, is gegeven door Lane (1955): de zogenaamde *Lane's sediment balance* (Figuur 2.1). Het diagram richt zich op de balans tussen de hoeveelheid sediment die een rivier binnenkomt (sedimenttoevoer) en de hoeveelheid sediment die de rivier verlaat (sedimentafvoer). Deze balans is van cruciaal belang voor

het begrijpen van de dynamiek van de rivier en het beheersen van de erosie- en sedimentatieprocessen. Als de sedimenttoevoer groter is dan de sedimentafvoer, kan dit leiden tot sedimentophoping in de rivier, wat de stroomsnelheid weer kan beïnvloeden, de waterafvoer kan verminderen en zelfs overstromingen kan veroorzaken. Aan de andere kant kan een gebrek aan sedimenttoevoer leiden tot erosie van de rivierbedding, waardoor de stabiliteit van de oever wordt aangetast en de rivier zijn natuurlijke loop kan veranderen. Kennis over de balans tussen erosie en sedimentatie in het heden en in het verleden is essentieel voor het beheer van beek- en riviersystemen. Daarnaast kan deze kennis ons helpen met het voorspellen van de evolutie van de rivier op lange termijn en bij het ontwikkelen van strategieën en maatregelen.



Figuur 2.1 *Lane's sediment-diagram, dat de balans tussen sediment en water weergeeft.*

De recente insnijding van de Noor zou in principe verschillende oorzaken kunnen hebben. Een afname in de hoeveelheid of de grootte van het sediment dat getransporteerd wordt, zou hiervoor een oorzaak kunnen zijn. Een andere verklaring zou een toename kunnen zijn in de (vallei) gradiënt of de mate van afvoer van de rivier. Vooral de afvoer van de Noor was de afgelopen decennia op piekmomenten zeer hoog door een combinatie van het landgebruik in het achterland dat een snelle waterafvoer naar het dal mogelijk maakt, de toename van bebouwd oppervlak en verharding en de overstorten van de bergbezinkvoorziening bij Wesch. Als gevolg van de toegenomen piekafvoeren nam de erosiecapaciteit van de Noor toe, wat resulteerde in een toename van erosie. Dit heeft geleid tot verbreding, verdieping (insnijding) of een combinatie van beide van de geul van de Noor. Met name de insnijding zorgt voor een verlaging van de drainagebasis van de Noor, wat leidt tot verlaging van de grondwaterspiegeldiepte nabij de geul en daarmee draagt dit bij aan de verdroging van de beemden (Figuur 2.2).

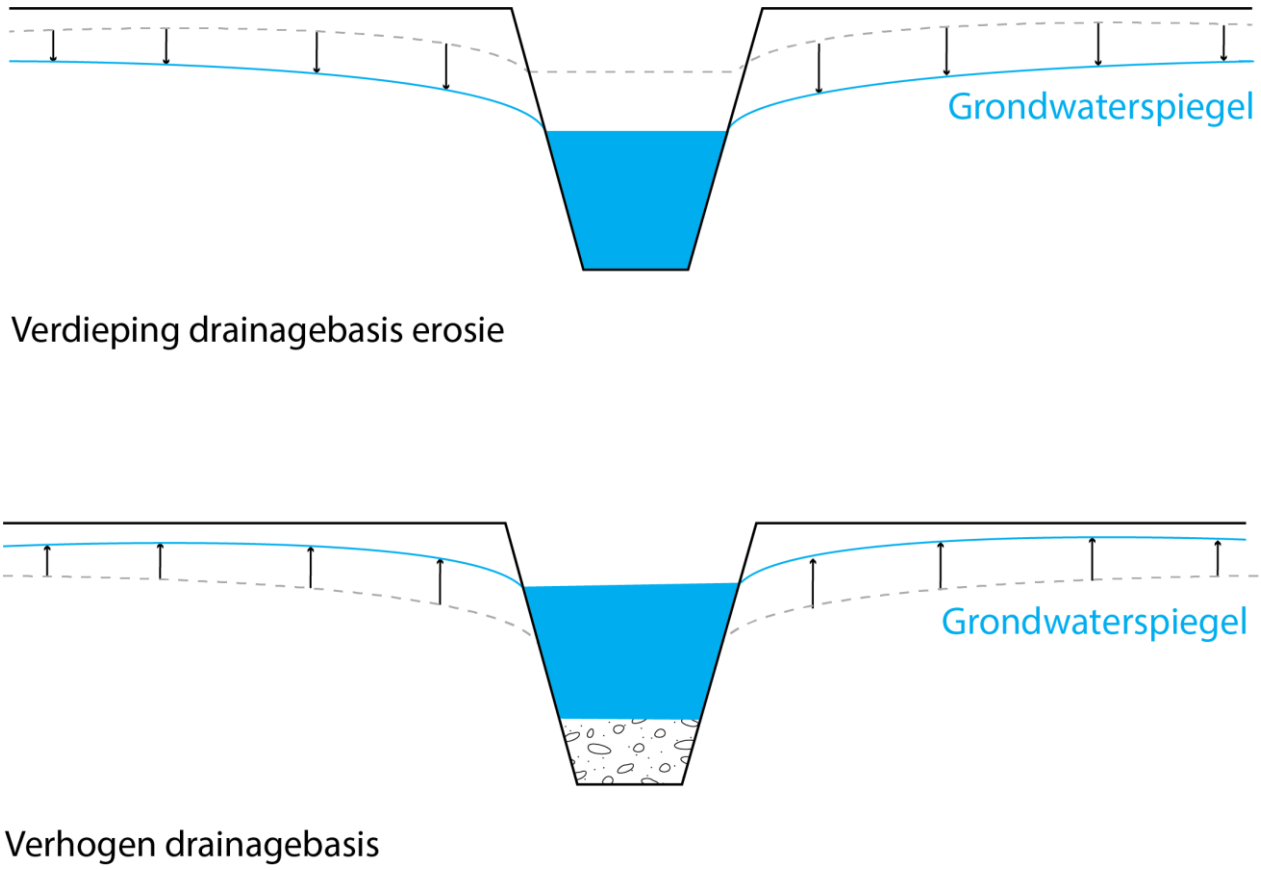
Het Lane's diagram laat zien waar de mogelijkheden liggen in het beeksysteem om (verdere) insnijding van de Noor tegen te gaan. Hierbij kan de oplossing gevonden worden door:

a. De sedimenttoevoer te vergroten;
b. De korrelgrootte van het sediment in de beekbedding te vergroten;
c. De gradiënt van de beekgeul te verlagen;
d. De afvoer door de beekgeul te verlagen.

Het uitvoeren van (een combinatie van) de onderstaande mogelijke maatregelen kan eraan bijdragen om bovenstaande parameters in de sediment-waterbalans te beïnvloeden:

I) Suppletie van sediment in beekbedding, actieve of passieve vorm (a, b)
II) Toename van de sinuositeit van de beek in rechte delen (c)
III) Geul verbreden (d)
IV) Water langer vasthouden in brongebieden door verandering in landgebruik (d)
V) Herbebossen van helling om aanvoer vanuit achterland te vertragen (d)
VI) Saneren van overstorten (d)
VII) Bodemberging (landbouw)percelen vergroten (d)
VIII) Verminderen afstroming uit stedelijk/verhard gebied (d)

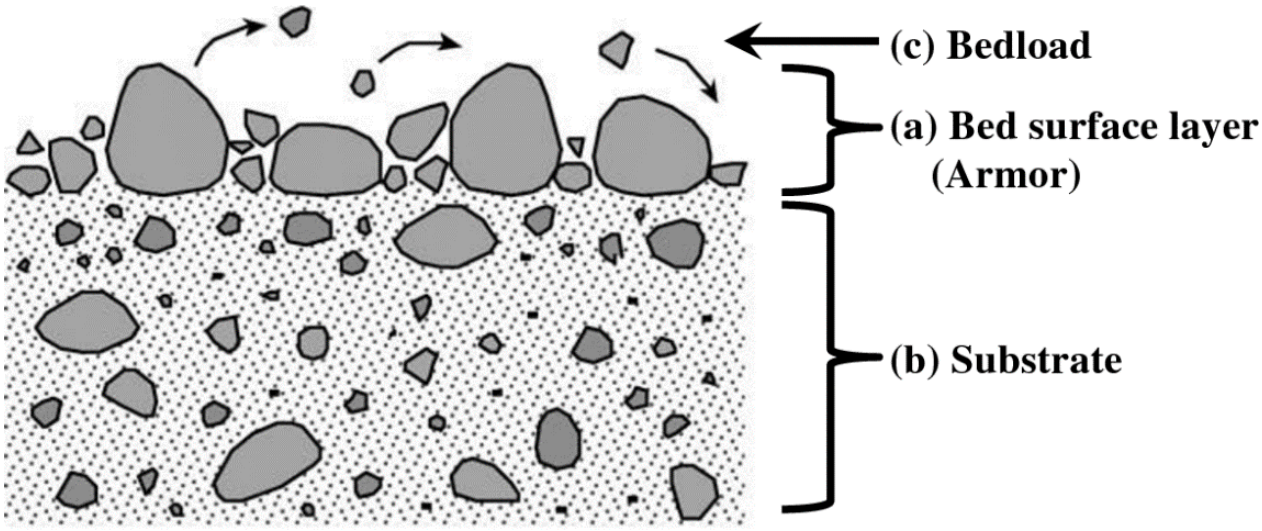
Aanvullende mogelijke maatregelen zijn o.a. beschreven door Campuzano Izquierdo (2019) en de Mars & Van der Weijden (2021). In deze studie worden twee mogelijke oplossingsrichtingen verkend om verdere verdroging van de Noorbeemden door insnijding van de Noor te voorkomen, namelijk het verlagen van de piekafvoeren (mogelijk door een combinatie van de bovenstaande maatregelen) en het versterken en verhogen van de bedding van de Noor door suppletie. In deze studie ligt de focus op deze maatregelen omdat ze te realiseren zijn in de dalvlakte van de Noor zelf, maar hier wel zo min mogelijk impact hebben op de beemden.



Figuur 2.2 *Schematische weergave van het verhogen van de drainagebasis door ophoging van de bedding van een geul.*

2.3 Bed armor

Een belangrijk concept bij het tegengaan van verdere insnijding van de bedding van de Noor is de zogenaamde 'bed armor' (Figuur 2.3). Bed armoring verwijst naar het fenomeen waarbij de rivierbedding bedekt is met een laag van grotere, stabielere sedimenten, zoals grof grind, stenen of keien. Deze laag fungeert als bescherming voor het onderliggende substraat, dat bestaat uit fijnere sedimenten, om erosie tegen te gaan. Hierbij speelt niet alleen de hogere weerstand tegen erosie van grovere sedimenten een rol, maar ook het absorberen en herverdelen van energie doordat de grovere sedimenten fungeren als obstakels die de stroming verminderen. De aanwezigheid van een bed armor is dan ook van belang bij het tegengaan van verdere insnijding van de rivierbedding.



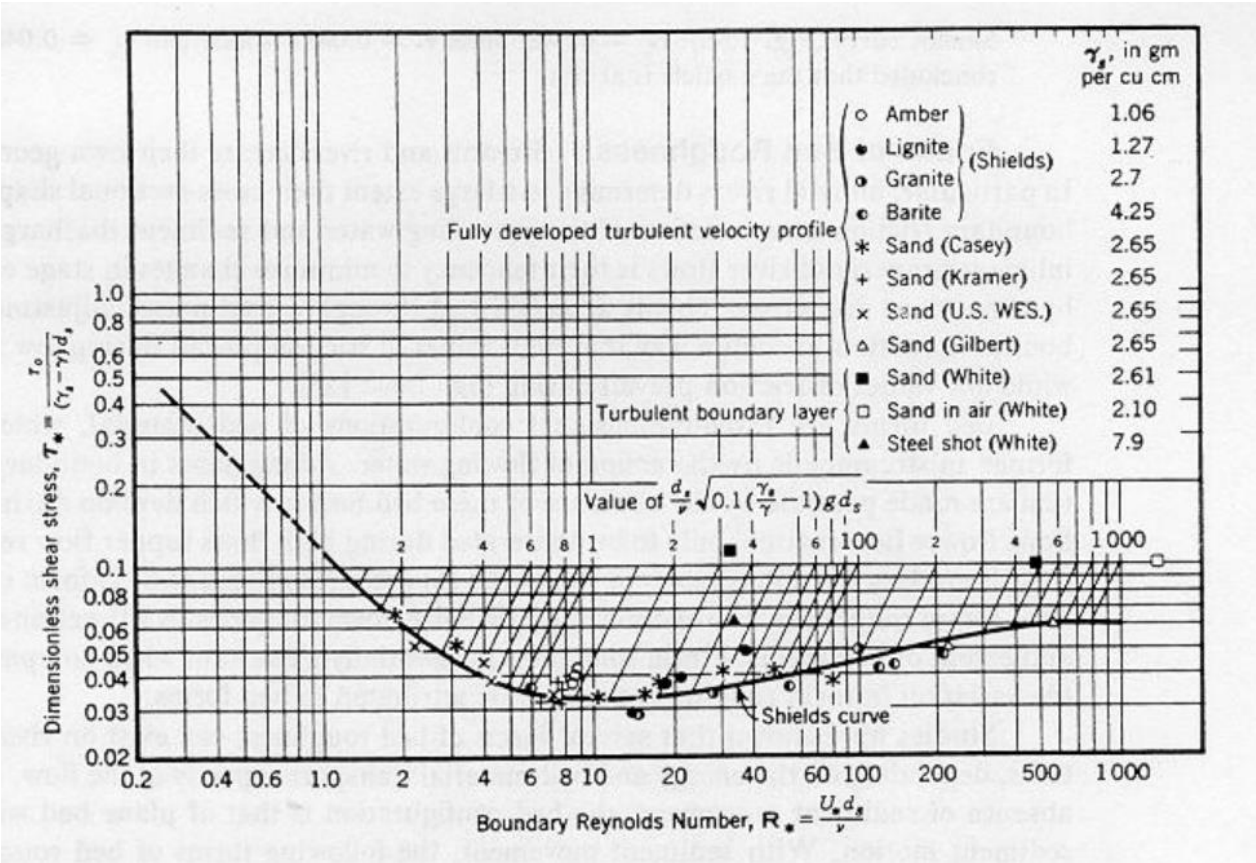
Figuur 2.3 *Schematische weergave van het Bed armoring-concept waarbij een toplaag van grove sedimenten het onderliggende fijnere substraat beschermt tegen erosie.*

2.4 Begin van beweging van beddingsediment

De mate waarin stromend water sediment kan transporteren, is een essentieel onderdeel van de geomorfologische processen in een beek. Deze zogenaamde sedimenttransportcapaciteit wordt bepaald door de eigenschappen van de stroming en het te verplaatsen sediment. Sediment komt in beweging wanneer de schuifspanning die het stromende water uitoefent op het sediment groter is dan een kritische weerstandswaarde tegen verplaatsing van dat sediment. De schuifspanning is onder ander afhankelijk van de waterdiepte en de energiegradiënt (Bijlage 4). Voor deze studie zijn de waterstanden van de peilbuis in het bovenstroomse deel van de Noor gebruikt voor de waterdiepte. De energiegradiënt (S_0) is per segment van de Noor bepaald (zie § 3.2). De verhouding tussen de weerstandswaarde van het sediment en de hydraulische kracht van de stroming wordt weergegeven door de zogenaamde Shields-parameter. Wanneer de Shields-parameter de kritische waarde voor het sedimenttype overschrijdt, komt het sediment in beweging (Figuur 2.4). Hiermee kan dus een inschatting worden gemaakt welke korreldiameter niet in transport komt bij de gemeten waterdiepte en gradiënt van de Noor. Voor verdere, uitgebreidere informatie over het sedimenttransport in beekdalen wordt verwezen naar het handboek *Geomorfologisch beekherstel* (Stowa, 2020).

Uiteraard geldt voor de berekeningen van de Shields-parameter wel de kanttekening dat de gemeten waterstanden waarop ze gebaseerd zijn maar representatief zijn voor de puntlocatie van de metingen van de peilbuis en dat deze kan toenemen/afnemen naarmate de afstand benedenstrooms toeneemt. Voor de Noor is het bijvoorbeeld zo dat er enkele zijlopen bij de geul van de Noor komen na het meetpunt van de waterstanden, waardoor de waterstand – en daarmee dus ook de sedimenttransportcapaciteit – kan toenemen. Desalniettemin geeft het gebruik van de gemeten waterstanden voor het gehele lengteprofiel van

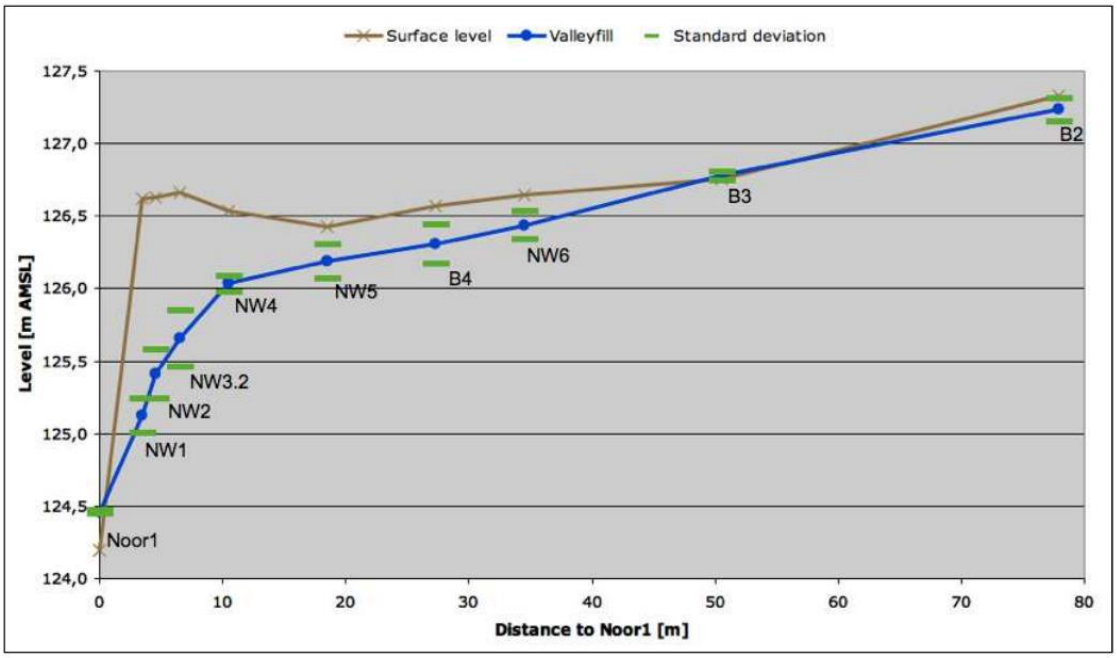
de Noor al wel een indicatie van de benodigde korrelgrootte dat in geval van mogelijke suppletie nodig is om erosie te weerstaan.



Figuur 2.4 *Shields-diagram.*

2.5 Invloedsafstand drainerende werking Noor

De invloedsafstand van de Noor op het grondwaterniveau hangt af van verschillende factoren, waaronder de diepte en breedte van de geul, de doorlatendheid van de bodem/oever en de grondwatersituatie. Het is belangrijk om op te merken dat de invloedsafstand niet uniform is en kan variëren in verschillende richtingen door o.a. variaties in de samenstelling van de oever. Het grondwaterniveau wordt sterker beïnvloed in de directe nabijheid van de geul en neemt geleidelijk af naarmate de afstand toeneemt. De exacte invloedsafstand kan het best worden bepaald middels hydrologisch onderzoek en monitoring van het grondwaterpeil in de omgeving van de geul. Een voorbeeld hiervan voor de Noor is gegeven door Kessels (2012) en is te zien in Figuur 2.5. Hieruit blijkt dat de invloedsfeer van de Noor op de grondwaterspiegeldiepte op deze locatie circa 50 meter is. Ondanks dat de invloedsfeer ruimtelijk kan variëren, geeft het een verwachting van de ordegrootte in welke zone langs de Noor het grondwater wordt verlaagd door de drainerende werking van de Noor.



Figuur 2.5 *Overzicht van de drainerende werking van de diepgelegen geul van de Noor op een zone van de aangrenzende beemden (Kessels, 2012).*

3 Methode

Om te bepalen op welke manier verdere insnijding van de Noor kan worden voorkomen en de drainagebasis verhoogd kan worden door ophoging van de bedding, is het van belang om nader inzicht te krijgen in de hydraulische karakteristieken van de Noor zoals waterstanden, afvoeren en stroomsnelheden. Daarnaast speelt de gradiënt van de bedding van de Noor een belangrijke rol in het potentieel specifiek stromingsvermogen en daarmee de erosiecapaciteit, en helpt het in beeld brengen van de sinuositeit en (potentie tot) meanderen bij het anticiperen op de morfologische gevolgen van ingrepen in de geul van de Noor. Tot slot kan het bepalen van de hydraulische geometrie van de geul op basis van de voorkomende afvoeren bijdragen aan het tot stand brengen van een streefbeeld voor een morfologisch-dynamisch evenwicht voor de Noor in de toekomst. De methodiek voor het bepalen van deze morfologische factoren zal hieronder in nader detail worden beschreven.

3.1 Waterstanden

Voor de berekeningen aan de sedimentmobiliteit van de Noor is gebruikgemaakt van de waterstandgegevens van peilbuis 15.H.71 (x=184586 y=309018) van Waterschap Limburg. De langjarige meetreeks loopt vanaf begin 2011 (zie Bijlage 1). Er is gekozen om de waterstanden van de afgelopen twee jaar te gebruiken (Figuur 4.1), omdat de meetreeks meerdere opmerkelijke plotselinge sprongen en tekenen van drift van de diver vertoont. Het corrigeren van de meetreeks lag buiten de scope van deze studie. Ook in de ingekorte meetreeks zijn plotselinge sprongen in de waterstanden te zien. Hiervoor is de meetreeks handmatig gecorrigeerd door de hoogte van de plotselinge verspringing af te trekken van de meetreeks over de periode waarin deze anomalie zichtbaar is (Figuur 4.1).

De afvoer (Q) en stroomsnelheid (V) behorende tot de waterstanden zijn berekend met de Manning-vergelijking voor een open watergang, waarbij gebruik wordt gemaakt van de breedte van de bodem van de geul, de gradiënt, side slope, waterdiepte en Manning's n (in dit geval 0,040 voor een geul zonder vegetatiebedekking, steile banken en bomen en taken in de geul) en waarvoor geldt:

$$Q = \left(\frac{C}{n}\right) AR^{\left(\frac{2}{3}\right)} S^{\frac{1}{2}}$$

en

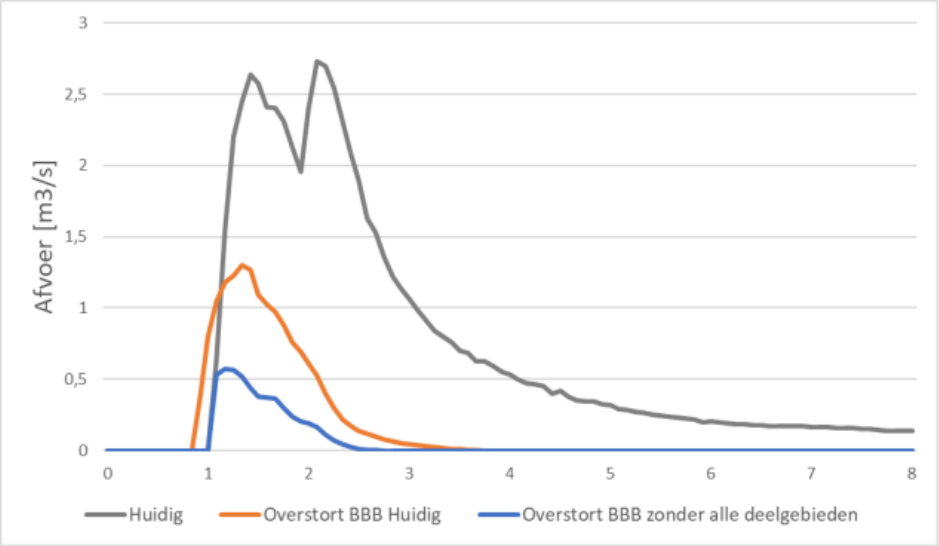
$$V = \frac{Q}{A}$$

De gekozen gradiënt is die van het segment waarin de peilbuis waarin de waterstand wordt gemeten staat, en bedraagt ca. 0,015 m/m.

3.1.1 Riooloverstort

Om de frequentie en magnitude van de riooloverstorten op de Noor te verminderen, is in 2006 een bergbezinkbassin aangelegd nabij de Wesch. Op basis van schattingen vond er tot deze tijd circa 60 keer per jaar een overstort plaats met een maximaal debiet van 0,8 m^3/s (Van Zuidam, 2007). De aanleg van het bergbezinkbassin zou de overstorten moeten reduceren tot circa zes keer per jaar met een maximaal debiet van 0,4 m^3/s (Van Zuidam, 2007). Gezien de geringe afstand tussen de overstort en de locatie van de waterstandmetingen (circa 50 meter) kan ervan uit worden gegaan dat het overgrote deel van het volume van de overstort deze locatie passeert. Met bovenstaande formule kan worden berekend dat deze afvoer bij een maximale overstort een waterstand van circa 0,195 m en een stroomsnelheid van 0,90 m/s oplevert als bijdrage aan de gemeten reeks aan waterstanden voor de locatie van de peilbuis. De berekende korrelgroottes die nodig zullen zijn om transport onder deze omstandigheden te weerstaan, worden gegeven

in hoofdstuk 4. Echter, uit de modelstudie van Nelen & Schuurmans (2021) blijkt dat de bijdrage van de overstort op de huidige totale afvoer tijdens een T25-bui aanzienlijk groter zal zijn, namelijk rond de 1,2 m^3/s. Dit zou betekenen dat er, uitgaande van de gemeten waterstandenreeks, een bijdrage van 0,37 m aan de waterstand en 1,295 m/s in de stroomsnelheid aan het totaal wordt geleverd door de overstort tijdens een T25-bui. Vergeleken met de totale afvoer voor een T25-bui zou dit betekenen dat de bijdrage van de overstort circa 44% is, terwijl dit op de veronderstelde maximale overstort van 0,4 m^3/s slechts 15% zou zijn. Om precies te bepalen wat de bijdrage van de overstort is tijdens piekafvoeren is het daarom aan te raden om zowel de magnitude als de frequentie van de overstort te gaan meten bij de uitloop van het bergbezinkbassin.



Figuur 3.1 *Overzicht van de afvoeren uit de modelstudie van Nelen & Schuurmans (2021) voor een T25-bui.*

3.2 Lengteprofiel en gradiënten

3.2.1 Lengteprofiel

Het lengteprofiel van de Noor is vervaardigd door de thalweg, d.w.z. de laagste punten van de rivierbedding, in te meten. Daar waar er op de bedding een laag silt aanwezig was, is ervoor gekozen om hier doorheen te prikken om zo de bedding grinden in te meten, omdat het aanwezige verzadigde silt zeer gemakkelijk in transport komt bij een toename van de stroomsnelheid. Alle punten zijn ingemeten op woensdag 26 april 2023 met een Trimble 12i GNSS-ontvanger. Hiermee zijn de x-, y- en z-waarden ingemeten met een nauwkeurigheid van enkele centimeters. De punten zijn vervolgens verbonden met een lijn vanaf het beginpunt tot het eindpunt, waarbij de onderlinge afstand tussen de punten is bepaald. Hierdoor is het mogelijk om de hoogte van de gemeten punten tegen de lengte van de riviergeul uit te zetten (Figuur 4.3).

3.2.2 Gradiënten

Aan de hand van de hoogtepunten is de gradiënt (hoogteverschil per meter afstand [m/m]) bepaald door het toepassen van een 'moving window'. Hierbij wordt de gradiënt op elk punt bepaald door, in dit geval, het hoogteverschil tussen het 1ste en 20ste punt te bepalen en dit te delen door de onderlinge afstand tussen deze punten. Het resultaat hiervan is te zien in Bijlage 2, Figuur B2.1. In dit figuur is vervolgens een trendlijn geplot door de gradiëntpunten om een meer geleidelijk beeld te geven van de gradiënt van de Noor.

Als laatste stap is ervoor gekozen om de gradiënt van de Noor op te delen in verschillende segmenten (Bijlage 2, Figuur B2.2). Hierbij is de mediane gradiënt van elke 25 punten genomen, dit komt neer op een

gemiddelde afstand van ongeveer 92 meter. Via deze methodologie wordt de invloed van eventuele uitschieters in de hoogtepunten voorkomen. Deze segmenten zijn vervolgens als basis genomen voor verdere sedimenttransport, sinuositeit en geulpatroonvoorspelling-berekeningen.

3.3 Sinuositeit en geulpatroonvoorspelling

3.3.1 Sinuositeit

De mate van bochtigheid van een geul kan worden beschreven met de zogenaamde sinuositeit van de geul. Voor het kwantitatief bepalen hiervan, wordt gebruikgemaakt van de sinuositeitsindex. "De sinuositeitsindex is gedefinieerd als de afstand langs de geul gedeeld door de afstand langs de as van de meandergordel. De meandergordel is de strook waarbinnen de geul meandert. Omdat de meandergordel ook een bepaalde bochtigheid kan vertonen die niet te wijten is aan het meanderproces, is de sinuositeitsindex een betere maat voor meandervorming dan de sinuositeit." (Stowa, 2020). Dit kan geformuleerd worden als:

$$P_{ind} = \frac{Afstand\ langs\ de\ geul}{afstand\ langs\ de\ as\ van\ de\ meandergordel}$$

De sinuositeit van een meanderende rivier is ten dele afhankelijk van de gradiënt van de rivier en er is daarom voor gekozen om de sinuositeit van de Noor per 'gradiëntsegment' zoals beschreven in § 3.2.2 te bepalen. De resultaten worden beschreven in §4.3.

3.3.2 Geulpatroonvoorspelling

De geulpatroonvoorspeller is toegepast op de Noor om te bepalen of de geul van de Noor het potentieel heeft voor laterale verplaatsing. In de huidige situatie laat de Noor een kronkelend patroon zien van meanders, maar is laterale verplaatsing beperkt, waarschijnlijk als gevolg van de diepe ligging. Echter, als de geul mogelijk verondiept wordt, kan dit leiden tot een toename van laterale verplaatsing als gevolg van factoren zoals een verandering in de samenstelling van de oevers of de hoeveelheid sediment dat erodeerbaar is. Daarom is het van belang om het potentiële geulpatroon van de Noor te voorspellen zodat hier rekening mee gehouden kan worden. Het geulpatroon van een beek ontstaat als resultaat van de balans tussen sturende factoren. Hierbij zijn er erosie-drijvende factoren, zoals (dominante) afvoer en terreinhelling, en erosie-beperkende factoren, zoals het sediment van de bedding en de cohesiviteit van de oever. Het potentiële specifieke stromingsvermogen (ω_{pv}) is een energieparameter die een combinatie geeft van de erosie-drijvende factoren. Deze energieparameter kan uitgezet worden tegen de erosie-beperkende factoren om een voorspelling te kunnen maken over het te verwachten geulpatroon (Stowa, 2020). Hierbij geldt:

$$\omega_{pv} = \rho g Q S_v / W_r$$

waarin ρ = dichtheid van water (kg/m^3); g = zwaartekrachtversnelling (m/s^2); Q = dominante of geulvormende afvoer (m^3/s); Sv = helling van dal of vlakte (-); Wr = breedte van een referentiegeul (m).

Deze voorspelling is gebaseerd op de clustering van bepaalde geultypen waardoor er vier bereiken in geultype te onderscheiden zijn: sterk vlechtend, zwak vlechtend of meanderend met scrolls en chutes, meanderend met scrolls en lateraal stabiel, geen banken (zie Stowa, 2020).

In deze studie is de geulpatroonvoorspelling uitgevoerd voor de mediaan van de piekafvoeren van de waterstandgegevens van de afgelopen jaren. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat deze mediaan representatief is voor de gemiddelde jaarlijkse piekafvoer (Q_{af}) als benadering van de geulvormende afvoer en bijhorende morfologische processen.

3.4 Hydraulische geometrie

Er zijn hydraulische-geometrie-relaties ontwikkeld om de dimensies van dwarsdoorsneden (breedte en diepte) van geulen in een evenwichtssituatie te berekenen. Deze relaties zijn gebaseerd op empirische vergelijkingen die via een exponentiële functie de breedte en diepte relateren aan de afvoer (Stowa, 2020). In de situatie van de Noor kunnen de breedte en diepte voor een evenwichtssituatie worden bepaald met de volgende formules:

$$W = 3 * Q^{0,5}$$

Waarbij W de breedte van de geul is in meters en Q de geulvormende afvoer in m^3/s.

$$D = 0,58 * Q^{0,4}$$

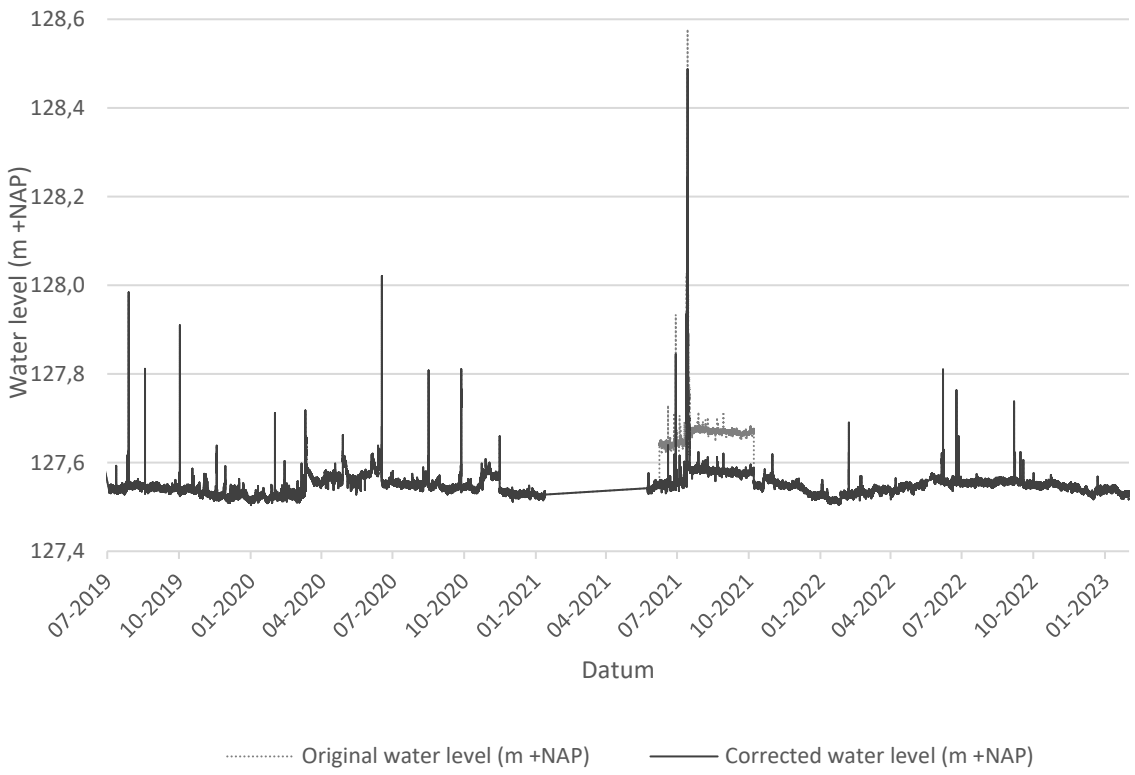
Waarbij D de diepte van de geul is in meters en Q de geulvormende afvoer in m^3/s.

Voor verdere onderbouwing van de bovenstaande relaties wordt verwezen naar het handboek *Geomorfologisch beekherstel* (Stowa, 2020).

4 Resultaten

4.1 Waterstanden

In Figuur 4.1 zijn zowel de originele als gecorrigeerde waterstanden weergegeven. Omdat morfologische veranderingen en sedimenttransport van het beddingmateriaal van rivieren voornamelijk plaatsvindt tijdens piekafvoeren (Julian & Torres, 2006), zijn de pieken in de waterstanden gezocht. Hiervoor zijn de bovenste 5% van de waterstanden geselecteerd uit de meetreeks (zie Bijlage 1). Vervolgens is van deze subset het minimum, 1e kwartiel, de mediaan, 3e kwartiel, maximum en het gemiddelde bepaald om een beknopt inzicht te geven in de piekafvoeren van de Noor in de afgelopen twee jaar (Tabel 4.1). Hieruit blijkt dat de mediaan van de waterdiepte en de bijbehorende afvoer en stroomsnelheid respectievelijk 0,35 meter, 1,1 m^3/s en 1,25 m/s zijn. De hoogste waterstanden werden bereikt tijdens het extreme neerslagevent op 14 juli 2021. Hierbij werd een maximale waterstand van 1,068 meter gemeten, wat overeenkomt met een berekende afvoer van 8.7 m^3/s en stroomsnelheid van 2,25 m/s op de locatie van de peilbuis. Het is mogelijk dat de daadwerkelijke afvoer nog hoger is geweest, aangezien het volledige meetbereik van de peilbuis is bereikt tijdens deze afvoer. Deze piek in waterstand en afvoer is ook het hoogste punt in de langjarige tijdreeks van de meetlocatie (Bijlage 1).



Figuur 4.1 *Overzicht van de waterstanden zoals gemeten door de peilbuis van Waterschap Limburg over de afgelopen jaren. De periode rond juli-oktober 2021 is gecorrigeerd voor de plotselinge verspringing in de data.*

Tabel 4.1 *Percentielen van de gemeten pieken in waterstanden van de afgelopen jaren zoals te zien in Figuur 4.1. Het is mogelijk dat de daadwerkelijke afvoer nog hoger is geweest, aangezien het volledige meetbereik van de peilbuis is bereikt tijdens deze afvoer.*

	Waterdiepte (m)	Q(m^3/s)	Stroomsnelheid (m/s)
Minimum	0,224	0,5	0,97
Q1	0,294	0,8	1,13
Mediaan	0,349	1,1	1,25
Q3	0,399	1,4	1,34
Maximum	1,068	8,7	2,25

4.2 Lengteprofiel en gradiënten

4.2.1 Lengteprofiel

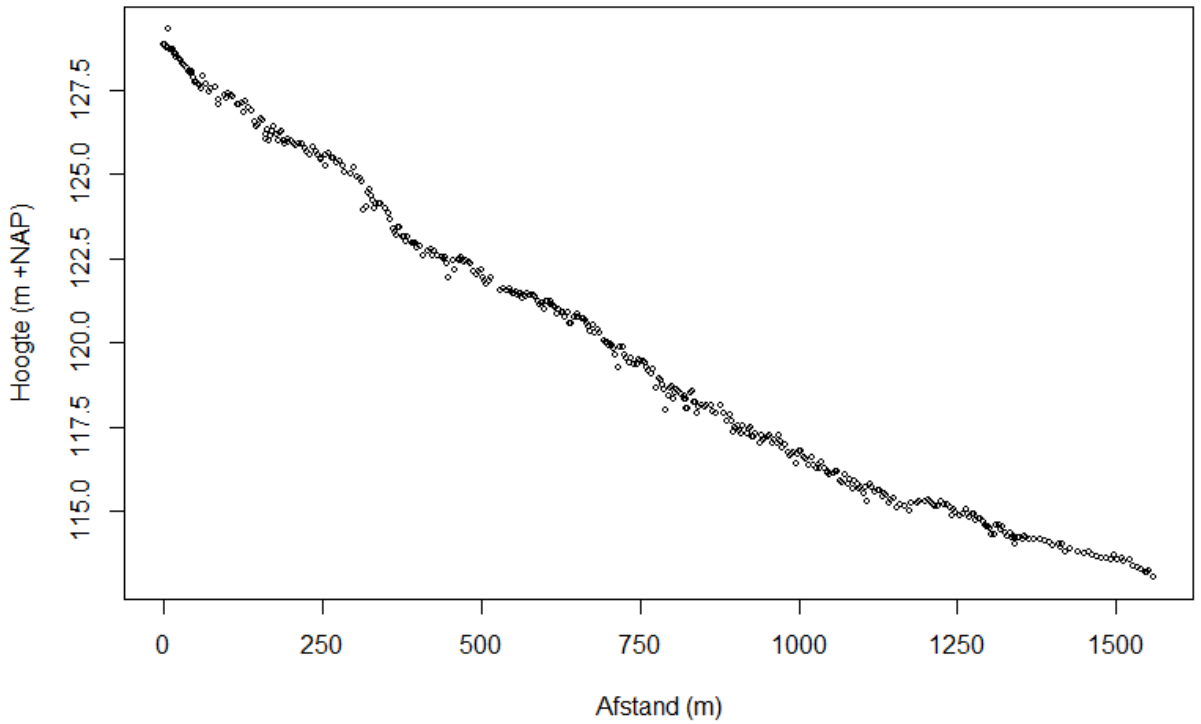
De gemeten punten van het lengteprofiel van de Noor zijn weergegeven in Figuur 4.2. In Figuur 4.3 is het lengteprofiel van de thalweg, d.w.z. de laagste punten van de rivierbedding, van de Noor te zien. Wat ten eerste opgemaakt kan worden uit de figuur, is dat op relatief korte afstand de hoogte van de gemeten thalweg punten behoorlijk kunnen variëren, soms wel in de ordegrootte van 50 centimeter. Deze variaties in hoogte op korte afstand komen o.a. voort uit de pool-riffle morfologie van de bedding, maar kunnen ook veroorzaakt worden door de aanwezigheid van ingevallen (of ingebrachte) bomen en houtpakketten.

4.2.2 Gradiënten

Uit Figuur 4.3 en Figuur 4.4 valt verder op te maken dat er vlakkere en steilere stukken in het lengteprofiel van de Noor voorkomen. Zo is de loop van de Noor tussen circa 300 en 375 meter vanaf het beginpunt relatief steil. Hier loopt de gradiënt op tot 0,0194 m/m. Opvallend is ook dat er tussen 1175 en 1345 meter een afvlakking in het lengteprofiel van de Noor voorkomt. Dit soort relatief plotselinge versteilingen en afvlakkingen van de gradiënt kan een aantal oorzaken hebben, zoals:

- Verschillen in opheffing/daling door tektoniek.
- Verschillen in erosie en sedimentatie. Dit kan bijvoorbeeld veroorzaakt worden door de extra waterafvoer of sedimenttoevoer uit een zijloop.
- Menselijke ingrepen, bijvoorbeeld het plaatsen van stuwen/dammen in de beekgeul of landgebruik in aangrenzende percelen/achterland.
- Geologische kenmerken, zoals een verandering in het substraat, en daarmee de erosiebestendigheid van de bedding/oevers, waarin een beekgeul zich bevindt.

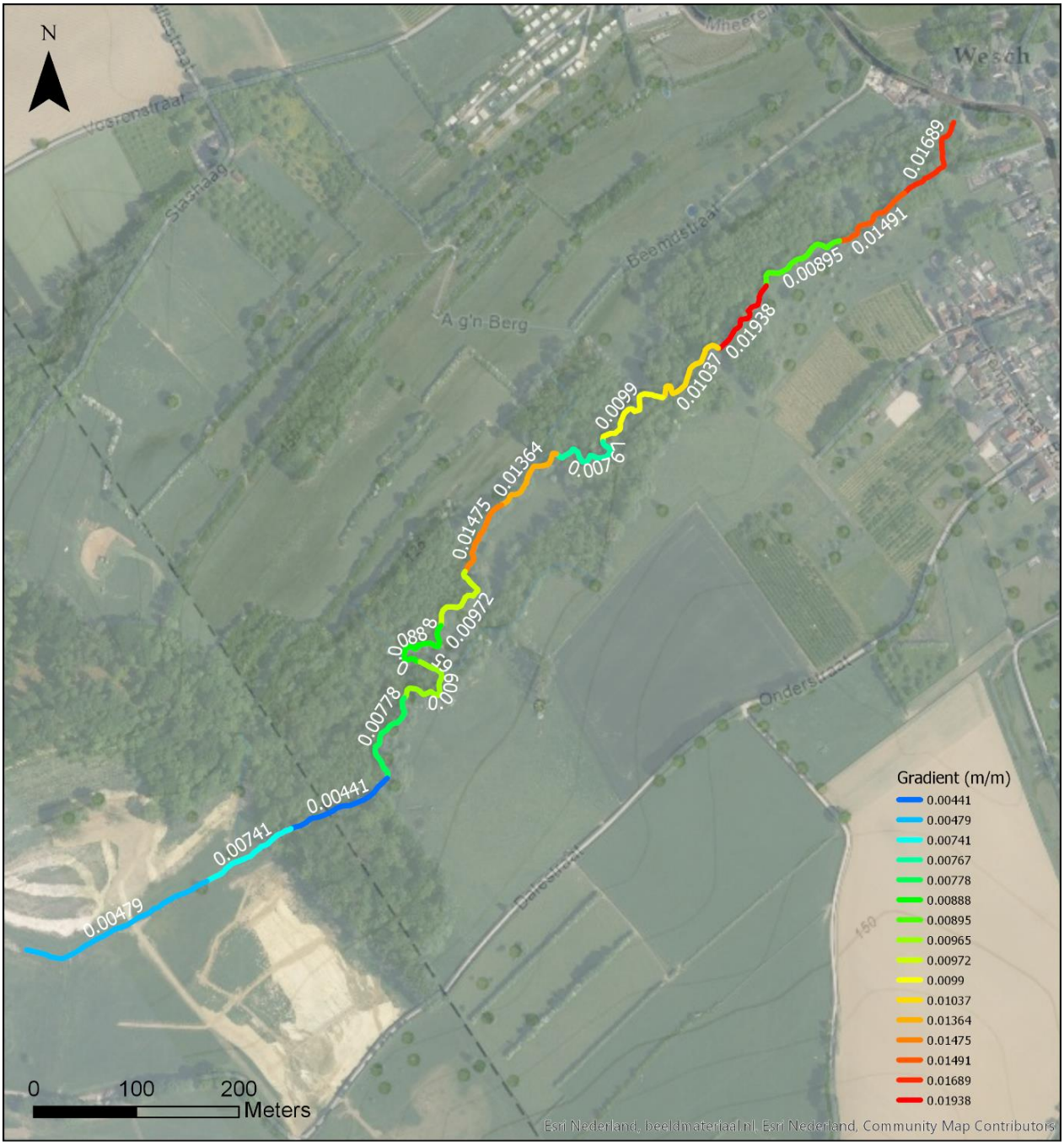
Figuur 4.2 *Overzicht van de gemeten beddinghoogte van de Noor in het lengteprofiel. Ook zichtbaar zijn de ingemeten dwarsprofielen.*



Figuur 4.3 *Lengteprofiel van de thalweg van de Noor.*

De versteiling van de gradiënt tussen de 300 en 375 meter kan bijvoorbeeld veroorzaakt zijn door de samenkomst met een groot droogdal uit het zuidoosten. Hierdoor is de afvoer van de Noor (in het verleden) benedenstrooms van dit punt ten tijde van hevige neerslag of sneeuwsmelt toegenomen en daarmee ook de erosiekracht. Als gevolg hiervan kon terugschrijdende erosie plaatsvinden, waardoor er een zone met een versteilde gradiënt is ontstaan. Daarnaast is het zeer aannemelijk dat de overgang van de kalksteen van de Formatie van Gulpen naar de zanden van de Formatie van Vaals in de ondergrond van invloed is geweest op de gradiënt (Figuur 1.2). Verschil in erosieresistentie tussen deze twee geologische formaties zal waarschijnlijk ook de (mede) oorzaak zijn geweest voor de geobserveerde versteiling in dit segment. Als gevolg van deze versteiling van de gradiënt konden de stroomsnelheid en erosiecapaciteit toenemen in dit deel, wat waarschijnlijk leidde tot diepere insnijding van de geul van de Noor.

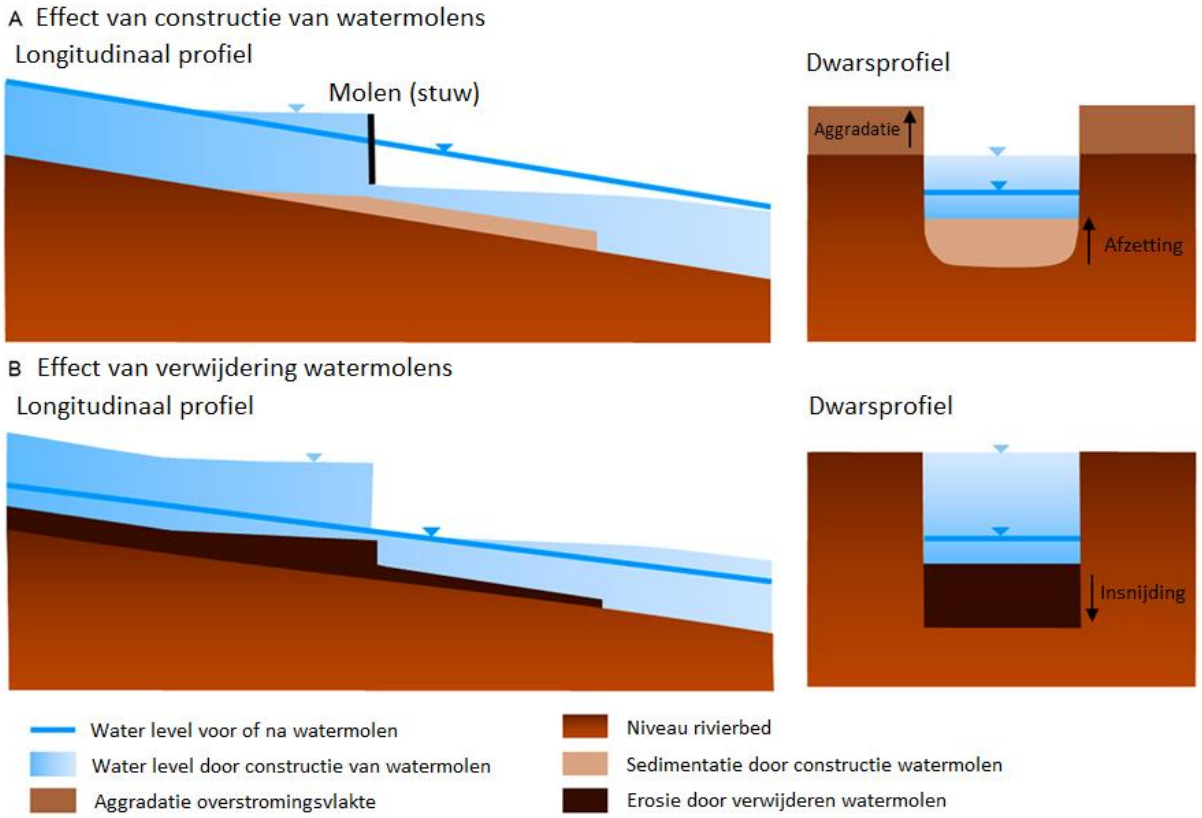
De afvlakking van de gradiënt tussen 1175 en 1345 meter kan meerdere oorzaken hebben. Zo kan de aanwezigheid van een droogdal dat vanuit het zuidoosten in deze zone komt, gezorgd hebben voor een extra input van sediment op deze locatie. Samen met een algehele afvlakking van de gradiënt van de Noor, die leidt tot een verminderde transportcapaciteit, kan dit tot een lokaal sterke afvlakking van de gradiënt zorgen. Een alternatieve verklaring is dat er bij de aanleg of het onderhoud van een gasleiding die in deze zone onder de Noorbeek doorloopt, te veel sediment is aangebracht/teruggebracht in de bedding van de Noor. Hier is binnen dit project geen uitsluitsel over te geven.



Figuur 4.4 *Overzicht van de segmenten in gradiënt van de Noor. Opmerkelijk zijn de relatief hoge gradiënten in het bovenstroomse deel en de knik in gradiënt van de Noor nabij de landsgrens.*

De lage gradiënt van de Noor in het meest benedenstroomse gedeelte (op Belgisch grondgebied) kan zeer waarschijnlijk verklaard worden door de aanwezigheid van een watermolen in het verleden, de zogenaamde 'Molen van Altenbroek' net benedenstrooms van de landsgrens. De plaatsing van een watermolen of regelwerk in een watergang zorgt voor opstuwing van het water bovenstrooms van de molen (Figuur 4.5). Hierdoor neemt de stroomsnelheid van het water en daarmee de sedimenttransportcapaciteit af. Hierdoor kan het sediment dat nog in suspensie was tot aan de opstuwingzone, nu worden afgezet. Dit resulteert in een ophoging van de bodem van de watergang (Figuur 4.5). Deze ophoging van de bedding van de watergang, in combinatie met de stuwing van het water door het waterrad, zorgt er daarnaast ook voor dat er meer sediment wordt afgezet in de overstromingsvlakte, wat leidt tot aggradatie. Door bovenstaande processen kunnen de gradiënt van de geul en de overstromingsvlakte afnemen in de bovenstroomse zone van de watermolen waarin de stuwing van invloed is. Een benadering van de lengte van deze zone, de zogenaamde *backwater-length*, kan worden bepaald door $L_b = h_c/S$, waarbij L_b de backwaterlength is, h_c de karakterestieke waterdiepte van de geul en S de gradiënt van de geul. Voor de Noorbeek betekent dit dat de

zone die onder invloed heeft gestaan van de verstoring van de watermolen tot circa 100-200 meter bovenstrooms van de watermolen/verdeelwerk van de watermolen heeft gereikt. Dit betekent dat de effecten van de opstuwing tot ongeveer de landgrens zullen hebben gereikt en dat de watermolen geen invloed gehad zal hebben op het meer bovenstroomse deel van de Noor in Nederland. Het verwijderen van de watermolen heeft een omgekeerd effect gehad op het beddingniveau van de Noor; dit is vooral benedenstrooms van de vroegere watermolen waargenomen en heeft geen invloed gehad op de diep ingesneden geul van de Noor in Nederland. Dit lag ook buiten de invloedsfeer van de verstoring van de watermolen.

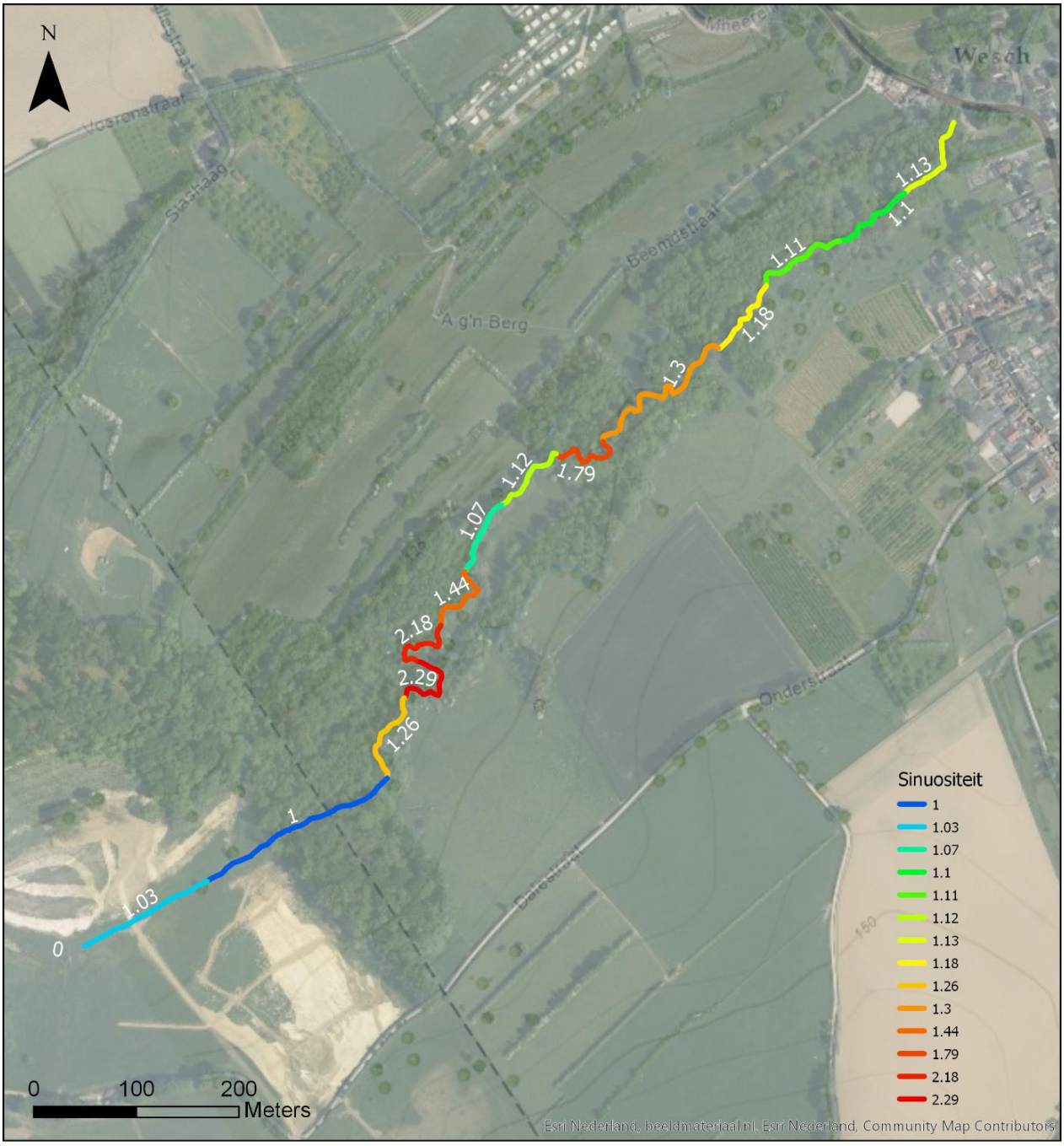


Figuur 4.5 *Effecten van watermolens op waterniveau en sedimentatie en erosie in de waterloop (afbeelding uit Maaß & Schüttrumpf, 2019).*

4.3 Sinuositeit en geulpatroonvoorspelling

4.3.1 Sinuositeit

De sinuositeit van een rivier is ten dele afhankelijk van de gradiënt van de rivier en er is daarom voor gekozen om de sinuositeit van de Noor per 'gradiëntsegment' te bepalen. Wat opvalt, is dat de sinuositeit in het meest bovenstroomse gedeelte (circa 0-500 meter) relatief laag is. Vooral de zone tussen de 800 en 1050 meter kent een hoge sinuositeit van de geul. In de laatste 400 meter neemt de sinuositeit van de Noor weer af, waarbij in het gedeelte benedenstrooms van de landgrens kanalisatie van de geul een belangrijke rol speelt. Over de bestudeerde circa 1500 meter van de Noor kent deze dus aanzienlijke verschillen in sinuositeit. Oorzaken hiervoor kunnen bijvoorbeeld de verschillen zijn in gradiënt, afvoer, korrelgrootte van het beddingsediment of de samenstelling van de oevers. Een voorbeeld is de overgang tussen de Formatie van Gulpen en Vaals, die een rol kan spelen in de toename van de sinuositeit.

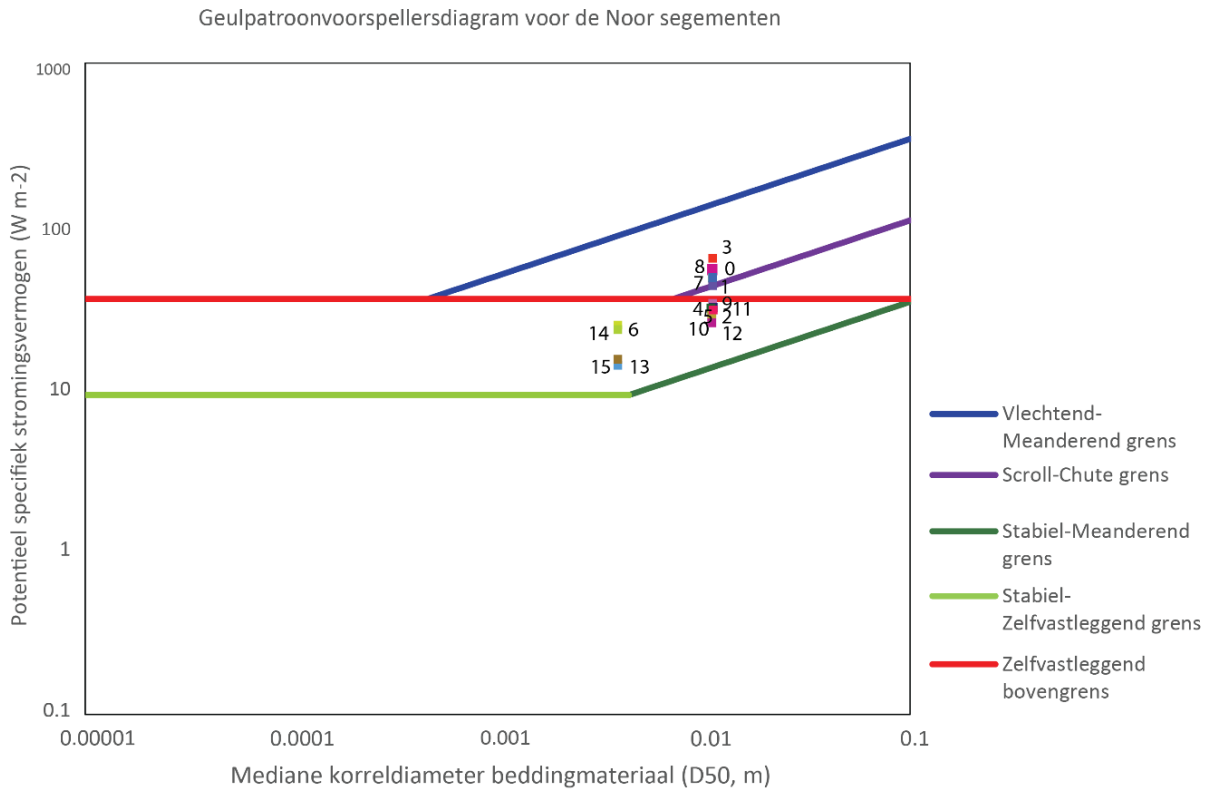


Figuur 4.6 *Overzicht van de sinuositeit van de geul van de Noor.*

4.3.2 Geulpatroonvoorspelling

Wanneer er wordt gekeken naar de geulpatroonvoorspeller (Figuur 4.7) voor de verschillende segmenten, is te zien dat voor een geulvormende afvoer vrijwel alle segmenten van de Noor of in het bereik van de stabiel meanderende rivieren, of die van meanderend met scrolls en chutes plotten. De geulpatroonvoorspeller geeft hiermee een indicatie over de relatief hoge stromingsvermogens en daarmee erosiepotentie die gehaald kunnen worden tijdens piekafvoeren. Uit de voorspeller blijkt dat er over de gehele loop van de Noor potentie is tot laterale verplaatsing (en erosie) van de geul, ondanks de relatief cohesieve oevers en grindrijk beddingmateriaal. De grenzen tussen de verschillende bereiken in het diagram moeten niet gezien worden als harde grenzen, het verloop van geulpatronen is namelijk geleidelijk. Omwille van de leesbaarheid van de figuur is de 95%-zekerheidsinterval per punt uit de geulpatroonvoorspeller van Stowa (2020) achterwege gelaten. Er moet bij het nemen van maatregelen in de Noor dus rekening gehouden worden met de mogelijkheid tot laterale verplaatsing en erosie van de geul gezien het potentieel specifiek

stromingsvermogen dat behaald kan worden. Alleen als de hoogte van de geulvormende afvoer afneemt, zal er bij enkele van deze segmenten geen potentie meer zijn voor laterale verplaatsing en erosie.



Figuur 4.7 *Geulpatroonvoorspeller voor de geulvormende afvoer van de Noor bij een Silt-plus-klei percentage van 87. NB De grenzen tussen de verschillende regimes zijn geen harde grenzen, maar stellen een (geleidelijke) overgang voor.*

4.4 Hydraulische geometrie

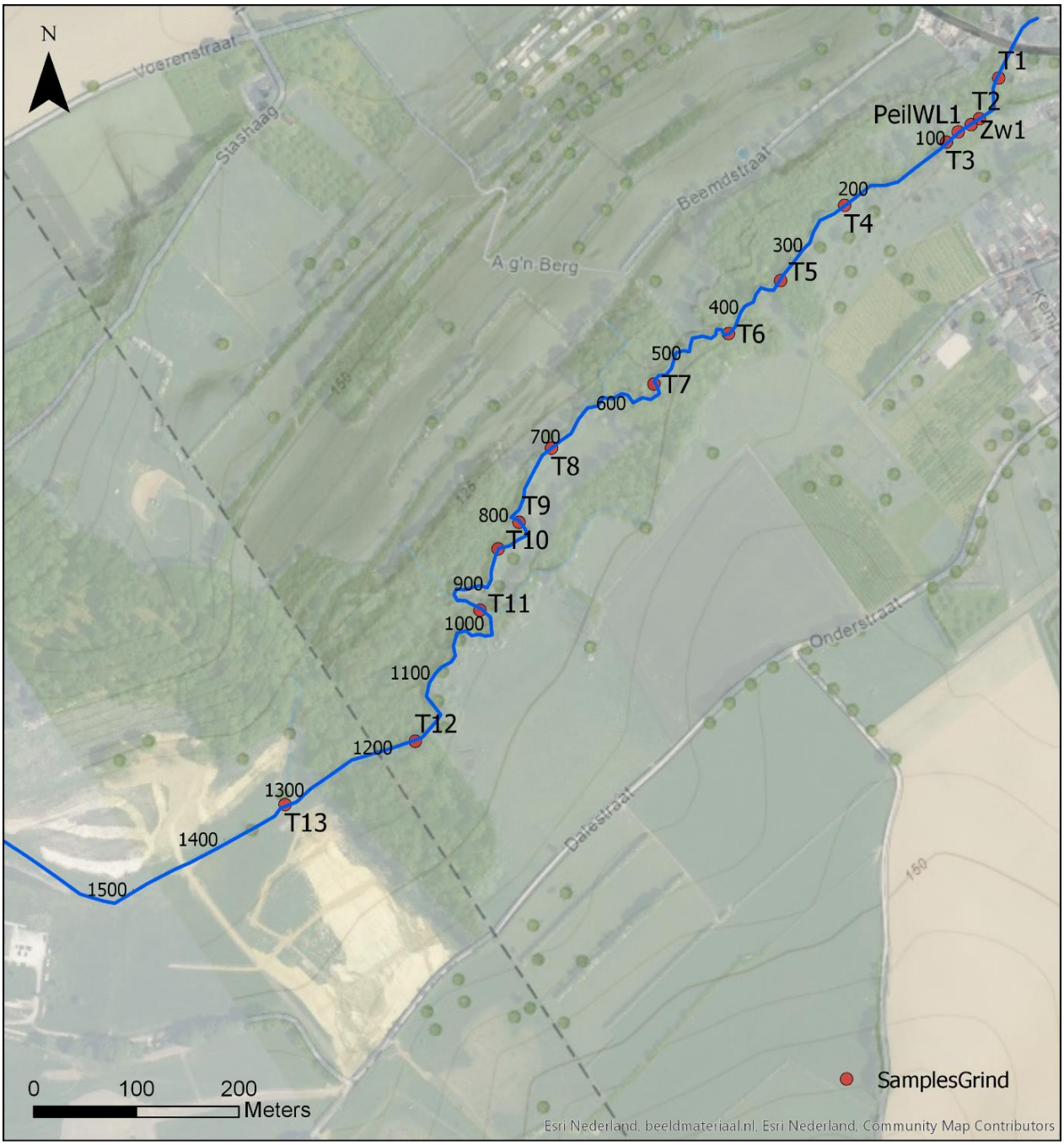
Op basis van de empirische relaties voor de breedte en diepte voor een geul in evenwichtscondities kan aangenomen worden dat voor de huidige geulvormende afvoer van 1,1 m^3/s van de Noor een breedte van circa 3 meter en diepte van circa 0,6 meter passend zullen zijn. Dit betekent dat een breedte/diepte verhouding van 5 aangehouden dient te worden bij het implementeren van mogelijke maatregelen. Wanneer dit wordt vergeleken met de huidige hydraulische geometrie, dan blijkt dat vooral de diepte van de huidige geul van de Noor te groot is, waarbij deze wel op kan lopen tot meer dan 2 meter. Wanneer het lukt om de piekafvoeren te reduceren, kan op basis van de formules in § 3.4 een inschatting gegeven worden van de benodigde dimensies van de nieuwe geul bij ophoging van de bedding. Wanneer het bijvoorbeeld lukt om de piekafvoeren te reduceren tot maximaal de mediaan van de afvoeren die het huidig aanwezige sediment in de Noor kan weerstaan (circa 0,4 m^3/s), zullen een passende breedte en diepte van de geul respectievelijk circa 2 en 0,4 meter zijn.

4.5 Samenstelling beddingmateriaal

Om in te schatten bij welke waterdiepte, stroomsnelheid en afvoer er transport of erosie van beddingsediment optreedt in de geul van de Noor, zijn er over het lengteprofiel van de Noor op dertien verschillende locaties grindmonsters genomen Bijlage 3). Van de grindmonsters zijn de lithologie, afronding, D_{50} grindklasse en D_{90} van het grind bepaald. De D_{50} van het grind is zonder verdere analyse niet nauwkeurig

te bepalen in het veld. Daarom is ervoor gekozen om de grindklasse van de meerderheid van het aanwezige grind als D_{50} aan te nemen, waardoor er een bandbreedte ontstaat waarbinnen de D_{50} van het grind zal liggen. Opvallend uit de resultaten van de grindmonsters is locatie T5. Het sediment op deze locatie is zeer waarschijnlijk grind dat gesuppleerd is tijdens een eerdere proef om erosie met takkenbossen en grind te beperken, aangezien zowel de afronding als de kleur/het type gesteente afwijkt van de rest van de monsters. De data van de grindmonsters (Tabel 4.2) zijn vervolgens gebruikt om een inschatting te maken van de streef waterdiepte, de stroomsnelheid en de afvoer om bedloadtransport en erosie van de bemonsterde korrelgroottes (minimale en maximale korrelgrootte van de D_{50}-grindklasse) van het beddingsediment van de Noor te voorkomen op basis van de Shields-parameter.

Over het grootste deel van de Noor ligt de D_{50} van het grind in de Matig Grof Grind-klasse. Dit komt neer op een D_{50} tussen de 5,6 en 16 mm voor het grootste deel van de Noor. Voor de D_{90} geldt in het algemeen dat de korrelgrootte tussen de 16 en 63 mm ligt, waarbij in sommige gevallen de gemeten korrelgrootte van de grofste sedimenten in de stenen fractie ligt (63-200 mm).



Figuur 4.8 *Locatie van de genomen grindmonsters van de bedding van de Noor.*

Tabel 4.2 *Overzicht van de genomen grindsamples.*

Sample nr	x	y	z	Diepte (van - tot in cm)	Lithologie	Sortering	D50 (Grind)	D90 (Grind)	D90 (Grind in mm)	Afronding
T1	184625	309071	128,69	0-10	Gz3	slecht	MGG	ZGG	50	Hoekig
T2	184606	309032	127,82	0-10	Gz3	slecht	MGG	ZGG	50	Hoekig
T3	184574	309009	127,32	0-10	Gz2	slecht	MGG	ZGG	90	Hoekig
T4	184475	308947	125,89	0-10	Gz2	slecht	MGG	ZGG	90	Hoekig
T5	184413	308874	124,07	0-10	Gz2	slecht	MGG	ZGG	55	Afgerond
T6	184362	308822	122,76	0-10	Gz3	slecht	MGG	ZGG	45	Hoekig
T7	184289	308773	121,64	0-10	Gz3	slecht	FG	ZGG	50	Hoekig
T8	184189	308710	119,97	0-10	Gz3	slecht	MGG	ZGG	67	Hoekig
T9	184158	308638	118,63	0-10	Gz3	slecht	MGG	ZGG	70	Hoekig
T10	184137	308612	118,12	0-10	Gz3	slecht	MGG	ZGG	72	Hoekig
T11	184120	308552	117,01	0-10	Gz3	slecht	MGG	ZGG	50	Hoekig
T12	184056	308425	115,27	0-10	Gz3	slecht	FG	ZGG	45	Hoekig
T13	183930	308363	114,33	0-10	Gsx	slecht	FG	ZGG	28	Hoekig

Tabel 4.3 *Maximale waterdiepte en gerelateerde stroomsnelheid op basis van de D_{50}-range (5,6-16 mm) van de grindfractie van de genomen bedding sedimenten op basis van de Shields-formule.*

	Maximale waterdiepte (m) voor sediment 5,6 mm	Maximale waterdiepte (m) voor sediment 16 mm	Maximale stroomsnelheid (m/s) voor sediment 5,6 mm	Maximale stroomsnelheid (m/s) voor sediment 16 mm	Maximale afvoer (m^3/s) voor 5,6 mm	Maximale afvoer (m^3/s) voor 16 mm
Min	0,03	0,09	0,280	0,563	0,017	0,111
Q1	0,06	0,17	0,437	0,827	0,056	0,323
Mediaan	0,0875	0,20	0,553	0,910	0,106	0,424
Q2	0,0875	0,25	0,553	1,034	0,106	0,618
Max	0,12	0,36	0,672	1,268	0,180	1,146

4.5.1 Hydrologische grenswaarden op basis van Shields

In Tabel 4.3 worden de maximale waterstanden weergegeven voor de verschillende korrelgroottes van de grindmonsters uit de Noor, waarbij het sediment volgens de Shields-formule niet in transport komt. Daarnaast worden de berekende stroomsnelheden en afvoeren op basis van de waterdiepte weergegeven (§ 3.1). De weergegeven percentielen zijn gebaseerd op de waterdieptes van de individuele gradiëntsegmenten van de Noor (Bijlage 1). In dit geval gelden de lagere waterdieptes voor de relatief steile segmenten van de Noor, waar het sediment gemakkelijker in transport komt. De sedimenten in de segmenten met een lagere gradiënt kunnen een relatief grotere waterdiepte en stroomsnelheid weerstaan voordat ze in transport komen. De Q1 van de segmenten is gearceerd weergegeven om de maximale waterdiepte, stroomsnelheid en afvoer te laten zien, waarbij in 75% van de segmenten van de Noor het sediment niet in transport zal komen. De waarden voor de maximale afvoeren op basis van deze methode vallen tussen de 0,056 en 0,323 m^3/s. Het is echter belangrijk op te merken dat deze waarden een benadering zijn en dat de werkelijke afvoeren en stroomsnelheden waarbij het beddingsediment in transport kan komen, ook afhankelijk zijn van andere lokale factoren. Uit deze gegevens blijkt dat de maximale hydrologische grenswaarden voor transport van het beddingsediment tijdens vrijwel alle piekafvoeren worden overschreden. Wanneer het transport op een locatie in de geul niet evenredig wordt aangevuld met beddingsedimenten van bovenstrooms, zal er dus waarschijnlijk erosie optreden op deze locaties tijdens piekafvoeren.

4.5.2 Benodigde korrelgroottes om erosie te weerstaan

De benodigde korrelgroottes die gebruikt dienen te worden bij een suppletie van de bedding van de Noor om transport tegen te gaan onder de huidige bandbreedte aan (piek)afvoeren zoals bepaald met de Shields-formule, is weergegeven in Tabel 4.4. Hierbij zijn de percentielen van de gemeten waterdieptes weergegeven in de kolommen en geven de rijen de percentielen van de gradiëntsegmenten weer. Hierdoor is te zien dat er afhankelijk van de gradiënt een bandbreedte aan benodigde korrelgroottes is voor dezelfde hydrologische waarden. De gearceerde korrelgroottes geven de bandbreedte van de benodigde korrelgrootte aan om transport te voorkomen voor 75% van de gemeten voorkomende waterdieptes (en dus ook afvoer/stroomsnelheid) tijdens piekafvoeren. Hieruit blijkt dat, afhankelijk van de gradiënt, er een mediane korrelgrootte nodig is tussen de 18 mm en 79 mm om transport van het beddingmateriaal te voorkomen. Dit betekent dat de benodigde sedimenten in de zeer grof grind tot stenen fractie vallen. Vooral voor het voorkomen van transport op de steilste segmenten van de Noor dienen de sedimenten voor het overgrote deel van de piekafvoeren uit de korrelgrootte fractie stenen te bestaan.

Tabel 4.4 *Benodigde korrelgrootte om transport tegen te gaan tijdens de bandbreedte aan stroomsnelheden die voorkomen op het bovenstroomse meetpunt van waterdiepte in de Noor op basis van Shields. De gekozen waterdieptes zijn op basis van Tabel 4.1. Percentielen refereren aan de bepaalde gradiëntsegmenten van de Noor. Voor overzicht per segment zie Bijlage 1.*

	Benodigde korrelgrootte in mm bij een waterdiepte van 0,25 m (v≈0.97 m/s)	**Benodigde korrelgrootte in mm bij een waterdiepte van 0,30 m (v≈1.13 m/s)**	**Benodigde korrelgrootte in mm bij een waterdiepte van 0,35 m (v≈1.25 m/s)**	**Benodigde korrelgrootte in mm bij een waterdiepte van 0,4 m (v≈1.34 m/s)**	**Benodigde korrelgrootte in mm bij een waterdiepte van 1 m (v≈2.25 m/s)**
Min	12	14	16	18	45
Q1	20	24	28	32	78,75
Mediaan	25	30	35	40	98
Q3	35,75	42,75	50	56,25	141
Max	49	59	69	79	196

Wanneer de benodigde korrelgrootte wordt bepaald om een maximale riooloverstort van respectievelijk 0,4 m^3/s of 0,90 m/s te weerstaan, laat de Shields-formule zien dat het sediment een korrelgrootte van 29 mm moet hebben. Voor de gemodelleerde bijdrage van 1,2 m^3/s en de bijbehorende waterdiepte en stroomsnelheid van 0,37 m en 1,295 m/s, zou dit een korrelgrootte van 55 mm (zeer grof grind) zijn. Het gaat hierbij enkel om de bijdrage van bergbezinkbassin en dit suppletiemateriaal zal enkel geschikt zijn voor het deel tussen de uitvoer van de BBB en de samenvloeiing met de geul van de Noor. Verder benedenstrooms zal de afvoer naar alle waarschijnlijkheid (zie ook totaal afvoer modellering Nelen en Schuurmans) een stuk hoger zijn en moet het suppletiemateriaal dus ook grover zijn.

5 Voorkomen verdere insnijding en verhoging van de Noorbedding

Voor de uiteindelijke beschrijving van een streefbeeld voor een morfologisch-dynamisch evenwicht worden er twee doelstellingen verkend, namelijk:
i) Verdere insnijding van de Noor voorkomen;
ii) Verhoging van de drainagebasis van de Noor realiseren.

Prioriteit wordt gegeven aan het tegengaan van verdere insnijding gezien de verregaande negatieve gevolgen voor de (geo)hydrologie van het Noordal en haar kwelafhankelijke flora en fauna. Daarnaast kan aanvullend gestreefd worden naar een verhoging van de drainagebasis van de Noor om hiermee een mogelijke bijdrage te leveren aan het voorkomen van verdere verdroging van de beemden. Voor het voorkomen van verdere insnijding worden de mogelijkheden verkend aan zowel de water- als sedimentzijde van de water-sedimentbalans (§ 2.2).

5.1 Voorkomen verdere insnijding van de bedding van de Noor door verlagen piekafvoeren

Om verdere insnijding van de Noor te voorkomen zonder het aanbrengen van extra sediment zal er vooral gezocht moeten worden naar maatregelen om de waterzijde van de water-sedimentbalans te beïnvloeden. Uit de resultaten van de monstername van de grindsamenstelling in de huidige bedding van de Noor kan worden bepaald dat er gestreefd moet worden naar een reductie van de maximale afvoer tussen 0,056 en 0,323 m^3/s. Dit betekent dat de piekafvoeren van de Noor, uitgaande van respectievelijk het 3^e kwartiel en de maximale waarde van de huidige afvoeren, verlaagd moeten worden met een factor 4 tot 27.

Dit zijn de waarden voor de D_{50} van de grindfractie van het beddingmateriaal en kan gezien worden als een minimum, omdat zowel 50% van de grindfractie al fijner is dan deze korrelgrootte en daarbij ook nog eens het volume aan zand en klei/silt van zandhoudende grinden bij komen.

Voor het bovenstaande geldt een aantal belangrijke kanttekening, namelijk dat:
- De stroomsnelheden zijn bepaald aan de hand van de waterdiepte op één locatie van de Noor. Hierbij wordt er dus geen rekening gehouden met veranderingen in de afvoer of geuldimensies die kunnen optreden benedenstrooms van deze locatie.
- De bandbreedte in stroomsnelheid alleen geldig is voor de grindfractie van het sediment. Hierbij wordt dus aangenomen dat de aanwezige fijnere fractie van het beddingsediment beschermd wordt tegen erosie door een uniforme laag van 'armoring' van de grovere grindfractie. Wanneer deze armoring door omstandigheden niet aanwezig is of verstoord raakt, zal de fijnere fractie van de bedding alsnog in transport komen en kan erosie plaatsvinden.
- Er wordt verondersteld dat transport van beddingmateriaal ook direct tot erosie leidt. Dit hoeft echter niet per definitie het geval te zijn voor elke locatie in de geul van de Noor. Wanneer de input van sediment vanaf een bovenstroomse locatie tijdens deze afvoeren gelijk of groter is dan de afvoer van sediment zal er netto geen erosie optreden. Hierbij geldt wel dat de input van beddingsediment (in dit geval in de vorm van grindfracties) vrijwel niet bestaand is in de huidige situatie. Dit betekent dat er na verloop van tijd wel netto erosie van de bedding zal optreden door sedimenttransport naar benedenstrooms.
- De berekende streefwaarden voor stroomsnelheid een beste benadering zijn en dat de werkelijke stroomsnelheden waarbij het beddingsediment in transport kan komen tevens afhankelijk zijn van andere lokale factoren.

Wanneer de streefwaarden worden vergeleken met de huidige bandbreedte van de piekafvoeren van de Noor blijkt dat deze streefwaarden, gebaseerd op de voorkomende grindfractie van het beddingsediment, tijdens alle piekafvoeren worden overschreden. Hieruit kan worden afgeleid dat, om mogelijke verdere insnijding

door de Noor te voorkomen, de piekafvoeren sterk gereduceerd moeten worden. Wanneer dit niet gebeurt, is het zeer waarschijnlijk dat verdere insnijding blijft optreden en zal er naar andere maatregelen gekeken moeten worden om dit te voorkomen of te beperken.

5.2 Voorkomen verdere insnijding door suppletie van de Noorbedding

Om verdere insnijding van de Noor te voorkomen onder de huidige bandbreedte van voorkomende stroomsnelheden, waterdiepte en afvoer door middel van het aanbrengen van extra sediment, zal er vooral gezocht moeten worden naar de aard en korrelgrootte(verdeling) van het te suppleren sediment. Uit de analyse in paragraaf § 4.5.2 blijkt dat het te suppleren materiaal ten minste een korrelgroottediameter moet hebben tussen de 25 mm en 98 mm om de huidige piekafvoeren onder de mediane gradiënt te kunnen weerstaan. Voor de delen met de maximale gradiënt van de Noor dient dit zelfs tussen de 49 en 196 mm te zijn.

Om een gevoel te krijgen van wat dit betekent, kan worden gekeken naar de waargenomen D_{90}-waarden van de grindsamples, die variëren tussen de 28 en 90 mm. Als het doel is om sedimenttransport van het beddingmateriaal te voorkomen door middel van aanvulling, moet de D_{50} van het suppletiemateriaal vergelijkbaar zijn met de grootste grind en stenen die momenteel in de Noor aanwezig zijn. Dit betekent dat het beddingmateriaal dus sterk grover zal worden dan in de huidige situatie. Een belangrijke kanttekening hierbij is dat ervan uitgegaan wordt dat er minimaal of geen sedimenttransport van het beddingmateriaal mag optreden, zodat een enkele aanvulling of ingreep in de geul van de Noor voldoende is. Een alternatieve aanpak is om periodiek grind toe te voegen nadat er sedimenttransport heeft plaatsgevonden tijdens piekafvoeren. In dit geval kan de absolute korrelgrootte van het aanvullende materiaal worden verkleind, omdat enig transport van het beddingmateriaal acceptabel is, zolang de aanvoer van nieuw beddingsediment voldoende is om het verlies te compenseren (Figuur 2.1).

Desalniettemin zal het overgrote deel van het suppletiemateriaal toch uit de fractie stenen tot zeer grof grind moeten bestaan om erosie met de huidige piekafvoeren te beperken. Het is echter ook belangrijk om voldoende fijn materiaal aanwezig te hebben om te voorkomen dat de beek tijdens periodes van relatief lage afvoer in de bedding verdwijnt en droogvalt. Daarnaast is het belangrijk om de suppletie uit te voeren over vrijwel de gehele lengte van de Noor. Bij lokale suppleties kan de toename in lokale gradiënten leiden tot terugschrijdende erosie. Het is tevens raadzaam om de suppletie af te stemmen op de verschillende gradiënten in het lengteprofiel van de Noor, zodat er niet te fijn of juist te grof materiaal in de bedding wordt aangebracht. Maatwerk is dus van belang indien suppletie onder de huidige omstandigheden wordt overwogen.

Een snelle en zeer globale berekening met een gemiddelde breedte van circa 2,5 meter, een lengte van ten minste 1250 meter en een ophoging van circa 30 centimeter aan beddingmateriaal laat zien dat er rekening gehouden dient te worden met een volume van circa 937,5 m^3 aan stenen en grof grind. Hierbij wordt uitgegaan van suppletie van alleen de bedding. Voor een scenario waarin het doel is om de drainagebasis substantieel te verhogen, is deze schatting echter zeer conservatief gezien de diepe insnijding van de Noor. De Mars & Van der Weijden (2021) laten zien dat in grote delen van de Noor de insnijding één tot meerdere meters bedraagt. Als het overgrote deel van deze diepte moet worden opgevuld om de drainagebasis van de Noor te verhogen tot een niveau dat bijdraagt aan het terugdringen van de verdroging van de beemden, zal het vereiste volume aanzienlijk toenemen.

Om een indicatie te krijgen van de vereiste hoogte waarmee de bedding moet worden opgehoogd om de grondwaterstanden te verhogen tot aan of net onder het maaiveld, wordt het aanbevolen om een (geo)hydrologische modellering/studie uit te voeren waarin de effecten van verschillende niveaus van beddingverhoging op het grondwater worden gesimuleerd.

Wanneer er wordt gekozen om alleen het diepste deel van de geul (zie Figuur 5.1) op te vullen door middel van suppletie is er circa 70 tot 90 cm aan suppletiemateriaal nodig (variabel over het lengteprofiel). Over de

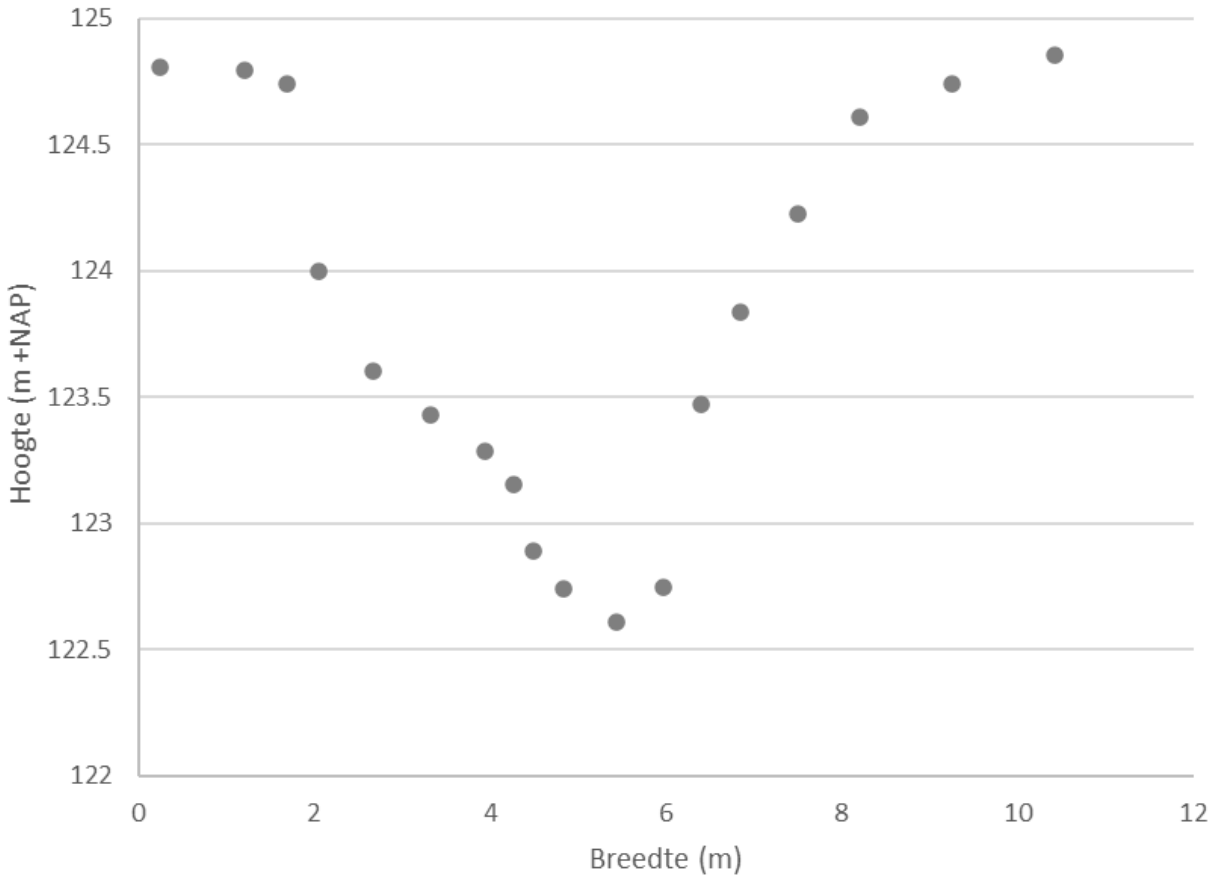
gehele lengte is het benodigde volume dan ruim 2100-2800 m^3. Een mogelijk voordeel van het opvullen van het diepste deel van de geul is dat de breedte van de bedding van de geul kan toenemen binnen de huidige geometrie van de geul. Voor de dwarsdoorsnede in Figuur 5.1 betekent dit dat de breedte toe kan nemen van circa 2,1 naar 3,2 meter. Als de afvoer niet verandert, betekent dit dat er onder de nieuwe geometrie een theoretische waterstandverlaging van circa 40 cm naar 32 cm gerealiseerd kan worden voor het scenario van een 75ste percentiel hoge afvoer van de Noor. Dit werkt door in de benodigde korrelgrootte die nodig is om transport te voorkomen onder deze omstandigheden; deze kan van een D_{50} van circa 57 mm naar 46 mm, een reductie van circa 19%. De mate waarin de breedte van de geul op deze manier vergroot kan worden door suppletie, is variabel over het lengteprofiel van de Noor. Hierdoor varieert ook de benodigde korrelgrootte van het suppletiemateriaal over het lengteprofiel voor deze methode. Echter, het ophogen van de bedding van de Noor brengt ook mogelijke risico's met zich mee voor morfologische veranderingen, zie hiervoor § 5.3.

Het suppletiemateriaal dient in ieder geval gebiedseigen te zijn, wat in dit geval neerkomt op zeer grof en hoekig Maasgrind en stenen, zoals nu ook in de bedding van de Noor en in omringende puinwaaier afzettingen te vinden is. De fijne fractie kan komen uit lokale zand en silt afzettingen. Een geschikte bron voor het suppletiemateriaal kan mogelijk gevonden worden in de omliggende colluviale afzettingen.

Gezien het volume en de aard van het suppletiemateriaal zal de suppletie machinaal uitgevoerd moeten worden, wat zorgvuldigheid en aandacht vereist om de impact op de Noor en Noorbeemden te beperken. Hierbij kan eraan gedacht worden om mogelijkheden tot suppletie te verkennen door het inzetten van (elektrische) rupskruiwagens waarmee tijdens droge periodes misschien met rijplaten over de nieuw aangebrachte bedding stroomafwaarts gewerkt kan worden. Een andere mogelijkheid kan het inzetten van zogenaamde 'blaaswagens' (wanneer de korrelgrootte het toelaat) zijn, die gebruikt worden bij het aanbrengen van dakgrind, om zodoende met een lange slang het grind tot in de bedding te krijgen waarna het (handmatig) verder verdeeld kan worden om hiermee de impact op de Noorbeemden te beperken.

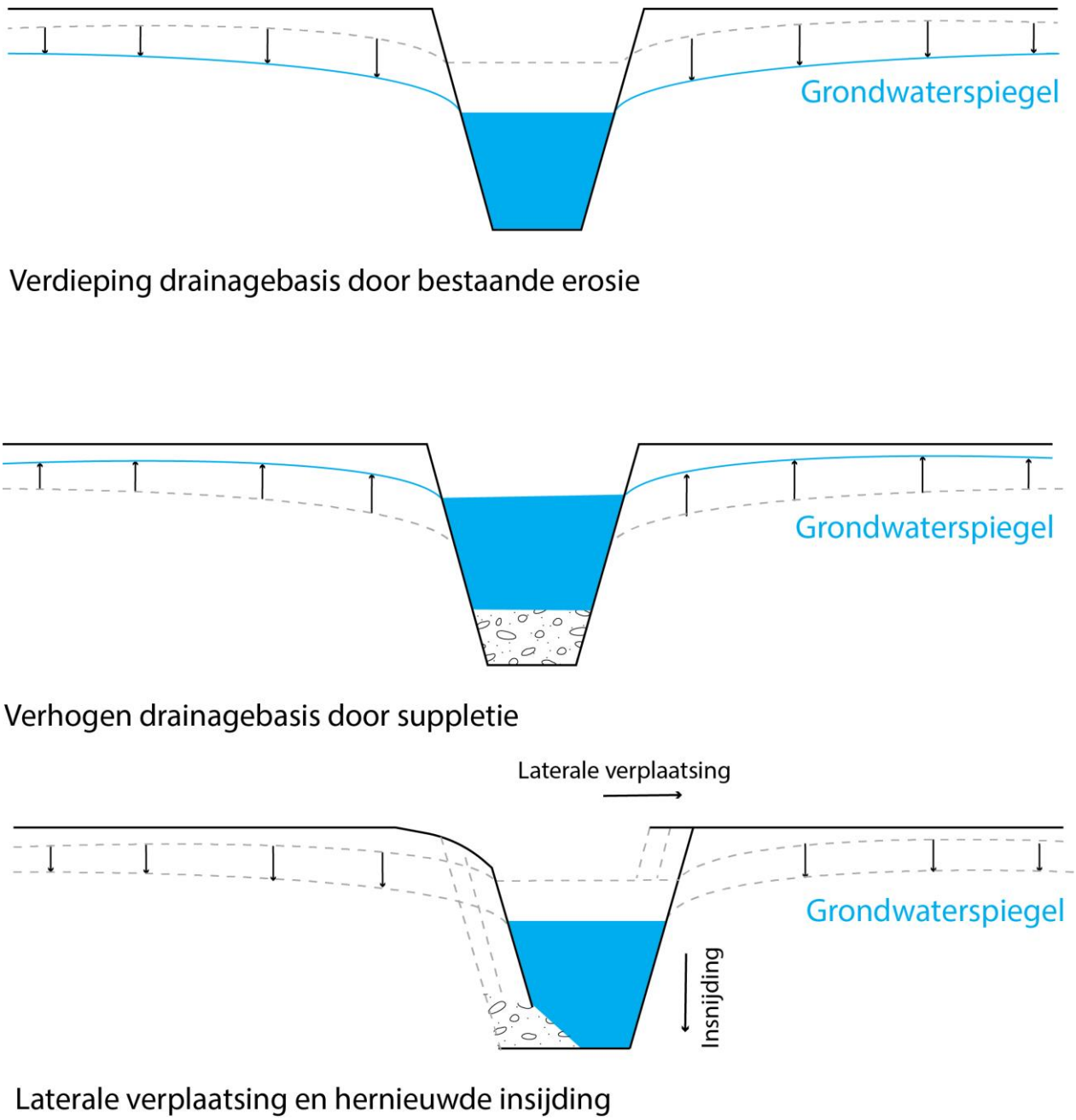
5.3 Mogelijke laterale verplaatsing en herinsnijding door verhogen drainagebasis

Wanneer er gekozen wordt om de bedding van de Noor te suppleren om zodoende de bodemhoogte en daarmee de drainagebasis van de Noor te verhogen, moet er ook rekening gehouden worden met de mogelijke morfologische veranderingen als gevolg van deze ingreep. Door de verhoging van de drainagebasis en de grondwaterspiegeldiepte zullen de hoger gelegen delen van de oevers, die momenteel relatief droog zijn, natter worden. Aangezien deze oevers grotendeels uit silt bestaan, zal de stabiliteit ervan afnemen door het verzachten, wat kan leiden tot een toename van oevererosie. Dit fenomeen is momenteel al zichtbaar in de dwarsprofielen van de Noor, waarbij de breedte van de geul toeneemt op de overgang tussen de diepere, meer kleiige delen en de hogere oevers, die voornamelijk uit siltig materiaal bestaan (Figuur 5.1).



Figuur 5.1 *Voorbeeld van een dwarsprofiel halverwege het lengteprofiel van de Noor. Wanneer de Noor tijdens piekafvoeren de makkelijker te eroderen siltige overstromingssedimenten bereikt t.o.v. de kleiigere lagere delen van de oever, neemt de breedte van de geul toe (rond 123.2 m +NAP). Daarnaast is te zien dat ophoging van de bodemhoogte van de Noor binnen de bestaande geometrie van de geul in dit geval kan zorgen voor verbreding van de bedding.*

Wanneer de bedding door suppletie wordt verhoogd en er een verhoogde kans op oevererosie ontstaat, neemt ook de mogelijkheid van laterale verplaatsing van de geul door meanderen toe. Bij laterale verplaatsing bestaat de kans dat verticale erosie optreedt bij het meanderen, vooral wanneer er een gebrek is aan grof beddingmateriaal (Figuur 5.2). Als er niet voldoende grof beddingmateriaal van bovenstrooms wordt aangevoerd om dit tegen te gaan, kan het gesuppleerde materiaal 'verlaten' worden en kan de initiële verondieping en verhoging van de grondwaterspiegeldiepte teniet worden gedaan (Figuur 5.2). Bij een keuze voor suppletie is het daarom essentieel om de Noor uitvoerig te blijven monitoren en periodiek aanvullende suppleties uit te voeren waar en wanneer nodig. Dit zal het proces van insnijding door laterale verplaatsing van de geul mogelijk kunnen beperken of voorkomen. Het is ook belangrijk op te merken dat het verminderen van piekafvoeren een essentieel onderdeel is om ervoor te zorgen dat de suppleties duurzaam en effectief blijven gedurende een langere periode.



Figuur 5.2 *Mogelijke morfologische aanpassing van de geul van de Noor op suppletie door laterale erosie en vervolgens verticale erosie doordat de waterstroom naast de gesuppleerde bedding komt te liggen.*

6 Mogelijk streefbeeld morfologisch-dynamisch evenwicht voor de Noor

Op dit moment is de Noor een morfologisch actieve rivier waarin natuurlijke erosie- en sedimentatieprocessen plaatsvinden. Echter, de afgelopen decennia heeft verticale insnijding de overhand gehad, waardoor de bedding van de Noor op veel locaties diep ligt ten opzichte van de aangrenzende beemden die de beekdalbodem vormen. Door deze diepe ligging van de beek is laterale verplaatsing moeilijker, omdat er in dit geval een groter volume aan sediment moet worden geërodeerd en getransporteerd om dit proces mogelijk te maken. Daarnaast zorgt de diepe geul van de Noor voor hoge stroomsnelheden bij piekafvoeren, wat leidt tot verdere insnijding. Dit komt doordat alle stromingsenergie zich concentreert in de geul, aangezien de beek niet buiten haar oevers kan treden vanwege de diepe ligging. Hoewel dit proces voor de morfologische toestand van de Noor op zichzelf geen probleem is, hebben de diepe ligging en de mogelijkheid tot verdere insnijding wel grote gevolgen voor de (geo)hydrologie en ecologische toestand van de aanliggende beemden. Ten eerste draagt de diepe ligging van de beek bij aan de verdroging van de aanliggende gronden. Dit vindt plaats door zowel de drainerende werking van de Noor zelf, als door de terugschrijdende erosie en dus verdieping van zijlopen in de Noorbeemden die het veroorzaakt (Verdonschot & De Vries, 2023). Ten tweede leiden de insnijdingen tot scherpe overgangen tussen water en land, wat nadelig is voor het voorkomen van geschikte milieuomstandigheden voor karakteristieke planten en dieren. De Noorbeemden zijn aangewezen als N2000-gebied en herbergen een aantal bijzondere habitattypen (Provincie Limburg, 2017), waarbij de Kalktufbronnen (H7220) een prioritaire status hebben, omdat er een aantal zeer goed ontwikkelde situaties van dit habitattype in de Noorbeemden te vinden is. Daarom richt deze studie zich op het bereiken van een morfologisch-dynamisch evenwicht voor de Noor, dat kan helpen bij het tegengaan van de verdroging van de Noorbeemden, terwijl de kenmerkende morfologie van de Noor behouden blijft of wordt geëvenaard.

Om zowel verdere insnijding van de Noor als verdere verdroging van de beemden door de diepe ligging van de Noor te voorkomen, kan er gestreefd worden naar een situatie waarbij de grondwaterspiegeldiepte ten opzichte van het maaiveld van de beemden verhoogd wordt. Tegelijkertijd moet de stroomsnelheid in de geul verlaagd worden om erosie en insnijding te voorkomen. Hierbij kan gedacht worden aan een morfologisch beeld van een relatief ‘stabiele en rustige’ beek zoals deze waarschijnlijk tijdens grote delen van het Holoceen aanwezig is geweest in het dal van de Noor. In die tijd had de Noor overstromingsvlakten die periodiek onder water kwamen te staan, maar waar weinig sediment werd afgezet. Het grondwaterniveau lag dicht bij het maaiveld, waardoor er lokaal veenvorming kon optreden, vooral op plaatsen waar kalkmoerassen aanwezig waren. Er waren geen zijbeken zoals die nu in het gebied voorkomen; het water stroomde diffuus en zonder duidelijk gedefinieerde looprichtingen richting de beek.

Voor het realiseren en duurzaam in stand houden van een vergelijkbaar beeksysteem zijn echter ook de bijbehorende hydrologische en sedimentologische omstandigheden nodig; gedempte afvoeren en beperkte sedimenttoevoer uit het achterland. Een ‘stabiele en rustige’ beek betekent echter niet dat er geen morfologische processen en gradiënten aanwezig kunnen zijn in de beek zelf. Vanwege de unieke landschappelijke ligging is het belangrijk dat het streefbeeld voor het morfologisch-dynamisch evenwicht de kenmerkende morfologische eigenschappen van de Noor weerspiegelt, zoals een onregelmatig dwars- en lengteprofiel met grindbanken, variaties in stroomsnelheden, substraat en de aanwezigheid van takken en boomstammen. Het streven is daarbij om deze situatie uiteindelijk te realiseren in een bedding die minder diep ingesneden ligt ten opzichte van de aangrenzende beemden.

Om dit te realiseren, is het essentieel dat de piekafvoeren door de geul van de Noor verlaagd worden. Een duurzame realisatie hiervan vraagt om ingrepen in het stroomgebied van de Noor die deels buiten de alluviale vlakte moeten worden genomen. Met name de (oppervlakkige) afstroming van water vanuit het achterland moet worden vertraagd en verminderd. Mogelijke maatregelen om dit te realiseren, worden gegeven door de Mars & Van der Weijden (2021) en omvatten o.a. het verruwen van het landschap (barrierewerking door bijvoorbeeld graften) en het herstellen van de structuur van de bodem om de waterinfiltratie te verbeteren. Voor de realisatie van het doel is het echter ook cruciaal om de riooloverstort

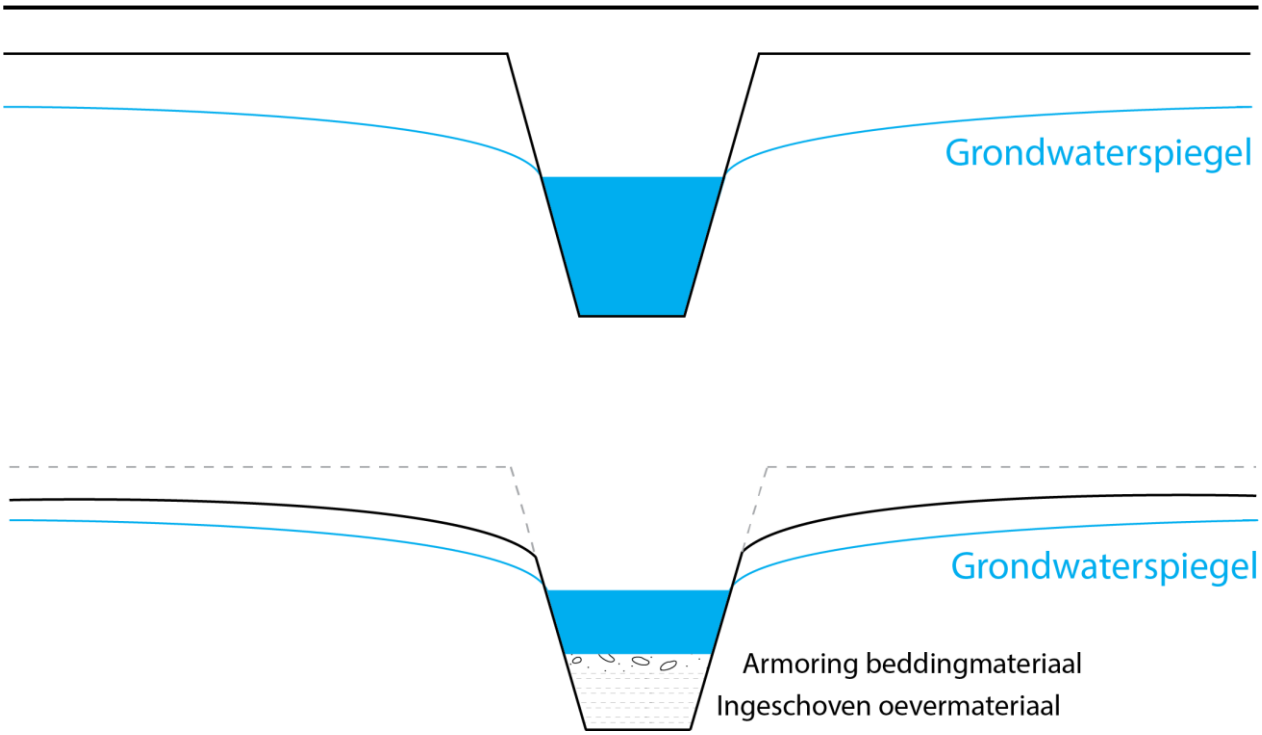
op de Noor te saneren, aangezien deze zorgt voor een piekbelasting in de afvoer. De modelstudie van Nelen & Schuurmans (2021) laat zien dat een significant deel van de totale afvoer afkomstig is van de externe overstort van de bergbezinkvoorziening bij Wesch en dus vanuit de kern van de dorpen Noorbeek en Bergenhuizen (Figuur 3.1). Pas wanneer deze sanering is gerealiseerd, wordt het zinvol om maatregelen in de geul van de Noor uit te voeren zonder dat dit leidt tot een substantiële toename van de korrelgrootte van het beddingmateriaal ten opzichte van de huidige situatie.

Indien de sanering van de overstort is gerealiseerd en de piekafvoeren naar beneden zijn gebracht, kan er worden toegewerkt naar een situatie waarin de bedding van de Noor wordt verhoogd. Bijkomend kunnen hiervoor de oevers in beperkte mate worden afgevlakt waarmee het maaiveld naar de diepte van de grondwaterspiegel wordt gebracht (Figuur 6.1). Hierbij kan het materiaal van de oevers in de bedding worden gebracht om deze te verhogen. Het is wel cruciaal om vervolgens hier bovenop een laag van voldoende dikte aan te brengen met een korrelgrootteverdeling die bestand is tegen de nieuwe stroomsnelheden. Hiermee wordt een *armoring*-laag ter bescherming van het onderliggende fijne materiaal tegen erosie gerealiseerd. In deze laag dient ook voldoende fijne fractie aanwezig te zijn, om ervoor te zorgen dat de beek tijdens de relatief lage baseflow omstandigheden niet in de bedding verdwijnt en droogvalt. Het wordt sterk aanbevolen om de samenstelling van de suppletie af te stemmen op de variaties in verhanggradiënt die voorkomen in de Noor, om te voorkomen dat er op steile delen te fijn materiaal wordt gebruikt en op trajecten met een lagere helling te grof materiaal wordt toegepast. Het is ook sterk aan te raden om deze werkwijze te testen in een pilotstudie, waarbij op plaatsen waar fijne (silt)sedimenten zijn afgezet, een nieuwe bedding/armoring-laag wordt aangebracht en gemonitord wordt of deze de onderliggende fijne sedimenten beschermt tegen erosie. Als dit niet het geval is, heeft het weinig zin om deze werkwijze/maatregelen op grote schaal toe te passen.

De dimensies van de nieuwe geul kunnen worden bepaald op basis van de nieuwe geulvormende afvoeren zoals gegeven in § 3.4. Daarnaast is het van belang om variatie in zowel het lengte als dwarsprofiel aan te brengen, een riffle-pool structuur, om te zorgen voor variaties (of mogelijkheden tot ontwikkeling hiervan) in waterdiepte, stroomsnelheid en substraat die kenmerkend zijn voor dit type beeksystemen. Hiervoor kan dood hout worden gebruikt, wat verkregen kan worden bij het afvlakken van de oevers. Overkoepelend geldt hiervoor wel dat de laag armoring op alle plekken voldoende moet zijn om de nieuwe maximale stroomsnelheden te weerstaan.

Een bijkomend voordeel van deze vorm van beddingverhoging van de Noor is dat er een minder steile land-waterovergang ontstaat en dat de breedte van de Noor toeneemt tijdens hoge afvoeren, waardoor stroomsnelheden nog verder naar beneden gebracht kunnen worden door een lokale ingreep in plaats van enkel afhankelijk te zijn van regionale veranderingen. De meer graduele land-waterovergangen zullen naar verwachting gunstig zijn voor zowel de aquatische macrofauna alsmede de terrestrische natuur via een verbetering van de omstandigheden voor vochtige alluviale bossen (Verdonschot en De Vries, 2023). Er moet echter rekening worden gehouden met een mogelijke toename van inundatie in de beemden van de Noor in de nieuwe situatie. Dit benadrukt nogmaals de noodzaak om riooloverstorten te saneren, zodat er geen belasting van de beemden met nutriënten of vervuiling plaatsvindt tijdens inundatie.

Voor alle ingrepen is het van belang dat de morfologische veranderingen van de Noor gemonitord worden en dat er indien nodig nieuw beddingmateriaal wordt gesuppleerd, zij het in actieve of passieve vorm, wanneer er verticale of horizontale erosie optreedt (§ 5.3). Het is belangrijk om te beseffen dat een mogelijke verondieping van de Noor geen eenmalige ingreep is, maar een langdurig proces van maatwerk, waarbij monitoring en aanpassingen essentieel zijn. Een voorbeeld van een hanteerbaar monitoringsplan is gegeven door Stowa (2020) in paragraaf 3.3 van het handboek *Geomorfologisch beekherstel*. Daarnaast is het van belang om te monitoren of de ingrepen in de Noor het gewenste effect hebben op de grondwaterstanden in de aangrenzende beemden.



Figuur 6.1 *Schematische dwarsdoorsnede van de Noor waarbij de oevers zijn verlaagd en de bedding omhoog is gebracht. Voor deze schematische weergave is de mate van afvlakking uitvergroot.*

7 Morfologisch-dynamisch evenwicht van de Noor in relatie tot ecologie

Het morfologisch-dynamisch evenwicht, zoals geschetst in § 6, betekent dat er een aanzienlijke tijdelijke impact zal zijn op de aanwezige ecologie. Ondanks dat het voor morfologische aspecten sterk aan te raden is om suppletie over de gehele lengte van de Noor door te voeren om terugschrijdende erosie te voorkomen, kan het vanuit ecologisch oogpunt wenselijk zijn om met refugia binnen de Noor te werken. Hierbij wordt, om te voorkomen dat een populatie van een bepaalde soort uit het gebied verdwijnt, gewerkt met vergelijkbare trajecten waar geen suppletie plaatsvindt en die ook niet op een andere manier negatief worden beïnvloed door de ingreep (Van Dongen & Verdonschot, 2014; Verdonschot & Eysink, 2022). Deze refugia dienen dan als bron van kolonisten voor de gesuppleerde trajecten. Zo benoemen Verdonschot en De Vries (2023) dat bijvoorbeeld de bovenstroomse delen van een bekenstelsel als refugia kunnen dienen, maar ook zijbeken of parallelle beektakken met vergelijkbare milieucondities (dimensies, stroomsnelheid, substraat etc.). Van laaglandbeken is bekend dat deze aanpak leidt tot snelle herkolonisatie door de lokale fauna (Dos Reis Oliveira et al., 2019). Wanneer zulke refugia niet gevonden kunnen worden in het stroomgebied van de beek, kan ervoor worden gekozen om de segmenten met een relatief lage gradiënt in eerste instantie als refugia te laten dienen, zodat de erosiegevoeligste delen als eerste gesuppleerd kunnen worden. Bij deze aanpak neemt de kans op erosie van de gesuppleerde segmenten wel toe. Wanneer er op dit moment niet ingegrepen wordt, blijft de kans op verdere insnijding bestaan, met als mogelijk gevolg het doorsnijden van de stagnerende kleilaag aan de basis van de dalopvulling van de Noor.

Naast het werken met refugia is het verkennen van de mogelijkheid tot het transplanteren van beddingsubstraat zoals dat is voorgesteld voor de aangrenzende Noorbeemden (Verdonschot en De Vries, 2023) aan te raden om de (her)kolonisatie van bepaalde soorten of gemeenschappen te faciliteren. In die situatie kan het bestaande beddingmateriaal mogelijk al geschikt zijn om erosie te weerstaan, wat voordelig is voor zowel het beperken van de ecologische verstoring als voor het verminderen van de benodigde hoeveelheid suppletiemateriaal voor de beddingverhoging. Het afvlakken van de oevers zal ook leiden tot een groter oppervlak aan land-waterovergangen, wat over het algemeen gunstig is voor zowel de aquatische macrofauna als voor de terrestrische natuur. Er is dan sprake van een verbetering van de omstandigheden voor vochtige alluviale bossen (Verdonschot en De Vries, 2023). Om de impact op de aanwezige ecologie tijdens de uitvoering van de maatregelen tot een minimum te beperken, is het belangrijk om deze zorgvuldig uit te voeren en de situatie tijdens de werkzaamheden nauwlettend te monitoren.

8 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Op basis van deze studie is een aantal aanbevelingen geformuleerd voor eventueel vervolgonderzoek.

- Indien besloten wordt tot suppletie zonder verregaande ophoging van de bedding onder de huidige voorkomende piekafvoeren, is het raadzaam om een pilot uit te voeren met de voorgestelde korrelgroottes om te beoordelen of de theoretische berekeningen ook in de praktijk gelden. Dit komt doordat lokale factoren, zoals aanwezigheid van hout in de beek of (micro)reliëf van de bedding, kunnen leiden tot stroomsnelheden die sterk kunnen afwijken van de gemiddelde stroomsnelheid door de waterkolom. Bovendien kan in deze pilot worden onderzocht of het vergroven van de bedding van de Noor leidt tot knelpunten in de ecologische situatie van de beek. Als dit niet het geval is, kan worden overwogen om suppletie van de bedding met grover sediment uit te voeren. Hiervoor is monitoring op zowel morfologisch als ecologisch gebied nodig.
- De werkbaarheid en duurzaamheid van het gedeeltelijk inbrengen van siltig materiaal uit de oever ten behoeve van het ophogen van de bedding en het aanbrengen van een nieuwe bedding/armor laag om erosie van het ingebrachte materiaal te voorkomen, kan worden getest in een pilotproject in de bestaande bedding van de Noor. Door op specifieke locaties waar zich momenteel fijn materiaal heeft afgezet (bijvoorbeeld in kolkgaten in de buitenbocht of achter boomstammen) een armor laag aan te brengen met een korrelgrootte die past bij de gradiënt, kan worden getest of de aanwezige fijne sedimenten voldoende beschermd worden tegen erosie. Het is ook raadzaam om zowel morfologische als ecologische monitoring uit te voeren.
- Om een duidelijker beeld te krijgen van het effect van de diepe ligging van de geul van de Noor op de verdroging van de Noorbeemden in vergelijking met andere mogelijke factoren die bijdragen aan verdroging, is het raadzaam om een attributie-studie uit te voeren.
- Om een indicatie te krijgen van de vereiste ophoging van de bedding om de grondwaterstanden te verhogen tot aan of net onder het maaiveld, is het aan te bevelen om een (geo)hydrologische modellering/studie uit te voeren waarin de effecten van verschillende ophogingshoogtes op het grondwater worden gesimuleerd.
- Het is aan te raden om verder onderzoek te doen naar het functioneren van het bergbezinkbassin om een beter inzicht te krijgen in de omvang en frequentie van de overstorten. Daarnaast is het aan te raden om verder te onderzoeken wat het aandeel aan water is dat via wegen en andere verharde infrastructuur bijdraagt aan de afvoer van de Noor tijdens hevige neerslag.

9 Conclusies

Uit dit onderzoek kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Uit de berekeningen van het potentieel specifiek stromingsvermogen voor de Noor blijkt dat deze tijdens piekafvoeren veel energie heeft voor sedimentverplaatsing en morfologische veranderingen, zowel verticaal als lateraal.
- Voor het tegengaan van verdere insnijding van de Noor zijn maatregelen aan de waterzijde (afvoer) of sedimentzijde (korrelgrootte) noodzakelijk. Suppletie die bestand is tegen de huidige bandbreedte aan stroomsnelheden zal echter leiden tot aanzienlijke vergroving van de bedding van de Noor (zeer grof grind en stenen fractie). Het is daarom sterk aan te raden om op voorhand in te zetten op het reduceren van de piekafvoeren van de Noor. Dit is essentieel voor het tegengaan van hoge stroomsnelheden en erosiecapaciteit in de geul van de Noor.
- Een mogelijk morfologisch dynamisch evenwicht voor de Noor om op termijn naar te streven is dat van een relatief ondiepe beek (circa 3 m breed en 0,6 m diep) met een vochtige alluviale vlakte. Dit dynamisch evenwicht moet kenmerken hebben zoals een onregelmatig dwars- en lengteprofiel met grindbanken, variaties in stroomsnelheden en substraat, en de aanwezigheid van takken en boomstammen. Het is belangrijk dat verticale erosie beperkt of afwezig is door de aanwezigheid van een adequaat versterkte bedding wanneer er voor suppletie wordt gekozen.
- Wanneer gekozen wordt voor suppletie en/of ophoging van de beekdalbodem, dan moet dit afgestemd worden op de verschillende gradiënten in het lengteprofiel van de Noor om de juiste korrelgrootteverdeling te bepalen van het suppletiemateriaal.
- Indien er suppletie plaatsvindt, dient dit te gebeuren met gebiedseigen materiaal, waarbij een voorbeeld kan worden genomen aan de samenstelling van de huidige bedding. Daarnaast dient de suppletie bij voorkeur over de gehele lengte van de Noor te worden uitgevoerd waar insnijding een probleem vormt. Wanneer dit niet mogelijk is, is het raadzaam om in eerste instantie in te zetten op de kwetsbaarste trajecten van de Noor, daar waar de kleilaag aan de basis van de dalvulling het dunst is en waar de insnijding en gradiënt het hoogst zijn.
- Bij de uitvoering van de benodigde maatregelen om tot het morfologisch-dynamisch evenwicht te komen, dient er rekening gehouden te worden met de aanwezige ecologie en moeten er voldoende kansen tot (her)kolonisatie worden gefaciliteerd.
- Zowel het tegengaan van verdere erosie door het mogelijk aanbrengen van een bed armoring als het ophogen van de beekdalbodem van de Noor dient zorgvuldig te worden gemonitord om de effectiviteit te beoordelen en ervoor te zorgen dat deze effectiviteit behouden blijft. Het is belangrijk om te beseffen dat een eventuele suppletie als verondieping van de Noor geen eenmalige ingreep is, maar een langdurig proces van maatwerk waarbij monitoring en aanpassingen essentieel zijn.

Woord van dank

Dit rapport is naast de inbreng van de auteurs tot stand gekomen dankzij de medewerking van Gilbert Maas (WENR). Daarnaast is er waardevolle input voor het rapport ontstaan door verscheidene discussies met Roel Dijksma (WUR) en Ralf Verdonschot (WENR). Daarnaast zijn we Marina Fijten, Corine Geujen (Vereniging Natuurmonumenten) en Hans de Mars (HaskoningDHV) erkentelijk voor de waardevolle introductie aan het begin van dit project.

Literatuur

Bunnik, F. P. M. (1999). Vegetationsgeschichte der Lössbörden zwischen Rhein und Maas von der Bronzezeit bis in die frühe Neuzeit.

Campuzano Izquierdo, G. (2019). Effectieve maatregelen tegen diepe insnijding (Noorbeek, Zuid Limburg). Arroyo Wateradvies, Bennekom.

De Mars, H en Van der Weijden, B. (2021). No-regret maatregelen Noorbeemden. Ecohydrologische knelpuntenanalyse en herstelplan. Royal HaskoningDHV.

De Moor, J. J. W., Kasse, C., Van Balen, R., Vandenberghe, J., & Wallinga, J. (2008). Human and climate impact on catchment development during the Holocene—Geul River, the Netherlands. Geomorphology, 98(3-4), 316-339.

Dos Reis Oliveira P.C., Kraak M.H.S., Verdonschot, P.F.M., Verdonschot R.C.M. (2019) Lowland stream restoration by sand addition: impact, recovery and beneficial effects on benthic invertebrates. River Research and Applications 35:1023-1033.

Houben, P. (2003). Spatio-temporally variable response of fluvial systems to Late Pleistocene climate change: a case study from central Germany. Quaternary science reviews, 22(20), 2125-2140.

Julian, J. P., & Torres, R. (2006). Hydraulic erosion of cohesive riverbanks. Geomorphology, 76(1-2), 193-206.

Kessels, K. (2012). Eco-hydrogeology of the Noorbrook catchment. Effect of the incised Noorbrook on the spatial distribution of groundwater within the Noorbeemden and its consequences for this nature reserve. Thesis Hydrology and Quantitative Water Management HWM-80436.

Lane, E. W. (1955). The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering (pp. 1-17). Denver, CO: US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Commissioner's Office.

Maaß, A. L., & Schüttrumpf, H. (2019). Elevated floodplains and net channel incision as a result of the construction and removal of water mills. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 101(2), 157-176.

Nelen & Schuurmans, 2022. Modelberekeningen Noorbeek. Dossier X0048.

Provincie Limburg (2017). Natura 2000 Gebiedsanalyse voor de Programmatische Aanpak Stikstof (PAS). Noorbeemden & Hoogbos (161). Provincie Limburg, cluster Natuur en Water.

Shields, A. (1936). Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement.

Stowa. (2020). Handboek Geomorfologisch Beekherstel, herziene uitgave. Sitchting Toegepast Onderzoek Waterbeheer. Amersfoort.

Stowa. (2005). Overzicht Natuurlijke Watertypen. Sitchting Toegepast Onderzoek Waterbeheer. Amersfoort.

Tiernego, M. (2010). Flow routes in a deeply incised brook system. MSc Thesis, Leerstoelgroep Hydrology and Quantitative Water Management Wageningen University.

Van Dongen, R. & Verdonschot, P. (2014). Advies 'Herstel Leuvenumse beek'. www.natuurkennis.nl: VBNE.

Van Lanen, H. A. J., van de Weerd, B., Dijksma, R., ten Dam, H. J., & Bier, G. (1995). Hydrogeologie van het stroomgebied van de Noor en de effecten van grondwateronttrekkingen aan de westrand van het Plateau van Margraten (No. 57). Landbouwuniversiteit Wageningen.

Van Zuidam, B.G. (2007). De Noor, Zuid-Limburg. Gedetailleerde geologische opbouw van de dalopvulling en effecten op grondwaterstroming en nitraatverdeling. Effecten van nitraat en overstortend riool op de macro-evertebraten gemeenschap. Thesis Hydrology and Quantitative Water Management HWM-80434.

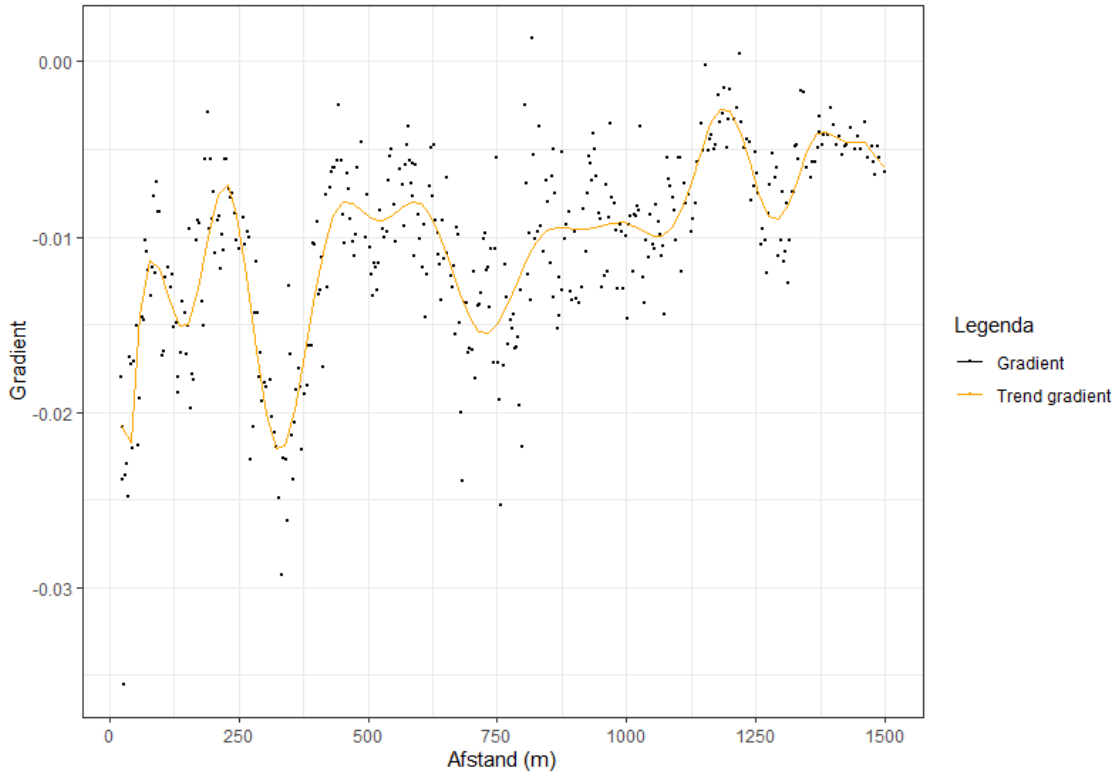
Verdonschot, R. C. M., & de Vries, J. (2023). Nulmeting macrofauna bronbeken Noorbeemden. (Rapport; No. 3266). Wageningen Environmental Research. https://doi.org/10.18174/631585.

Verdonschot, R. C. M., & Eysink, A. T. W. (2022). Risicoanalyse Bemersbeek: Advies van het OBN deskundigenteam Beekdallandschap met betrekking tot de geplande herstelmaatregelen in de Bemersbeek. (OBN rapport; No. OBN-2022-31-BE). VBNE, Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren. https://edepot.wur.nl/583624.

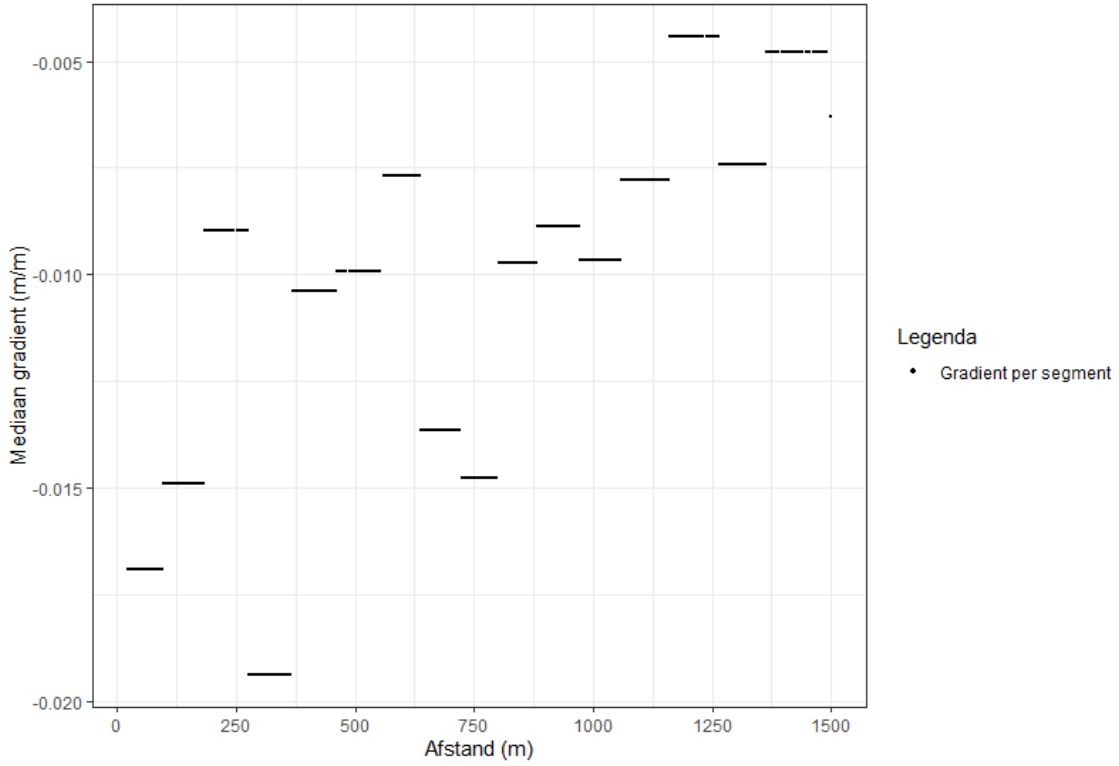
Bijlage 1

Excel bestand

Bijlage 2



Figuur B2.1



Figuur B2.2

Bijlage 3

Klasse
Grindmediaan (mm)
Zeer grof grind
≥ 16
< 63
Matig grof grind
≥ 5,6
< 16
Fijn grind
≥ 2
< 5,6
Sample nr
Depth(from-to)
Lithology
Sorting
D50 (total)
D50 gravel (mm)
D90 gravel (mm)
Notes
T1
0-10cm
Gz3
slecht
MGG
ZGG
Hoekig
T2
0-10cm
Gz3
slecht
MGG
ZGG
Hoekig

Klasse
Zeer grof grind
Matig grof grind
Fijn grind
Sample nr
Depth(from-to)
Lithology
Sorting
D50 (total)
D50 gravel (mm)
D90 gravel (mm)
Notes
T1 0-10 cm GZ3 slecht MGG ZGG Hoekig
T2 0-10 cm GZ3 slecht MGG ZGG (~5cm) Hoekig
ZW1 18 - 9 - 10 cm voor hoofpakket
T3 0 - 10 cm GZ2 slecht MGG ZGG (~9 cm Hoekig -> D50 grover D90

Grindmediaan (mm)
Klasse
Zeer grof grind ≥ 16 < 63
Matig grof grind ≥ 5,6 < 16
Fijn grind ≥ 2 < 5,6
T1 0-10 cm GZ3 slecht MGG ZGG Hoekig
T2 0-10 cm GZ3 slecht MGG ZGG (~5cm) Hoekig
ZW1 18 - 9 - 10 cm voor hoofpakket
T3 0-10 cm GZ2 slecht MGG ZGG (~9cm) Hoekig -> D50 grover D90 ook
T4 0-10 cm GZ2 slecht MGG ZGG (~9cm) Hoekig Gelijk aan T3

Klasse
Grindmediaan (mm)
Zeer grof grind ≥ 16 < 63
Matig grof grind ≥ 5,6 < 16
Fijn grind ≥ 2 < 5,6
Sample nr
Depth(from-to)
Lithology
Sorting
D50 (total)
D50 gravel (mm)
D90 gravel (mm)
Notes
T1 0-10cm GZ3 slecht MGG ZGG Hoekig
T2 0-10cm GZ3 slecht MGG ZGG (~5cm) Hoekig
ZW1
T3 0-10cm GZ2 slecht MGG ZGG (~9cm) Hoekig -> D50 grover
T4 0-10cm GZ2 slecht MGG ZGG (~9cm) Hoekig Gelijk aan T3
T5 0-10cm GZ2 slecht MGG ZGG (~5cm) Afgerond wsl suppletie

Klasse
Grindmediaan (mm)
Zeer grof grind ≥ 16 < 63
Matig grof grind ≥ 5,6 < 16
Fijn grind ≥ 2 < 5,6
Sample nr
Depth(from-to)
Lithology
Sorting
D50 (total)
D50 gravel (mm)
D90 gravel (mm)
Notes
T1 0-10 cm GZ3 slecht MGG ZGG Hoekig
T2 0-10 cm GZ3 slecht MGG ZGG (~5cm) Hoekig
ZW1 18 - 9 - 10 cm vóór hoofpakket
T3 0-10 cm GZ2 slecht MGG ZGG (~9cm) Hoekig -> D50 grover D90 ook
T4 0-10 cm GZ2 slecht MGG ZGG (~9cm) Hoekig Gelijk aan T3 vlak na HP
T5 0-10 cm GZ2 slecht MGG ZGG (~5.5cm) Afgerond wsl suppletie
T6 0-10 cm GZ3 slecht MGG ZGG (~4.5cm) Net na samenkomst 2 zijstromen Hoekig net voor HP net na HP alleen na HP verankerd

Grindmediaan (mm)
Klasse
Zeer grof grind ≥ 16 < 63
Matig grof grind ≥ 5,6 < 16
Fijn grind ≥ 2 < 5,6
Sample nr
Depth(from-to)
Lithology
Sorting
D50 (total)
D50 gravel (mm)
D90 gravel (mm)
Notes
T1 0-10 cm GZ3 slecht MGG ZGG (0,5-5cm) Hoekig
T2 0-10 cm GZ3 slecht MGG ZGG (~5cm) Hoekig
ZW1 18 - g - 10 cm vóór houtpakket
T3 0-10 cm GZ2 slecht MGG ZGG (~9 cm) Hoekig -> D50 grover D90 ook
T4 0-10 cm GZ2 slecht MGG ZGG (~9 cm) Hoekig Gelijk aan T3 vlak na HP
T5 0-10 cm GZ2 slecht MGG ZGG (~5.5cm) Afgerond wsl suppletie
T6 0-10 cm GZ3 slecht MGG ZGG (~4.5cm) Net na samenkomst 2 zij stromen Hoekig net voor HP net na HP alleen na HP verankerd
T7 0-10 cm GZ3 slecht FG ZGG (~5 cm) Hoekig 1 cm (grootste)

Klasse
Grindmediaan (mm)
Zeer grof grind ≥ 16 < 63
Matig grof grind ≥ 5,6 < 16
Fijn grind ≥ 2 < 5,6
Sample nr Depth(from-to) Lithology Sorting D50 (total) D50 gravel (mm) D90 gravel (mm) Notes
T1 0-10cm GZ3 slecht MGG ZGG Hoekig
T2 0-10cm GZ3 slecht MGG ZGG (~5cm) Hoekig
ZW1 18 - 9 - 10 cm vóór hoofpakket
T3 0 -10cm GZ2 slecht MGG ZGG (~9cm) Hoekig -> D50 groover D90 ook
T4 0 -10cm GZ2 slecht MGG ZGG (~9cm) Hoekig Gelijk aan T3 vlak na HP
T5 0-10 cm GZ2 slecht MGG ZGG (~8.5cm) Afgerond wsl supplectie
T6 0-10 cm GZ3 slecht MGG ZGG (~4.5cm) Net na samenkomst 2 zijstromen Hoekig net voor HP net na HP alleen na HP vua
T7 0-10cm GZ3 slecht FG ZGG (~5cm) Hoekig 1cm (grootste)
T8 0-10cm GZ3 slecht MGG ZGG (~6.7cm) Hoekig

Bijlage 4

De schuifspanning kan worden gedefinieerd als:

$$\tau_o = \gamma * g * h * S_0$$

Deze definitie laat zien dat de schuifspanning afhankelijk is van onder andere de waterdiepte (d) en de energiegradiënt (S_0).

De verhouding tussen de weerstandswaarde van het sediment en de hydraulische kracht van de stroming wordt weergegeven door de zogenaamde Shields-parameter;

$$\tau_* = \frac{\tau_o}{[(\gamma_s - \gamma) * g * d_s]}$$

Wanneer de Shields-parameter de kritische waarde voor het sedimenttype overschrijdt, komt het sediment in beweging (Figuur 2.4).

τ_o = schuifspanning op de bedding (N/m^2)

γ = dichtheid van water (kg/m^3)

γ_s = dichtheid van sediment (kg/m^3)

d = waterdiepte (m)

S_0 = energiegradiënt (-)

d_s = mediane korrelgrootte

v = viscositeit van water

τ_* = dimensieloze schuifspanning (Shields-parameter) (-)

U_* = stroomsnelheid (m/s)

R_* = Reynolds getal

Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AA Wageningen
T 0317 48 07 00
wur.nl/environmental-research

Wageningen Environmental Research
Rapport 3298
ISSN 1566-7197

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.600 medewerkers (6.700 fte) en 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

To explore the potential of nature to improve the quality of life

Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AB Wageningen
T 0317 48 07 00
wur.nl/environmental-research

Rapport 3298
ISSN 1566-7197

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.600 medewerkers (6.700 fte) en 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.