

Waterdiepteknelpunten door toenemende inzinking en drempelvorming bij kabels en leidingen

Verdiepend onderzoek in Klimaatbestendige Netwerken Stresstest droogte
Rijntakken



Waterdiepteknelpunten door toenemende inzinking en drempelvorming bij kabels en leidingen

Verdiepend onderzoek in Klimaatbestendige Netwerken Stresstest droogte Rijntakken

Auteur(s)

Jurjen de Jong

Willem Ottevanger

Waterdiepteknelpunten door toenemende inzinking en drempelvorming bij kabels en leidingen

Verdiepend onderzoek in Klimaatbestendige Netwerken Stresstest droogte Rijntakken

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	mevrouw N. Dasburg-Tromp, mevrouw M. Wolters, heer R. Weekhout
Referenties	
Trefwoorden	Kielspeling, inzinking, squat, bodemerosie, kabels en leidingen

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	01-12-2021
Projectnummer	11206832-020
Document ID	11206832-020-GEO-0001
Pagina's	49
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Jurjen de Jong	
	Willem Ottevanger	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Jurjen de Jong 	Aukje Spruyt 	Remon Pot 	
	Willem Ottevanger	Arne van der Hout	Johan Boon 	

Samenvatting

In het programma Klimaatbestendige Netwerken Hoofdvaarwegennet (KBN-HVWN) is onderzoek gedaan naar de waterdiepte in de Rijntakken en de verandering ten gevolge van klimaatverandering en bodemerrosie. Op basis van deze waterdiepte zijn de knelpunten en de impact voor de scheepvaart bepaald. Twee uitgangspunten uit deze rapporten worden in dit verdiepende onderzoek verder onderbouwd.

In het eerste onderzoek wordt ingegaan op de aanname dat de benodigde kielspeling constant is, waarbij wordt gekeken naar het effect van ruimtelijk variërende waterdiepte op de inzinking van schepen. Voor een M8 schip wordt de inzinking berekend met de empirische formulering van Römisch. Voor de bepaling van de gemiddelde waterdiepte wordt gebruik gemaakt van de mediane bodemhoogte in de vaargeul. De mate van inzinking is sterk afhankelijk van met name de vaarsnelheid. Bij hoge vaarsnelheid is de inzinking 20 à 30 cm. Bij ondiepten zoals de vaste laag van Nijmegen neemt dit toe tot 40 cm. Bij een oploopmanoeuvres kan een verdubbeling van de inzinking ontstaan. Oplopen ter hoogte van ondieptes geeft een sterk verhoogde kans op gronding.

Het tweede onderzoek gaat in op het effect van kabels en leidingen in een eroderende rivierbodem. De exacte hoogte van de kabels en leidingen is in dit onderzoek niet beschikbaar. Als benadering is aangenomen dat de kabel of leiding (of de afdeklaag) direct onder de huidige rivierbodem ligt. Bij een eroderende rivier mag bij deze kabels en leidingen geen erosie plaatsvinden, waardoor kabels en leidingen een drempel kunnen vormen. Op de Boven-Waal en IJssel zijn diverse kabels en leidingen geïdentificeerd die in dit scenario een ondiepteknelpunten gaan vormen.

Beide onderzoeken dienen als eerste inventarisatie en voor het uitlichten van risico's. Grote aannames zijn noodzakelijk geweest om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden. Voor toepassing van de resultaten wordt het volgende sterk aanbevolen:

- In het onderzoek naar de inzinking is de toegepaste empirische formulering van Römisch te simplistisch van vorm om de ingewikkelde geometrie van de Waal mee te nemen. Hiervoor zijn uitgebreidere berekeningen noodzakelijk met (potentiaal)modellen.
- In het onderzoek naar kabels en leidingen ontbreekt informatie over de precieze locatie en hoogte van de kabels en leidingen, of van de afdeklaag. Door RWS-ON wordt de hoogte van kabels en leidingen momenteel ingemeten. Aanbevolen wordt om na verzameling van deze gegevens de toetsing nogmaals uit te voeren.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	6
2	Inzinking op rivieren	7
2.1	Introductie	7
2.1.1	Terminologie	8
2.1.2	Literatuurstudie inzinking	8
2.2	Methodiek	10
2.2.1	Bodemhoogte- en waterdieptevariatie bij een rivierafvoer van 1.020 m ³ /s	10
2.2.2	Berekening inzinking	12
2.3	Resultaten en interpretatie	13
2.4	Conclusies	16
2.5	Aanbevelingen	17
3	Kabels en leidingen in een eroderende rivier	19
3.1	Introductie	19
3.2	Methodiek	19
3.3	Resultaten en interpretatie	21
3.4	Conclusies	22
3.5	Aanbevelingen	23
4	Conclusies	24
	Referenties	25
A	Inzinking berekend door Römisch	26
A.1	Berekening Römisch	26
A.2	Parametrisering	27
A.3	Inschatting trim	27
A.4	Gevoeligheidsanalyse	27
A.4.1	Effect van de keuze voor de gemiddelde waterdiepte	27
A.4.2	Effect van een versmalling	28
B	Tabel kabels en leidingen	30
C	Langsdoorsneden kabels en leidingen	31
C.1	Bodemhoogte	31
C.2	Waterdiepte bij 1.020 m ³ /s bij Lobith	40

1 Introductie

In de stresstest droogte Rijntakken van het project Klimaatbestendige netwerken hoofdvaarwegennet (KBN-HVWN) is onderzoek uitgevoerd naar het effect van ondieptes op de scheepvaart. Met behulp van modelsimulaties is een representatieve waterdiepte bepaald voor de scheepvaart langs de gehele Rijntakken bij enkele afvoeren, en is bepaald hoe door klimaatverandering en autonome bodemerosie deze waterdiepte in de toekomst verandert (De Jong & Van der Mark, 2020). Op basis van deze representatieve waterdiepte zijn simulaties met BIVAS uitgevoerd om de impact op de scheepvaart te berekenen (De Jong, 2020). Bij deze onderzoeken zijn enkele aannames gedaan die in deze rapportage verder uitgediept worden.

Bij de beoordeling van de impact op de scheepvaart is aangenomen dat op de rivieren door schippers bij de meest ondiepte locaties een (statische) kielspeling wordt gehanteerd van minimaal 20 cm. Dit is een inschatting van de kielspeling die aangehouden wordt door schippers ten opzichte van de MGD (Minst Gepeilde Diepte, doorgaans een alluviale ondiepte). In werkelijkheid is de beschikbare kielspeling veel ingewikkelder en is dit afhankelijk van de inzinking van een varend schip. Bij vaste lagen kan de inzinking groter zijn dan bij een over de rivierbreedte variërende bodemligging, en is bovendien de impact van een aanvaring met de bodem groter. In hoofdstuk 2 wordt het effect van een ruimtelijk variërend bodemprofiel op de inzinking beoordeeld, met de consequenties die dit heeft voor beschikbare afluaddiepte.

Bij de bepaling van het effect van autonome bodemerosie op de waterdiepte, is in de eerdere modelsimulaties wel rekening gehouden met de bekende vaste lagen (Erlecom, Nijmegen, St. Andries) en het effect van deze drempels op de (verandering in) waterstand, maar zijn kleine vaste lagen of beschermingen bij kabels en leidingen buiten beschouwing gebleven. In hoofdstuk 3 wordt onderzocht wat de risico's zijn van kabels en leidingen op de beschikbare waterdiepte bij een eroderende rivierbodem.

2 Inzinking op rivieren

2.1 Introductie

In de resultaten van de stresstest Rijntakken toestand watersysteem (De Jong & Van der Mark, 2020) is berekend wat de beschikbare (minimale) waterdiepte is voor ieder punt op de rivier. De meest ondiepe punten in de Rijn zijn de locaties waar tijdens perioden van lage afvoer ook de MGD wordt afgegeven.

Voor de scheepvaart is de minimale waterdiepte van belang om te bepalen hoeveel vracht er meegenomen kan worden. Een grotere beladingsgraad zorgt namelijk voor een grotere diepgang. Er wordt daarbij rekening gehouden met de noodzaak tot een kielspeling tussen de romp en de meest ondiepe locaties die gepasseerd moeten worden. Deze kielspeling is noodzakelijk om rekening te houden met onder meer de inzinking en manoeuvreerbaarheid van een schip.

In de bepaling van de ondiepteknelpunten (De Jong & Van der Mark, 2020) en de bepaling van de impact op de scheepvaart (De Jong, 2020) is rekening gehouden met een constante minimale statische kielspeling over de rivier. Uit een vergelijking tussen geregistreerde diepgang (in IVS90) en de beschikbare minimale waterdiepte (bij de MGD's) is gebleken dat in de praktijk deze marge overeen komt met ongeveer 0,2 m (De Jong, 2020).

Deze benadering houdt er echter geen rekening mee dat een deel van de scheepvaart om de meest ondiepe locaties (aan de rand van de vaargeul) heen kan varen. Voor deze schepen zijn juist de beperkingen die over de gehele breedte van de vaargeul lopen maatgevend. Er zijn diverse situaties bekend van het raken van de vaste laag van Nijmegen, of bij de bodemkribben van Erlecom (Cotteleer, 2021). Dit terwijl de diepte bij de vaste laag Nijmegen ruim 1 m groter is dan bij de MGD locatie benedenstrooms daarvan. De incidenten zijn de aanleiding geweest om onderhoud uit te voeren aan de vaste laag.¹

Voor het beoordelen van de vaarweg kan daarom beter gekeken worden naar de werkelijke inzinking langs de vaarweg. In dit onderzoek worden daarom de volgende onderzoeksvragen beantwoord:

1. Hoe verschilt de inzinking bij vaste lagen ten opzichte van de alluviale rivier?
2. Wat is het effect van de verschillende mate van inzinking op knelpunten?

Vanwege de kennisleemte voor de interactie met een ruimtelijk variërende rivierbodem en andere schepen worden in dit onderzoek grote aannames gedaan. Dit verkennende onderzoek kan daarom slechts gebruikt worden als eerste indicatie, waarbij wel een goed beeld wordt gevormd van de werking van het systeem, maar de kwantitatieve resultaten nog zeer globaal zijn.

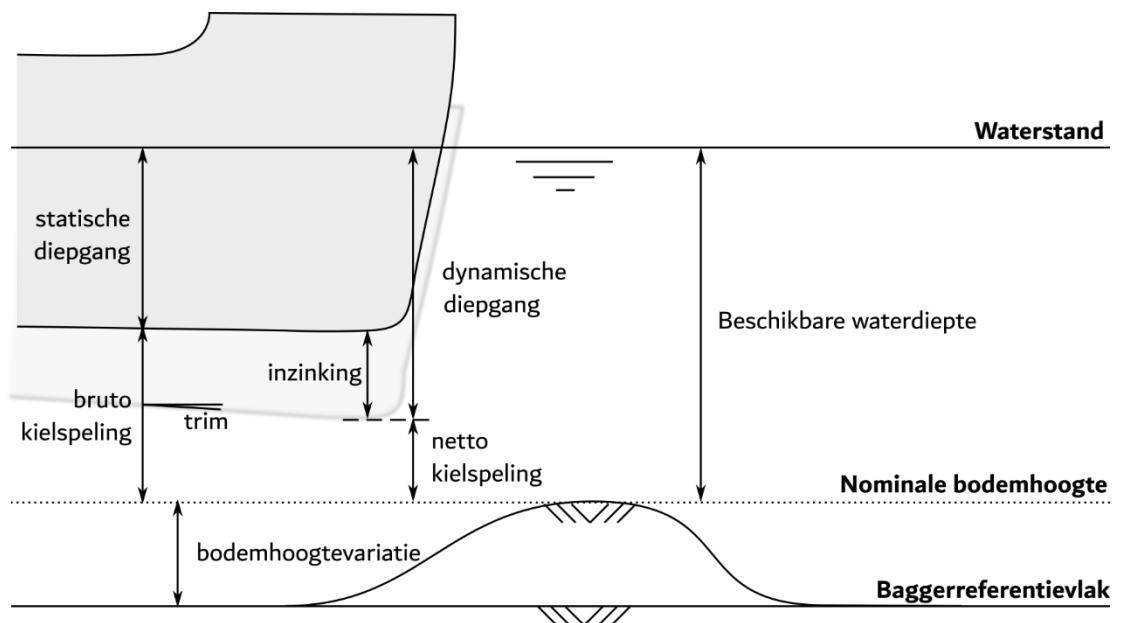
Maatregelen worden overwogen om in de toekomst op langere trajecten de rivierbodem vast te leggen. Verder onderzoek naar het effect hiervan op de kielspeling is noodzakelijk. Dit onderzoek kan daar aan bijdragen.

¹ <https://www.rijkswaterstaat.nl/nieuws/archief/2020/10/werkzaamheden-vaste-laag-nijmegen>

Ter illustratie van de problematiek volgt hier een analyse van de (redenen voor) verschillende eisen voor diverse situaties in de huidige richtlijnen. Op kanalen en gestuwde rivieren moet de vaarweg worden ingericht met een kielspeling van 40% (Koedijk, 2020). In de benedenrivieren wordt een kleinere kielspeling aangehouden omdat de natte doorsnede van de vaargeul groot is: een kielspeling van 10% bij OLW (Koedijk, 2020). Bij sluizen geldt voor klasse Vb een kielspeling van 70 cm en voor klasse Vla een kielspeling van 100 cm (Koedijk, 2020). Op de vrij afstromende rivieren varieert de waterdiepte en wordt er geen kielspeling voorgeschreven. De aflaaddiepte is de verantwoordelijkheid van de schippers. In de praktijk wordt rekening gehouden met een gehanteerde kielspeling van 20 à 40 cm (Platform Zero Incidents, 2016), dit blijkt ook uit de vergelijking tussen MGD en IVS90-gegevens (De Jong, 2020). Bij vaste lagen is geen gehanteerde kielspeling bekend.

2.1.1 Terminologie

Term	Definitie
Inzinking	Een varend schip veroorzaakt een waterstandsdepressie (primaire sloopgolf, t.g.v. retourstroming) rondom het schip. Hierdoor ontstaat een verticale inzinking van het schip en een rotatie van het schip in lengterichting (trim).
Trim	De rotatie van een schip in lengterichting.
Squat	Het gecombineerde effect van inzinking en trim.
Statische diepgang	De diepgang van een schip dat stilligt (ten opzichte van het water).
Dynamische diepgang	De diepgang van een schip dat beweegt (ten opzichte van het water).
Bruto kielspeling	De kielspeling van een stilliggend schip (= beschikbare waterdiepte – statische diepgang).
Netto kielspeling	De werkelijke kielspeling tijdens het (varend) passeren van de ondiepte (=beschikbare waterdiepte – dynamische diepgang).
Beschikbare aflaaddiepte	De <i>maximale diepgang</i> tot waar een schip kan worden afgeladen voor een reis.



Figuur 2.1 Definitieschets

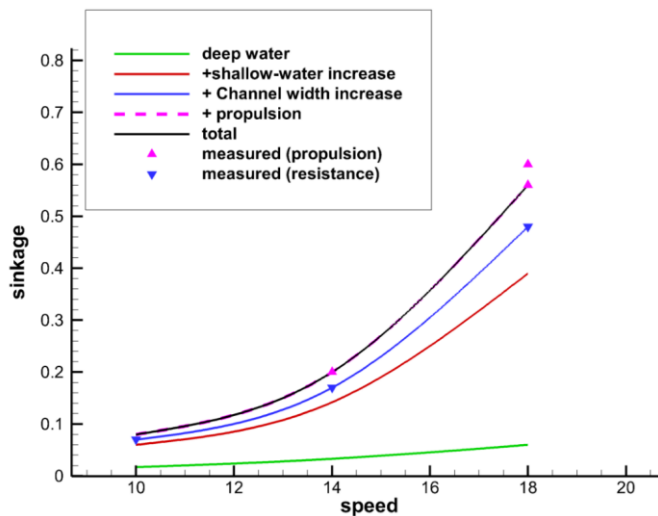
2.1.2 Literatuurstudie inzinking

Binnen dit verdiepende onderzoek is een beperkte literatuurstudie uitgevoerd. Deze is primair gericht op resultaten van het meerjarige onderzoek van MARIN en Rijkswaterstaat naar de benodigde verticale marges (De Boer & Ten Hove, 2021).

De inzinking van een schip is afhankelijk van verschillende factoren. Deze kunnen onderverdeeld worden in scheepsgelateerde eigenschappen (breedte, lengte, snelheid over water, positie in vaarweg), vaarwegkenmerken (variatie in waterdiepte, stroomsnelheid, vaarwegbreedte) en de aanwezigheid van andere (oplopende en ontmoetende) schepen.

De incidentele dynamische inzinking kan oplopen tot vele decimeters. Door het MARIN is de problematiek als volgt samengevat (De Boer, 2021): Een schip in de opvaart heeft een initiële inzinking van 20 à 30 cm. Bij het oplopen van een ander schip, zal dit toenemen met nogmaals 20 cm. Door het vertrimmen tijdens het oplopen ontstaat bij de boeg nog eens extra 15 à 20 cm inzinking. Dit geeft een totale (maximale) inzinking van 55 à 70 cm.

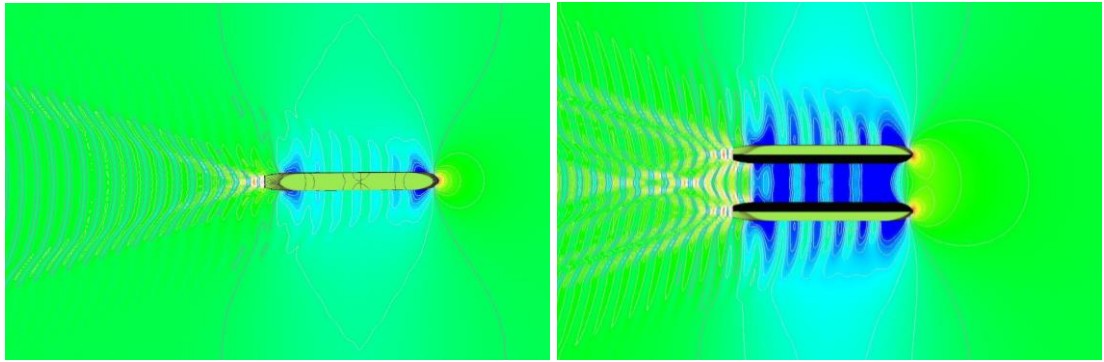
De invloed van diverse factoren op de mate van inzinking is gegeven in Figuur 2.2 op basis van metingen in schaalmodelexperimenten. De grootste bijdrage wordt geleverd door de snelheid van het schip over water (horizontale as) en de beperking in waterdiepte (van groene naar rode lijn). De beperking in vaarwegbreedte (naar blauwe lijn) en het effect van de voortstuwing (naar zwarte lijn) hebben minder invloed.



Figuur 2.2 Inschatting van de bijdrage van factoren in de (gemeten) inzinking (m) als functie van de snelheid (km/uur). (Figuur afkomstig uit Raven, 2021).

Door MARIN zijn de schaalmodelexperimenten vergeleken met de formulering van onder meer Römisch (1989). Hieruit wordt geconcludeerd voor de onderzochte situaties met een 110m binnenschip deze formulering een goede benadering geeft van de inzinking (Raven, 2021).

De retourstroming en waterstandsdepressie (primaire scheepsgolf) zijn het sterkst direct rondom een schip (zie Figuur 2.3 links). Als tijdens een oplooptoestand de afstand tussen de schepen klein is, zullen de primaire golven elkaar beïnvloeden en neemt hierdoor de inzinking ook toe (zie Figuur 2.3 rechts). Deze bijdrage wordt al duidelijk merkbaar (groter dan 5 cm) als de afstand (romp tot romp) 60 m bedraagt (ruim 5 scheepsbreedtes). In de weergegeven positie is de inzinking vermoedelijk het grootst. De trim is echter het grootst als de voorschouder van het oplopende schip ter hoogte is van de achterschouder van het schip dat opgelopen wordt (Cotteleer, 2021).



Figuur 2.3 Gesimuleerde waterstandsgolven (potentiaalmodellering met RAPID) van varend schip (links) en tijdens een olopmanoeuvre met een hul-tot-hul afstand van minder dan 2 scheepsbreedtes (rechts). (Figuur afkomstig uit Raven, 2021)

2.2 Methodiek

Het bepalen van de werkelijke inzinking van een schip is complex, en in de empirische vergelijkingen zijn hiervoor onvoldoende details opgenomen.

De grootste uitdaging in dit onderzoek komt door de grote variatie in breedte en diepte van de vaarweg. Denk hierbij aan zowel variatie over de dwarsdoorsnede, als in lengterichting ten gevolge van bodemvormen (duinen en banken). Beiden zijn van grote invloed op de retourstroming en daardoor ook op de inzinking van het schip.

In de gebruikte rekenmethode wordt gerekend met een constante vaarsnelheid, terwijl in werkelijkheid de snelheid afhankelijk is van de weerstand die een schip ondervindt. Een betere aanpak zou zijn om een constant motorvermogen aan te nemen. Ten slotte biedt de empirische vergelijking van Römisch geen mogelijkheid om oplopende schepen mee te nemen.

Deze beperkingen hebben er toe geleid dat de volgende (pragmatische) aanpak wordt gehanteerd:

1. Onderzoek naar de representatieve (bodemhoogte en) waterdiepte voor berekening van de retourstroming.
2. Berekening van de inzinking bij deze waterdiepte. Waar parametrisering in de formules niet mogelijk is, wordt gebruik gemaakt van enkele globale aannames.

Beide stappen uit de methodiek worden hieronder toegelicht.

2.2.1 Bodemhoogte- en waterdieptevariatie bij een rivierafvoer van 1.020 m³/s

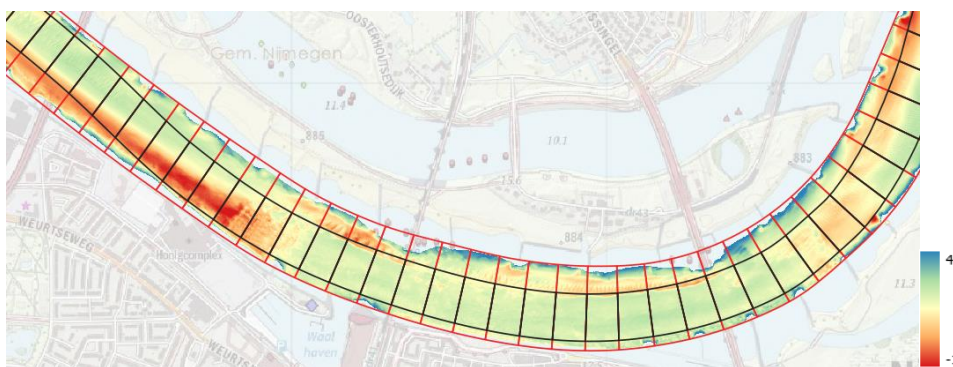
De bodemhoogte in een rivier als de Waal is sterk variabel in de ruimte. Enerzijds door alluviale bodemvormen (duinen en banken) anderzijds door vaste bodemconstructies en het effect hiervan op het rivierbed. Enkele voorbeelden van een (jaargemiddelde) bodemhoogte zijn te zien in Figuur 2.4 en Figuur 2.5.

Voor het berekenen van de retourstroming en inzinking dient hieruit een representatieve waarde bepaald te worden. Een vergelijking is gemaakt tussen verschillende representaties van deze bodemhoogte. Voor de interpretatie is iedere bodemhoogte omgerekend naar een waterdiepte door gebruik te maken van waterstanden uit de modelsimulaties uit De Jong & Van der Mark (2020). De waterdiepte is gegeven bij een afvoer bij Lobith van 1.020 m³/s. In Figuur 2.6 en Figuur 2.7 zijn de volgende bodemhoogtebenaderingen weergegeven:

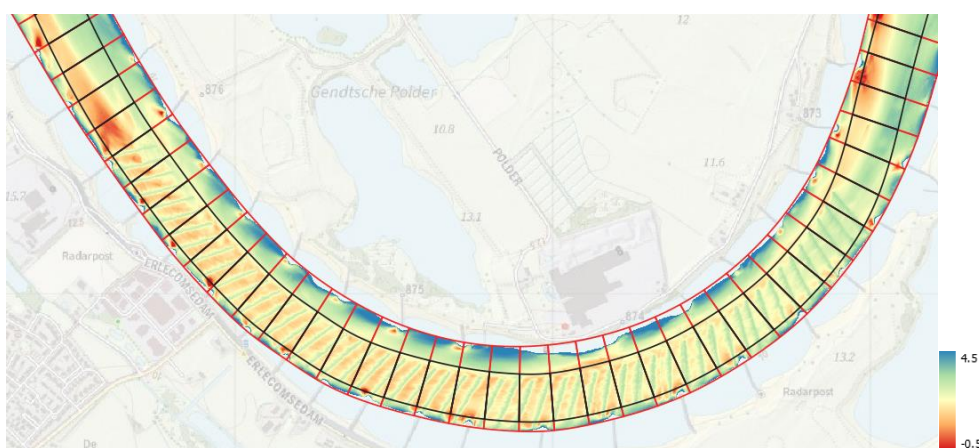
- De representatieve bodemhoogte berekend in KBN (De Jong & Van der Mark, 2020). Dit geeft de meest ondiepte locatie in een (geïdealiseerde) vaargeul. Deze bodemhoogte is een benadering van de MGD's in de vaargeul.
- De gemiddelde hoogte in de P-mapanalyse van RWS-ON (Van Putten, 2021). Deze analyse berekent voor het zomerbed (kribkop tot kribkop) de gemiddelde bodemhoogte per hectometervak.
- De bodemhoogte op drie koersen in de vaargeul: in het midden van de vaargeul en op 40 m links en rechts uit het midden.
- De bodemhoogte in hectometervakken binnen enkel de vaargeul. Gegeven zijn het gemiddelde, en de percentielen 50%, 70% en 95%.

De berekeningen voor de laatste twee punten zijn in deze studie uitgevoerd. Hierbij is gebruik gemaakt van de jaargemiddelde bodemhoogte van 2017.

Zoals blijkt uit de waterstandsdepressie in Figuur 2.3, concentreert de retourstroming zich rondom het schip. Er wordt vermoed dat de mediane (50% percentiel) bodemhoogte het meest representatief is om als bodemhoogte te gebruiken bij de berekening van de retourstroming. De KBN bodemhoogte kijkt juist naar de grootste ondieptes in de vaargeul en is niet representatief voor de gemiddelde diepte, de bodemhoogten uit de P-mapanalyse neemt te sterk het ondiepere zomerbed buiten de vaargeul mee, en de gekozen koersen geven enkel de zeer lokale bodem. De keuze voor de mediane bodemhoogte dient verder onderzocht te worden, met numerieke of schaalmodelexperimenten.



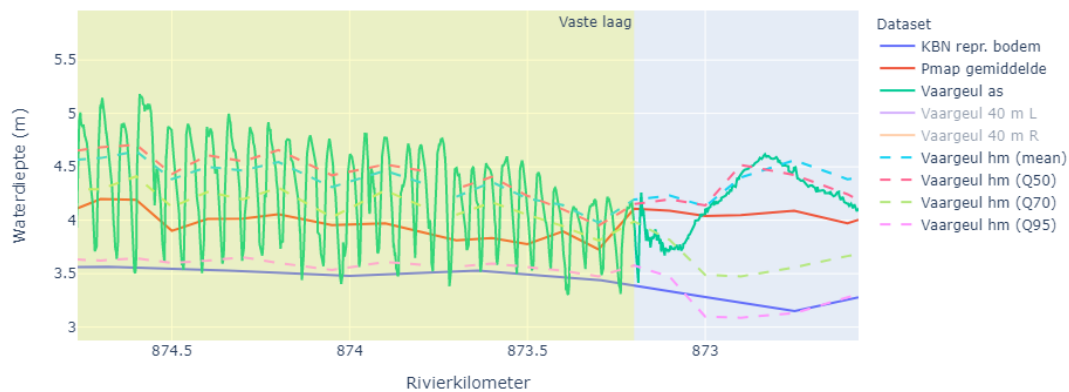
Figuur 2.4 Jaargemiddelde (2017) bodemhoogte bij Nijmegen. In zwart de vaargeul, in rood het zomerbed. De vakindeling is per hectometer.



Figuur 2.5 Jaargemiddelde (2017) bodemhoogte bij Erlecom. In zwart de vaargeul, in rood het zomerbed. De vakindeling is per hectometer.



Figuur 2.6 Waterdiepte ter hoogte van Nijmegen bij een afvoer bij Lobith van $1.020 \text{ m}^3/\text{s}$. Om de informatie leesbaar te houden is de figuur opgesplitst. In de bovenste figuur staat de waterdiepte op drie locaties in de vaargeul: midden van de vaargeul, 40 m links uit het midden, 40 m rechts uit het midden. In de onderste figuur is informatie samengevat per hectometervak volgens verschillende methodieken: de representatieve bodemhoogte van KBN (blauw), en de gemiddelde waterdiepte volgens de P-mapmethodiek (rood). Daarnaast zijn voor ieder hectometervak het gemiddelde en de percentielen 50%, 70% en 95% berekend.



Figuur 2.7 Waterdiepte ter hoogte van de bovenstroomse zijde van de bodemkribben bij Erlecom bij een afvoer bij Lobith van $1.020 \text{ m}^3/\text{s}$. Weergegeven zijn de waterdiepte in de vaargeul as (groen), de waterdiepte ten opzichte van de representatieve bodemhoogte van KBN (blauw), en de waterdiepte volgens de P-mapmethodiek (rood). Daarnaast zijn voor ieder hectometervak het gemiddelde en de percentielen 50%, 70% en 95% berekend.

2.2.2 Berekening inzinking

De berekening van de inzinking van de boeg is uitgevoerd met de formule van Römisch (1989; zoals beschreven in PIANC, 2014) waarvoor door Raven (2021) een goede overeenstemming met de metingen is gevonden. De berekening is uitgevoerd voor een M8 type schip met een (statische) diepgang van 2,4 m.

Een snelheid is aangehouden van 12 km/uur (3,3 m/s) en dit wordt verhoogd met een stroomsnelheid van 1 m/s, waardoor een snelheid door het water ontstaat van 4,3 m/s (15,5 km/uur).² De vaarweg wordt geschematiseerd met een constante breedte van 230 m en de mediane waterdiepte in de vaargeul bij een afvoer van 1.020 m³/s. Deze rekenmethode staat verder toegelicht in Bijlage A.1 en A.2.

De extra inzinking die ontstaat bij het oplopen van een schip, is met de formule van Römisch niet te berekenen. Dit is bovendien afhankelijk van de dimensies, snelheid en afstand van de schepen. Daarnaast kan ten gevolge van de oploopmanoeuvre ook de vaarsnelheid (of benodigde vermogen) veranderen. Uit de literatuurstudie (zie sectie 2.1.2) bleek dat een inzinking van 20 à 30 cm bij een oploopmanoeuvre kan toenemen met 20 cm. Voor het verkrijgen van meer inzicht in de werking wordt momenteel nog meer onderzoek uitgevoerd. Als benadering wordt aangenomen dat een oplopend schip een verdubbeling ondervindt van de initiële inzinking.

Bij een sterke toename in inzinking ondervindt het schip extra trim. Dit speelt bij een oploopmanoeuvre (Cotteleer, 2021), maar ook bij een plotselinge verandering in waterdiepte. Een voorbeeld hiervan is een opvaart van de vaste laag bij Nijmegen, waarbij de (mediane) waterdiepte afneemt van 4,9 m (bij de erosiekuil) naar 3,4 m (bij de vaste laag). Aangenomen wordt dat bij een plotselinge toename in inzinking, de toename in inzinking bij de boeg een factor 1,5 groter kan zijn. Deze aanname is onderbouwd in Bijlage 0. Daarnaast kan de trim nog groter zijn door dynamische effecten, bijvoorbeeld ten gevolge van de translatiegolven die ontstaan door grote veranderingen in de geometrie.

2.3 Resultaten en interpretatie

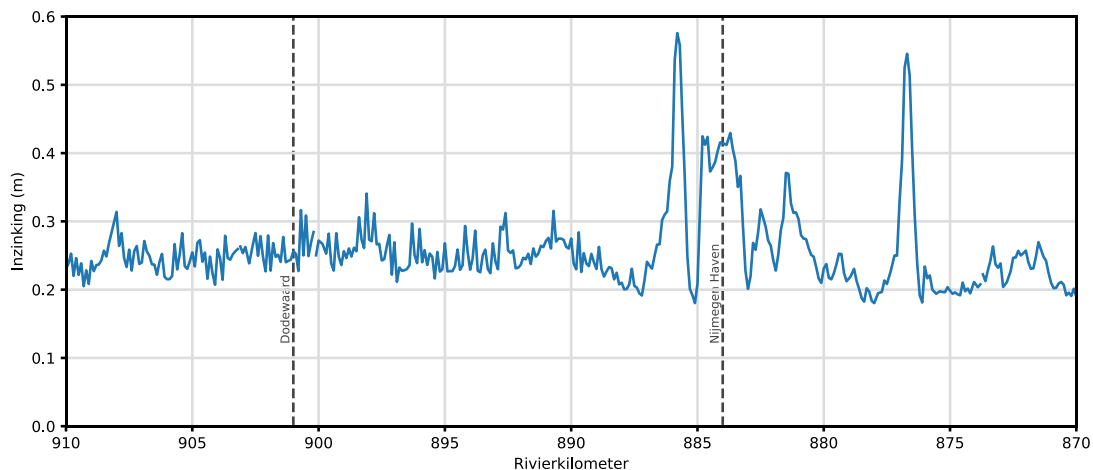
De berekende inzinking is weergegeven in Figuur 2.8. Bij de gekozen uitgangspunten ontstaat voor dit schip tijdens het merendeel van de vaart een inzinking van ongeveer 20 à 30 cm. Bij enkele locaties neemt de inzinking plotseling significant toe.

De pieken bij rkm 877 en 886 zijn vermoedelijk niet realistisch en het resultaat van de methodiek om de bodemhoogte te benaderen. Bij beide locaties is er sprake van lokale ondiepten in de vaargeul, terwijl een groot deel van de rivierdoorsnede niet ondiep is en door een erosiekuil zelfs veel dieper dan elders in de rivier. De keuze voor de mediane bodemhoogte is hier waarschijnlijk geen goede benadering, waardoor de inzinking in werkelijkheid kleiner zou zijn (zie ook gevoeligheidsanalyse voor de gebruikte bodemhoogte in Bijlage A.4.1).

De toename in inzinking rondom de vaste laag bij Nijmegen (rkm 884) is vermoedelijk wel realistisch. Hier heeft de bodem over de hele dwarsdoorsnede ongeveer dezelfde hoogte (zie Figuur 2.4) waardoor de keuze van de bodemhoogtebenadering minder effect heeft op de uitkomsten. Door de ondiepte bij de vaste laag neemt de inzinking met ruim 10 cm toe (bij gelijke vaarsnelheid).

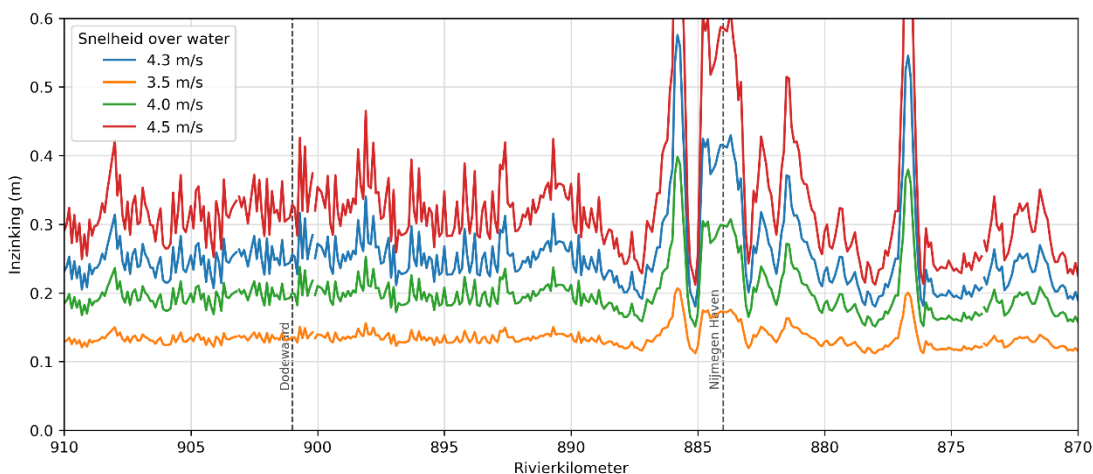
Omdat in deze berekening de rivierbreedte constant is aangenomen (230 m) is een gevoeligheidsstudie uitgevoerd naar het effect van veranderingen in de breedte op de inzinking, bijvoorbeeld ten gevolge van maatregelen. De resultaten zijn gegeven in Bijlage A.4.2 en geven een toename in de inzinking van 2 tot 10 cm.

² De vaarsnelheid kan hoger liggen. Door de grotere weerstand van een schip bij kleine waterdieptes, neemt de vaarsnelheid echter af. De gekozen waarde van 12 km/uur is een eerste inschatting.



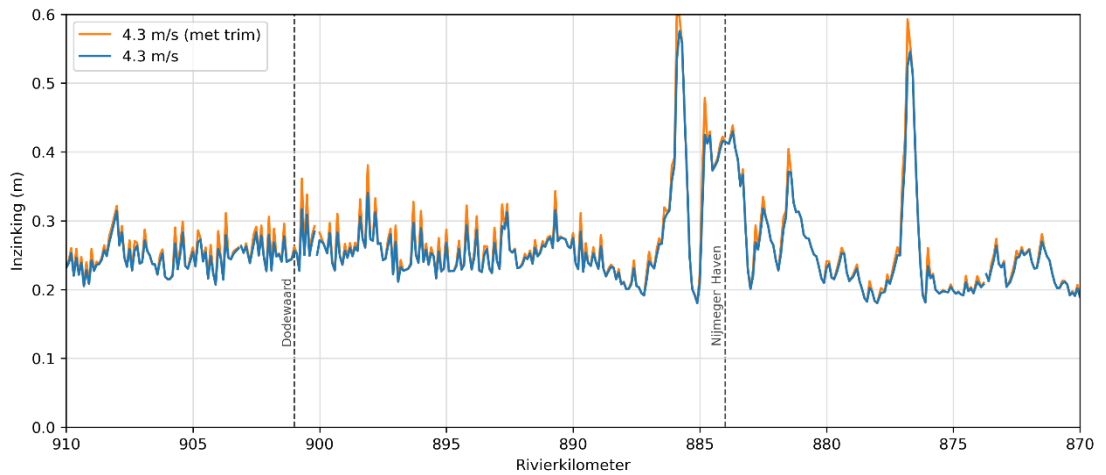
Figuur 2.8 Inzinking als functie langs de rivier bij een afvoer van $1.020 \text{ m}^3/\text{s}$, voor een beladen M8 schip met constante snelheid van $4,3 \text{ m/s}$ en (statische) diepgang van $2,4 \text{ m}$.

Zoals al bleek uit de literatuurstudie (Figuur 2.2), is de inzinking sterk afhankelijk van de vaarsnelheid. Het effect van de vaarsnelheid (over water) is getoond in Figuur 2.9. Bij een afname van de vaarsnelheid met $0,3 \text{ m/s}$ (naar $4,0 \text{ m/s}$) neemt de inzinking al af met 10 cm . Bij een afname tot $3,5 \text{ m/s}$ over water ($2,5 \text{ m/s}$ over grond) is de inzinking al afgenomen tot de helft. Het reduceren van de vaarsnelheid is hierdoor effectieve maatregel om inzinking te beperken.



Figuur 2.9 Effect van een hogere of lagere snelheid op de inzinking

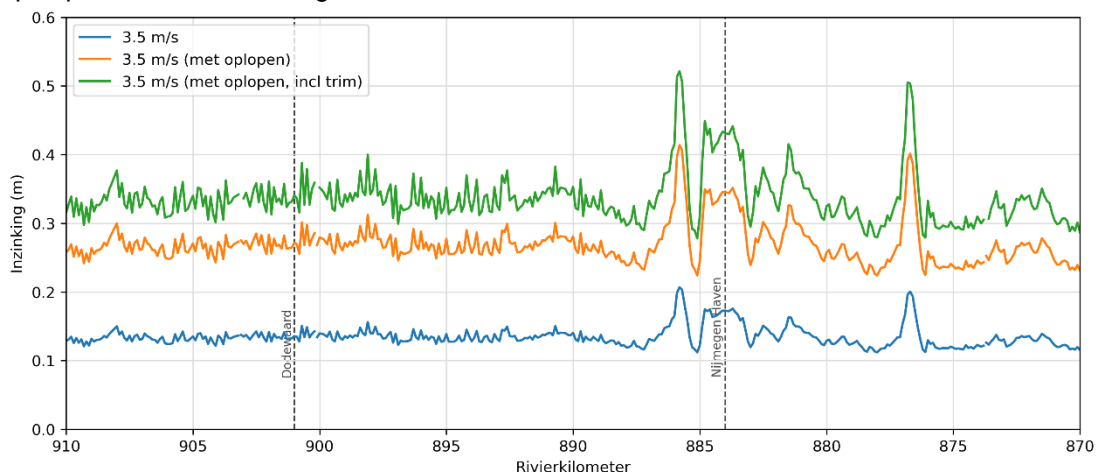
De globale inschatting van de gevolgen van trim is weergegeven in Figuur 2.10 voor een opvarend schip. Telkens wanneer een schip ondieper water invaart en daardoor de inzinking bij de boeg plotseling toeneemt, zal door de trim die dit geeft een extra inzinking bij de boeg ontstaan. Een realistisch voorbeeld hiervan is het opvaren van de vaste laag bij rkm 885. De mate van trim is slechts een grove inschatting, maar de analyse toont aan dat bij de locaties waar sterke toename in inzinking optreedt ook zeker rekening gehouden moet worden met de extra trim die dit oplevert.



Figuur 2.10 Een eerste inschatting van het effect van trim op de berekening van de inzinking van de boeg (squat) op basis van de verandering in inzinking. Voor kwantitatieve resultaten ontbreekt nog een (empirische) formulering.

Ten slotte wordt het effect van een oplopend schip op de totale inzinking bij de boeg (squat) gegeven in Figuur 2.11, waarbij uitgegaan wordt van een schip varende met een snelheid van 3,5 m/s. De waarden uit deze figuur dienen slechts als een grove inschatting omdat goede kwantitatieve onderbouwing nog ontbreekt. Daar waar de inzinking ten gevolge van ondiepte het grootst is, is ook de inzinking ten gevolge van oplopende schepen het grootst. Hierdoor komt wederom de vaste laag van Nijmegen (rkm 884) naar voren. Door de plotselinge toename in inzinking bij het oplopen van een schip ontstaat ook grote extra inzinking bij de boeg ten gevolge van de trim.

Het oplopen bij een vaste laag heeft hierdoor – zelfs bij de gereduceerde vaarsnelheid – een inzinking van ruim 0,4 m (een toename met 0,3 m). Bij berekeningen met een vaarsnelheid van 4,3 m/s neemt dit zelfs toe tot 0,8 m, maar is er scepsis naar de toepasbaarheid van de (empirische) formuleringen omdat de snelheid bijna gelijk is aan de grenssnelheid. Deze inzinking komt echter wel overeen met de situatie die door Cotteleer (2021) is geëvalueerd, waarin ondanks een statische kielspeling van ongeveer 0,8 m er sprake was van schade bij de boeg door het raken van de bodemkribben bij Erlecom, doordat met hoge snelheid een oplooptoernooi werd uitgevoerd.

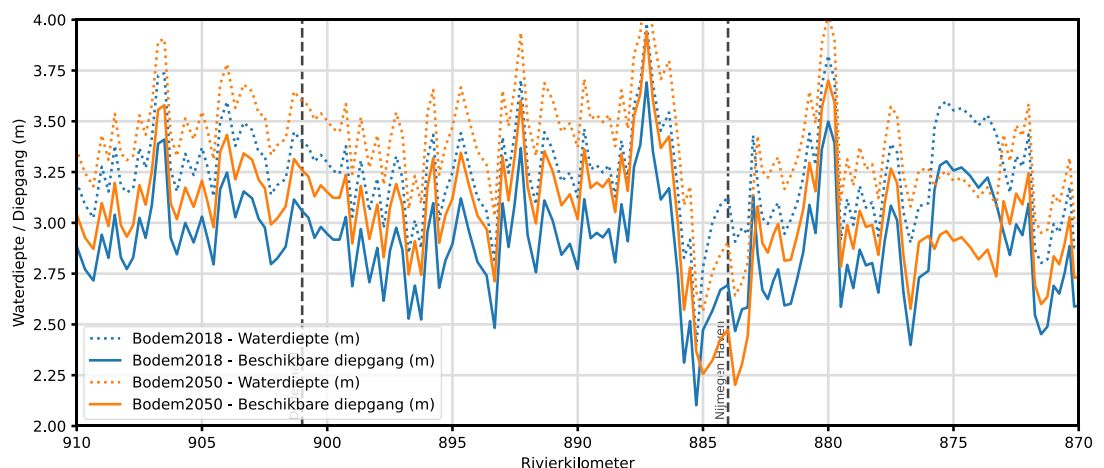


Figuur 2.11 Een inschatting van het effect van een oplooptoernooi op de inzinking. Gegeven is de gemiddelde inzinking (als schepen zij-aan-zij varen) en een eerste inschatting van de inzinking bij de boeg ten gevolge van de trim als de voorschouder van het oplopende schip zich ter hoogte van de achterschouder van het opgelopen schip bevindt.

Om te bepalen tot welke diepgang de schepen kunnen worden afgeladen (beschikbare aflaaddiepte), is de waterdiepte (uit De Jong & Van der Mark, 2020) verminderd met de berekende dynamische inzinking bij de boeg (de groene lijn uit Figuur 2.11).³ De beschikbare aflaaddiepte kan vervolgens worden bepaald door het minimum hiervan te nemen op de vaarroute. Deze berekening is uitgevoerd voor de bodemligging van 2018 en van 2050. Vanwege budgettaire beperkingen is voor het scenario 2050 de inzinking niet opnieuw berekend en is aangenomen dat dit (vrijwel) gelijk blijft.⁴

Uit de resultaten (Figuur 2.12) blijkt dat in de situatie met de bodemligging 2018 de MGD bij Nijmegen (direct benedenstrooms van rkm 885) beperkend is voor de aflaaddiepte (ongeveer 2,1 m). Door de bodemerosie en de hieruit resulterende toename in afvoer naar de Waal, neemt in de toekomst de waterdiepte bij de MGD-locaties toe, maar vormt de vaste laag een steeds grotere drempel. Door rekening te houden met de grotere inzinking bij de vaste laag, wordt de vaste laag de maatgevende locatie voor het bepalen van de beschikbare aflaaddiepte. In tegenstelling tot de hiervoor genoemde MGD, kan om de vaste laag niet heen gevaren worden. Bij een afvoer bij Lobith van 1.020 m³/s kan daardoor nog slechts met een aflaaddiepte van 2,2 m gevaren worden in het 2050-scenario.

Deze risico's op bodemcontact kunnen verkleind worden door de snelheid te reduceren, of ter plaatse van het knelpunt geen oplooptoernooi uit te voeren. Daarnaast kan (bij gelijkblijvend risico) ook geprofiteerd worden van deze maatregelen (d.w.z. snelheidsreductie en/of oplooptoernooi) doordat gevaren kan worden met een grotere aflaaddiepte.



Figuur 2.12 Beschikbare aflaaddiepte (in de figuur weergegeven als beschikbare diepgang), door de waterdiepte bij 1.020 m³/s bij Lobith te verminderen met de berekende inzinking. Voor de inzinking is gebruik gemaakt van de groene lijn uit Figuur 2.11. De waterdiepte komt overeen met de resultaten uit De Jong & Van der Mark (2020).

2.4 Conclusies

Onderzoek is uitgevoerd naar de variatie in inzinking bij een opvaart van de Waal. De mate van inzinking is sterk afhankelijk van met name de vaarsnelheid.

³ Deze methode gaat uit van een kielspeling van 0 m bij het punt met de kleinste marges op de route. De inzinking op dit punt is berekend met conservatieve uitgangspunten, zoals dat een oplooptoernooi precies start op het moment van passage van het knelpunt.

⁴ Omdat de waterdiepte in het 2050 scenario over het algemeen groter is dan in het 2018 scenario (behalve bij de vaste laag bij Nijmegen), wordt de inzinking in 2050 overschat (en onderschat bij vaste laag). De getoonde beschikbare aflaaddiepte voor 2050 in Figuur 2.12 geeft dus over het algemeen een te pessimistisch beeld (een te lage waarde), behalve bij de vaste laag bij Nijmegen waar de beschikbare aflaaddiepte waarschijnlijk wordt overschat.

Voor een maatgevend schip is de gemiddelde inzinking ongeveer 20 à 30 cm. Bij de vaste laag van Nijmegen neemt dit toe tot ruim 40 cm. Daarnaast ontstaat er extra inzinking door trim op het moment van het opvaren van de vaste laag. Het effect van inzinking en trim kan sterk gereduceerd worden door de snelheid tijdelijk te verminderen.

Oploopmanoeuvres ter hoogte van locaties met beperkte waterdiepte hebben een nog groter effect. Bij beperkte afstand tussen de schepen (en bij hoge vaarsnelheid van beide schepen) zal de inzinking significant toenemen. Een verdubbeling van de eerder genoemde inzinking is hierbij realistisch.

De conclusies van dit verkennende onderzoek hebben grote impact op de berekening van de beschikbare aflaaddiepte in de Waal. Om te voorkomen dat het schip in contact komt met de bodem moet een veel grotere kielspeling in acht worden genomen dan de waarde van 0,2 m die in de praktijk doorgaans wordt toegepast en waar tot nu toe mee gerekend is om de beschikbare diepgang te bepalen.

Daarnaast blijkt uit de resultaten, dat bij voortzetting van de autonome bodemerosie, de grotere inzinking bij de vaste laag bij Nijmegen er in de toekomst voor zal zorgen dat dit de beperkende ondiepte wordt op de route naar Duitsland.

Door nautische maatregelen kan de inzinking aanzienlijk beperkt worden. Zo kan de inzinking al sterk afnemen bij een kleine beperking van in de vaarsnelheid. Door oploopmanoeuvres op kritieke locaties te voorkomen, ofwel door goede communicatie of door oploopverboden, wordt de kans op (te) grote inzinking nog verder gereduceerd.

2.5 Aanbevelingen

In het uitgevoerde onderzoek zijn grote globale aannames noodzakelijk geweest om de inzinking te berekenen op iedere locatie in de rivier. Dit verkennende onderzoek kan daarom slechts gebruikt worden als eerste indicatie, waarbij wel een goed beeld wordt gevormd van de werking van het systeem, maar de kwantitatieve resultaten nog zeer globaal zijn.

Dit onderzoek bouwt sterk voort op resultaten van MARIN in samenwerking met RWS (De Boer & Ten Hove, 2021). Uit dat onderzoek zijn al diverse waardevolle resultaten naar voren gekomen. De daar onderzochte scenario's zijn echter nog relatief abstract en lastig te vertalen naar een rivier, door de grote variatie in de werkelijke rivierbodem.

Er is nu aangenomen dat de mediane bodemhoogte in de vaargeul gebruikt kan worden voor de berekening van de kielspeling. Een verdergaande theoretische analyse van de methode van Römisch kan gebruikt worden om te komen tot een verbeterde benadering. Gedacht kan worden aan een methode waar de bodem vlakbij het schip (in de vaargeul) een zwaardere weegfactor heeft dan de bodem verder van het schip vandaan (buiten de vaargeul). Deze aanname kan verder onderbouwd worden met behulp van modelonderzoek. Zowel schaalmodellen als numerieke potentiaalmodellen zijn hiervoor geschikt.

Er is nu aangenomen dat de vaarsnelheid constant is. Op een locatie met dieptebeperkingen, waarbij doorgaans grotere inzinking optreedt, zal de grenssnelheid echter lager zijn, waardoor bij constant motorvermogen de vaarsnelheid afneemt. Aanbevolen wordt om uit te zoeken of dit meegenomen dient te worden in de berekeningen, of dat in het kritieke scenario ervan uit kan worden gegaan dat door de traagheid van het schip de snelheid nog nauwelijks is afgenomen. Een één-dimensionale (1D) numerieke modellering met WAROS is hiervoor geschikt. Hiermee worden het squat-effect berekend voor variërende rivierdoorsneden (incl. stroming). De beperkte rekentijd van WAROS geeft mogelijkheden om dit voor veel verschillende situaties door te rekenen.

Ten slotte kan de verkennende methode, zoals toegepast in dit onderzoek, nog verder toegepast worden om meer kennis te verkrijgen van de werking van het systeem. De methode kan uitgebreid worden voor verschillende rivierafvoeren, en in de berekening van de snelheid door het water kan rekening gehouden worden met de ruimtelijk variërende stroomsnelheid.

3 Kabels en leidingen in een eroderende rivier

3.1 Introductie

In het eerdere onderzoek (De Jong & Van der Mark, 2020) is bij de studie naar bodemhoogte 2050 aangenomen dat de locatie van kabels en leidingen mee (kunnen) eroderen met de alluviale rivierbodembodem. Impliciet neemt deze methodiek aan dat er ofwel een reductie in de dikte van de afdeklaag plaats kan vinden, ofwel dat de kabels en leidingen (K&L) verlaagd worden bij voortschrijdende bodemerosie. In werkelijkheid is dat meestal niet zo: (vergunningen voor) kabels en leidingen vereisen dat een afdeklaag voldoende op dikte moet worden gehouden en de bodem ter plaatse dus niet mag eroderen. Ook het verlagen van kabels en leidingen zal in de meeste gevallen niet zomaar mogelijk zijn.

Dit resulteert in de volgende onderzoeksvragen:

1. Wat is het effect van de ligging van kabels en leidingen (inclusief afdeklaag) op de waterdiepte in de rivier?
2. Kan deze ligging zorgen voor (nieuwe) ondiepteknelpunten in de rivier?
3. Hoe verhouden deze knelpunten zich tot andere knelpunten?

Uit voorbereidende discussies is gebleken dat het een groot risico voor het onderzoek is dat de gegevens van kabels en leidingen niet voldoende beschikbaar zijn. In overleg met Rijkswaterstaat (RWS) is afgesproken een (vrij grote) aanname te doen over de locatie en benodigde bodemhoogte (hoogte leiding + deklaag) van alle kabels en leidingen. Hiertoe wordt de locatie van de leidingen benaderd met de niet-baggerlocaties van RWS en de hoogte aangenomen uit de (meest) actuele bodemligging. Daarnaast zijn ook locaties vanuit het project Basis Rivierbodempligging beschikbaar gesteld en gebruikt in de analyse. Er is binnen RWS een programma gestart (Gronddekking Gevaarlijke Leidingen, GRGL) waarmee de ligging van kabels nauwkeuriger in beeld wordt gebracht.

Voor de bepaling van de bodemerosie wordt wederom gebruik gemaakt van de prognose van de bodemhoogte 2050 (Sloff, 2019). Met deze informatie en de ligging van de kabels en leidingen worden twee scenario's voor de bodemontwikkeling gepresenteerd voor 2050, namelijk:

- 2050A: Erosie bij de locaties van kabels en leidingen (De Jong & Van der Mark, 2020);
- 2050B: Geen erosie bij de locaties van kabels en leidingen (deze rapportage).

Voor de nieuwe bodemhoogte en de (al berekende) waterstanden voor 2050 wordt de waterdiepte in de vaargeul bepaald als langdoorsnede van de rivier.

3.2 Methodiek

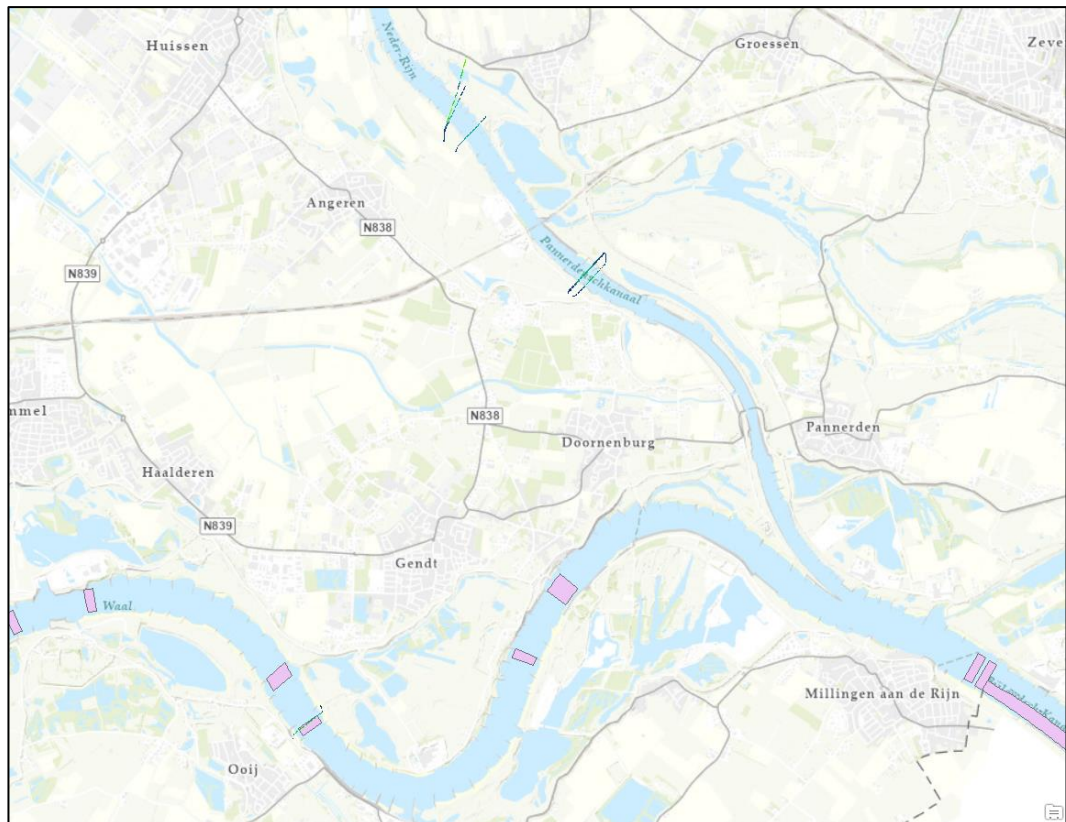
De ligging van kabels is niet duidelijk, of kan om vertrouwelijkheidsredenen niet altijd met even grote zekerheid worden vastgesteld. Binnen dit onderdeel van het project is daarom voor een pragmatische aanpak gekozen: Na navraag binnen Rijkswaterstaat hebben we twee databronnen voor de ligging van kabels en leidingen of zones waarbij de bodem niet mag eroderen:

- Niet baggerzones in de Boven-Rijn en Waal (Rijkswaterstaat – Oost Nederland)
- Functie-eisen ten behoeve van de afdeklaag voor kabels en leidingen zoals bepaald in de Basis Rivierbodempligging (Flierman & Van der Sleen, 2021).

Een voorbeeld van de gebruikte bronnen is te zien in Figuur 3.1.

De niet-baggerzones op Duits grondgebied⁵ zijn niet meegenomen aangezien dit waarschijnlijk zones zijn waar vanwege internationale afspraken niet door RWS gebaggerd wordt. We gaan er vanuit dat dat deel van de rivier wel wordt onderhouden, maar waarschijnlijk niet onder Nederlands contract. Van alle niet-baggerzones zijn de dichtstbijzijnde hectometerlocaties⁶ vastgesteld. In het scenario 2050B wordt op deze locaties de bodemligging van 2018 in stand gehouden (geen erosie toegestaan), terwijl voor de rest van de rivier de prognose van Sloff (2020) blijft gelden, zoals eerder gebruikt in De Jong & Van der Mark (2020).

Voor de locaties waarvoor de functie-eis is bepaald in BRL-kader, wordt de hoogte verkregen uit de BRL gegevens. Deze gegevens worden opgewerkt tot blokken van 25 x 25 m. Deze hoogte wordt vervolgens gekoppeld aan een hectometerpunt en aangenomen als afdekhogte van kabels en leidingen.



Figuur 3.1 Voorbeeldweergave van functie eis bodem ligging uit de BRL (in Pannerdensch Kanaal) en bij Ooij. De roze vlakken laten de niet baggerzones zien in de Boven-Rijn en Waal.

Vanuit deze twee bronnen voor de kabels en leidingen (K&L) zijn locaties vastgesteld waar de bodem potentieel niet mee-erodeert. Omdat de precieze hoogte van de leidingen en de afdeklaag onbekend is, hebben we besloten om hiervoor twee scenario's te hanteren. Het eerste scenario (2050A) is dat de bodem ook bij K&L mee kan eroderen. In het tweede scenario (2050B) kan of mag de bodem bij K&L niet eroderen.

⁵ De landsgrens loopt tussen Spijkse Veer en Lobith over de as van de Boven-Rijn

⁶ In deze studie wordt voortgebouwd op de langsdorsneden van de waterdiepte uit De Jong & Van der Mark (2020) waarin waterstanden en bodemhoogte berekend zijn per 300 m. Om de verwijzing hiernaar niet overbodig complex te maken wordt hiernaar verwezen als 'hectometers'.

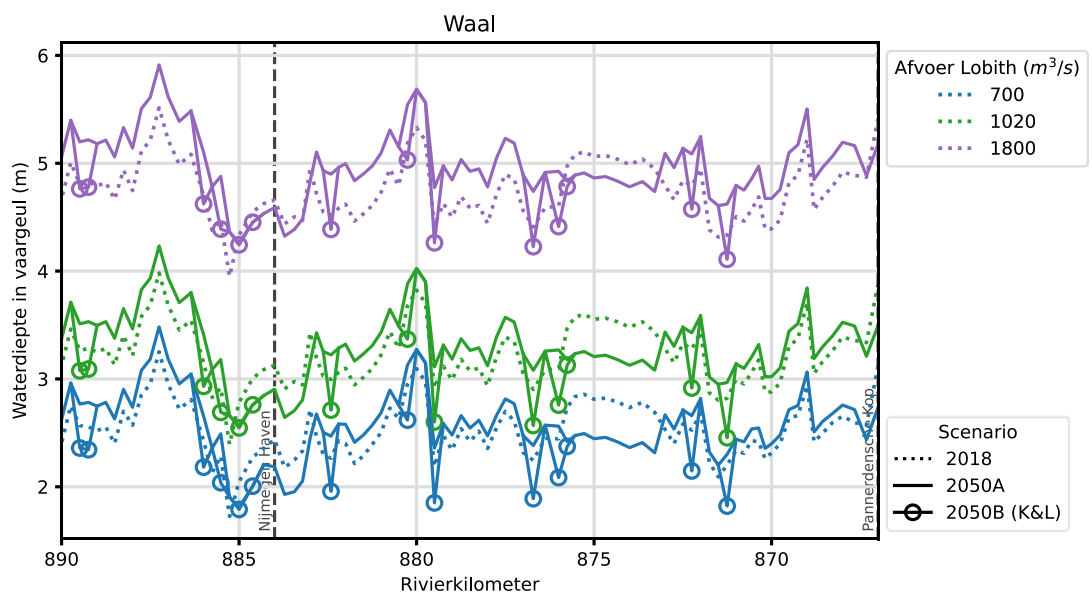
In het scenario blijft de bodem vast op de ligging van 2018 op trajecten waar sprake is van erosie, maar bij aanzanding stijgt de bodem wel mee en is de ligging voor 2050 zoals in De Jong & Van der Mark (2020).

Er wordt aangenomen dat de ligging van de kabels en leidingen op deze bodemhoogte, ondanks de lichte (en lokale) verhoging, geen effect heeft op de globale waterstanden in de rivier. Met deze aanname zijn geen nieuwe hydraulische berekeningen nodig. De waterstanden voor 2050 (De Jong & Van der Mark, 2020) worden gebruikt om de waterdiepte voor de scenario's 2050A en 2050B te berekenen.

3.3 Resultaten en interpretatie

Ter illustratie van de resultaten van het onderzoek is in Figuur 3.2 het risico van de kabels en leidingen weergegeven op de Boven-Waal, het traject met de grootste bodemerosie. De lijnen in deze figuur geven de waterdiepte ten opzichte van de alluviale rivierbodem (gelijk aan De Jong & Van der Mark, 2020). Ten gevolge van de bodemerosie daalt de bodem hier ongeveer 0,5 m. Hierdoor neemt de rivierafvoer naar de Waal sterk toe. Uit de hydrodynamische simulaties is gebleken dat hierdoor de waterdiepte op een groot deel van dit traject juist toeneemt. Ter hoogte van de vaste lagen (Erlecom bij rkm 875, en Nijmegen bij rkm 884) erodeert de bodem niet, en neemt daardoor de waterdiepte wel af.

Met markeringen is aangegeven wat de waterdiepte ter hoogte van de kabels en leidingen is in scenario 2050B, waarbij de bodem bij kabels en leidingen op gelijke hoogte blijft liggen als in 2018. De waterdiepte bij de 20 kabels en leidingen op dit traject geeft op meerdere plekken (rkm 871, 876, 879 en 883) voor een vergelijkbare waterdiepte als de MGD-locatie bij Nijmegen. Ieder van deze locaties is een potentieel risico in het geval van vrije bodemerosie van de Boven-Waal. Voor het verder beoordelen van dit risico is het noodzakelijk de werkelijke hoogte van de kabels en leidingen te weten.



Figuur 3.2 Waterdiepte op de Boven-Waal in 2018 en in 2050 ten gevolge van ongehinderde bodemerosie (scenario 2050A), en met de aanname dat ter hoogte van de kabels en leidingen (K&L) de bodem niet erodeert of niet mag eroderen (scenario 2050B). Beide scenario's hebben gelijke resultaten behalve bij de locaties van de kabels en leidingen.

Een overzicht van mogelijke nieuwe knelpunten ten gevolge van kabels en leidingen is weergegeven in Tabel 3.1. De complete tabel met resultaten is in bijlage B opgenomen in tabelvorm en in bijlage C in figuren.

Met name op de Waal is het risico van beperkende ondiepten door kabels en leidingen groot. In de Boven-Waal kan de waterdiepte tot ongeveer 50 cm afnemen ten opzichte van de situatie waarin op deze locaties de bodem wel kan eroderen. Op de IJssel is rond rkm 884 een waterdiepte afname van 15 cm te zien en verder benedenstrooms bij rkm 900 een afname van 6 cm. Op de Nederrijn is geen verschil zichtbaar. Op de IJssel en Nederrijn wordt het effect op waterdiepte voornamelijk gestuurd door de afname van de rivierafvoer.

Tabel 3.1 Locaties met kabels en leidingen waarbij niet wordt voldaan (rode markering) aan de minimale diepte eis (Op de Boven-Rijn en Waal 2.8 m, en 2.5 m op de overige riviertakken). De laatste kolommen geven de afname in de waterdiepte in het scenario zonder erosie bij kabels en leidingen (2050B) ten opzichte van de huidige waterdiepte (2018) en het scenario met erosie (2050A).

Tak	Rivierkilometer	Waterdiepte bij 1.020 m ³ /s (m)			Verschil (m)	
		2018	2050A	2050B	2050B – 2018	2050B – 2050A
Waal	871.3	2.82	2.97	2.45	-0.37	-0.52
	876.0	3.10	3.27	2.76	-0.34	-0.51
	876.7	2.90	3.08	2.57	-0.33	-0.51
	879.5	2.92	3.11	2.60	-0.32	-0.51
	882.4	2.99	3.22	2.71	-0.28	-0.51
	884.6	3.01	2.76	2.76	-0.25	0.00
	885.0	2.78	2.57	2.55	-0.23	-0.02
	885.5	2.92	3.18	2.69	-0.23	-0.49
IJssel	883.8	2.41	2.23	2.08	-0.33	-0.15
	883.9	2.42	2.24	2.09	-0.33	-0.15
	884.0	2.25	2.08	1.92	-0.33	-0.16
	904.4	2.73	2.49	2.43	-0.30	-0.06
Nederrijn	892.8	2.57	2.49	2.49	-0.08	0.00

De aanname dat de bodem niet erodeert bij K&L (2050B) is waarschijnlijk niet helemaal in overeenstemming met de werkelijkheid, maar geeft een uiterste grens weer met de grootste hinder voor de scheepvaart. Het scenario waarbij de bodem bij K&L volledig mee-erodeert met de omliggende bodem (2050A) geeft het andere uiterste met mogelijke schade aan kabels en leidingen tot gevolg. Beide scenario's gaan ervan uit dat de prognose van de bodemtrends volgens Sloff (2020) na 32 jaar nog steeds stand houdt.

De knelpunten bij kabels en leidingen zouden hinder of overlast kunnen veroorzaken, maar het blijft lastig om precies te bepalen hoeveel, aangezien de beschikbare informatie onvolledig is. Naast de ligging (x,y,z) van de leidingen en kabels is ook niet bekend of er een afdeklaag is aangebracht. Er is dus een duidelijk verschil met de berekening van bijvoorbeeld een vaste laag, waarvan duidelijk is dat deze niet zal eroderen, en daarmee ook beter te voorspellen is hoe groot het knelpunt is.

3.4 Conclusies

De mogelijk consequenties van het niet mee-eroderen van de locaties met kruisende kabels en leidingen zijn een geringere waterdiepte voor de scheepvaart ter plekke. Wanneer erosie wel mogelijk is bij de kabels en leidingen, treedt mogelijk schade aan de kabels en leidingen op.

Deze studie naar de invloed van de bodemligging bij locaties met kabels en leidingen op de waterdiepteontwikkeling heeft aangetoond dat meerdere locaties met kabels en leidingen op de Boven-Waal een risico kunnen vormen. Reeds bestaande knelpunten op de Boven-Waal en Boven-IJssel kunnen verergeren. Ten opzichte van de omliggende eroderende rivierbodem kan bij locaties met kabels en leidingen een drempel van 50 cm ontstaan op de Waal en 15 cm op de IJssel.

3.5 Aanbevelingen

We realiseren ons dat er mogelijk nog kabels en leidingen in ons overzicht ontbreken, en het is ook mogelijk dat de niet-baggerzones niet in alle gevallen wijzen op een onderliggende kabel of leiding. Ook andere kruisingen van de rivier zoals tunnels kunnen op een vergelijkbare wijze een risico vormen, maar zijn in het Rijntakkegebied niet gevonden. Het precies in kaart brengen van de locaties en hoogtes van kabels en leidingen is erg belangrijk voor het gebruik van de vaarwegcorridor. In het project Gronddekking Gevaarlijke Leidingen wordt gewerkt aan betere kennis van de K&L. Ook in het nieuwe prestatiecontract nat (pc-nat) zijn hiervoor activiteiten opgenomen (zie ook Van Putten, 2021).

Er is aangenomen dat de waterstandseffecten vrij lokaal zijn doordat de leidingen een beperkt langtraject van de rivier kruisen. Mocht er toch sprake zijn van langere trajecten met kruisende leidingen, is het raadzaam om ook het opstuwende effect op de waterstand mee te nemen in nieuwe hydraulische berekeningen.

4 Conclusies

In het eerste onderzoek wordt ingegaan op de aanname dat de benodigde kielspeling constant is, waarbij wordt gekeken naar het effect van ruimtelijk variërende waterdiepte op de inzinking van schepen. Voor een M8 schip wordt de inzinking berekend met de empirische formulering van Römisch. Voor de gemiddelde waterdiepte wordt gebruik gemaakt van de mediane bodemhoogte in de vaargeul. De mate van inzinking is sterk afhankelijk van met name de vaarsnelheid. Bij hoge vaarsnelheid is de inzinking 20 à 30 cm. Bij ondiepten, zoals de vaste laag van Nijmegen, neemt dit toe tot 40 cm. Bij een oploopmanoeuvres kan een verdubbeling van de inzinking ontstaan. Oplopen ter hoogte van ondieptes is daardoor een groot risico.

Het tweede onderzoek gaat in op het effect van kabels en leidingen in een eroderende rivierbodem. De exacte hoogte en ligging van de kabels en leidingen is in dit onderzoek niet beschikbaar. Als benadering is aangenomen dat de kabel of leiding (of de afdeklaag) direct onder de huidige rivierbodem ligt. Bij een eroderende rivier mag bij deze kabels en leidingen geen erosie plaatsvinden, waardoor dit een drempel kan vormen. Op de Boven-Waal en IJssel zijn diverse kabels en leidingen geïdentificeerd die in dit scenario een ondiepteknelpunten gaan vormen.

Beide onderzoeken dienen als eerste inventarisatie en voor het uitlichten van risico's. Grote aannames zijn noodzakelijk geweest om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden. Dit verkennende onderzoek kan daarom slechts gebruikt worden als eerste indicatie, waarbij wel een goed beeld wordt gevormd van de werking van het systeem, maar de kwantitatieve resultaten nog zeer globaal zijn.

Voor beide deelonderzoeken is het noodzakelijk om verder onderzoek uit te voeren indien op basis van deze verkenning een kwantitatieve benadering gewenst is. Hiervoor wordt het volgende aanbevolen:

- In het onderzoek naar de inzinking is de toegepaste empirische formulering van Römisch te simplistisch van vorm om de ingewikkelde geometrie van de Waal mee te nemen. Hiervoor zijn uitgebreidere berekeningen noodzakelijk met (potentiaal)modellen.
- In het onderzoek naar kabels en leidingen ontbreekt informatie over de precieze locatie en hoogte van de kabels en leidingen, of van de afdeklaag. Door RWS-ON wordt de hoogte van kabels en leidingen momenteel ingemeten. Aanbevolen wordt om na verzameling van deze gegevens de toetsing nogmaals uit te voeren.

Referenties

- De Boer, W. (2021) Voorstel Tekst "squat" t.b.v. best practice guide Platform Zero Incidents
- De Boer, W. & Ten Hove, D. (2021). Vaargedrag binnenschepen op rivieren, beperkt vaarwater, validatie m.b.v. modelproeven. Werkplan 2021. MARIN project 30957, v3.0, d.d. 2021-04-13
- Cotteleer, A. (2020) Squat of an inland ship (110 m) in shallow water. Model test results, numerical and numerical calculations. MARIN rapport 30957-4-SHIPS, v1.0
- Cotteleer, A. (2021) Analyse aan de grond geraakt binnenvaartschip. Locatie: bodemkribben in de bocht bij Erlecom. MARIN rapport 70125
- Flierman, M. & N. van der Sleen (2021) Factsheets BasisRivierbodempligging kaarten - versie 1.7. Rijkswaterstaat, Utrecht, the Netherlands.
- De Jong, J.S. & R. van der Mark (2020). KBN-HVWN Stresstest droogte Rijntakken: Toestand van het Systeem en Kwetsbaarheid gebruiksfunctie. Deltares rapport 11205274-004-BGS-0022 v1.1, d.d. 7 mei 2021
- De Jong, J.S. (2020). Stresstest Droogte Rijntakken – Impact op de scheepvaart. Deltares rapport v1.1, kenmerk 11205274-004-BGS-0009
- Koedijk, O. C. (2020), Richtlijnen vaarwegen 2020, Tech. rep., Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving.
- PIANC (2014) Harbour approach channels design guidelines. Report 121 Maritime navigation commission
- Platform Zero Incidents (2016) Informatieblad berekenen aflaaddiepte
- Raven, H.C. (2021) Squat of inland ships in shallow water. Further analysis of contribution to dynamic sinkage. MARIN report 30957-9-RD
- Römisch (1989): "Empfehlungen zur Bemessung von Hafeneinfahrten", Wasserbauliche Mitteilungen der Technischen Universität Dresden Heft 1:39-63.
- Sloff, K. (2019). Prognose bodemligging Rijntakken 2020-2050. Trends voor scheepvaart en waterbeschikbaarheid. Deltares rapport 11203738-005-BGS-0008.
- Van Putten, D. (2021), Analyse en advies over ondieptes in de vaargeul Waal, Memo, Rijkswaterstaat, Arnhem, the Netherlands.

A Inzinking berekend door Römisch

A.1 Berekening Römisch

De onderstaande formuleringen zijn van toepassing op een kanaal met een beperkte breedte. Raven (2021) concludeert dat dit geldig is tot een breedte van 340 m. Voor de Waal kan deze formulering daarom toegepast worden. De formules staan uitgebreid toegelicht in PIANC (2014) en in Cotteleer (2020).

De formule berekent de squat bij de boeg ($S_{b,R}$) en het hek ($S_{s,R}$) in meter.

$$S_{b,R} = C_V C_F K_{\Delta T} T$$

$$S_{s,R} = C_V K_{\Delta T} T$$

Met C_V als correctiefactor voor de scheepssnelheid, C_F als correctie voor de scheepsvorm en $K_{\Delta T}$ als een correctiefactor voor de squat bij kritische vaarsnelheid. Deze coëfficiënten staan gedefinieerd als:

$$C_V = 8 \left(\frac{V}{V_{Cr}} \right)^2 \left[\left(\frac{V}{V_{Cr}} - 0.5 \right)^4 + 0.0625 \right]$$

$$C_F = \left(\frac{10C_B}{L_{pp}/B} \right)^2$$

$$K_{\Delta T} = 0.155 \sqrt{h/T}$$

Met de snelheid door het water (V), de scheepsdimensies lengte (L_{pp}), breedte (B) en block coëfficiënt (C_B), de diepgang (T) en de waterdiepte (h).

De kritische snelheid (V_{Cr}) (of grenssnelheid) is afhankelijk van de breedte en diepte van de vaarweg. Voor de berekening hiervan is in dit onderzoek gebruik gemaakt voor de berekening van een 'canal'. Hiervoor geldt:

$$V_{Cr} = C_C K_C$$

$$C_C = \sqrt{gh_m}$$

$$K_C = \left[2 \sin \left(\frac{\arcsin(1-S)}{3} \right) \right]^{1.5}$$

Met de valversnelling (g), gemiddelde waterdiepte (h_m) en de blockage factor (S). De blockage factor is de verhouding tussen scheepsoppervlak (A_s) en kanaaloppervlak (A_c).

$$S = \frac{A_s}{A_c} = \frac{B \cdot T}{W \cdot h_m}$$

Met (W) de rivierbreedte op de waterlijn,

A.2 Parametrisering

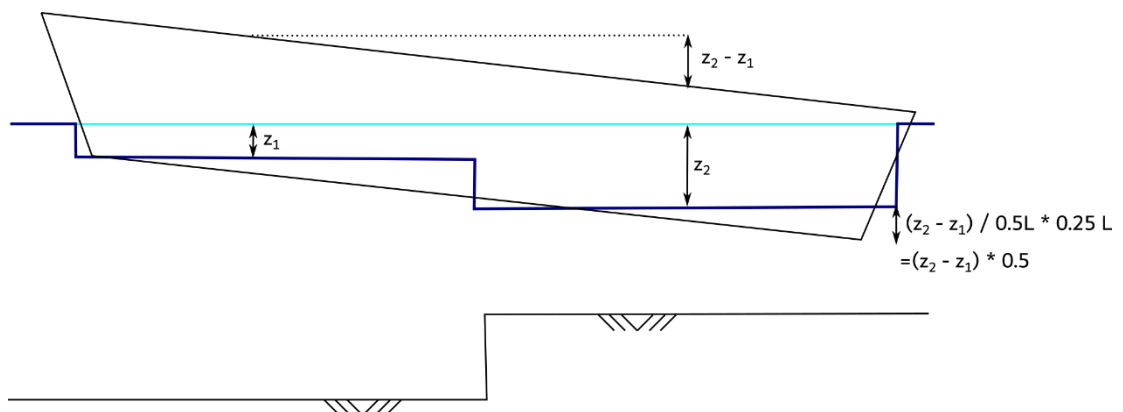
Parameter	Afkorting	Waarde
Vaarsnelheid door het water	V	4,3 m/s
Diepgang	T	2,4 m
Scheepslengte	L_{pp}	110 m
Scheepsbreedte	B	11,4 m
Block coëfficiënt	C_b	0.99
Vaarwegbreedte ¹	W	230 m
Gemiddelde vaarwegdiepte	h_m	variabel (mediane waterdiepte in de vaargeul)

¹ In werkelijkheid varieert de breedte ongeveer tussen 260 m (grotendeels van de rivier) en 230 m (ter hoogte van de langsdammen)

A.3 Inschatting trim

In onderstaande figuur is een schets van een varend schip gegeven. Het hek van het schip (links in de figuur) zit in diep in water, terwijl de boeg (rechts in de figuur) in ondiep water zit. Ten gevolge van de retourstroming is de waterstandsdepressie (donkerblauw) bij de boeg groter dan bij het hek. Doordat de inzinking van het schip deze waterstandsdepressie volgt, ligt de boeg van het schip lager dan het hek, waardoor een trim ontstaat.

In dit onderzoek wordt als benadering van de trim er van uitgegaan dat het schip precies halverwege het opvaren van de ondiepte is. Uitgegaan wordt dat de achterste helft van het schip gemiddeld de inzinking z_1 heeft en de voorste helft van het schip gemiddeld de inzinking z_2 heeft. Door de trim die ontstaat ligt de boeg lager met een waarde $\frac{z_2 - z_1}{2}$. De totale inzinking bij de boeg is dan $z_2 + \frac{(z_2 - z_1)}{2} = z_1 + \frac{3}{2}(z_2 - z_1)$.



Figuur: Schets van de trim die ontstaat doordat de inzinking varieert tussen beide zijden van het schip. Het schip vaart van links naar rechts.

A.4 Gevoeligheidsanalyse

Enkele aanvullende berekeningen zijn uitgevoerd en in deze bijlagen opgenomen.

A.4.1 Effect van de keuze voor de gemiddelde waterdiepte

In dit onderzoek is voor de representatieve (gemiddelde) waterdiepte uitgegaan van de mediane waterdiepte in de vaargeul (vaak de diepste 150 m van de rivier).

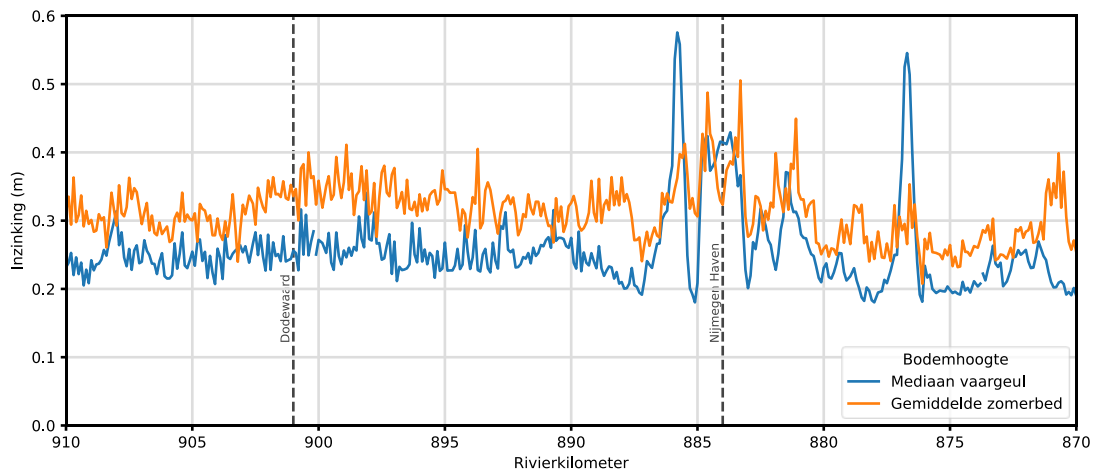
Een andere keuze is de gemiddelde waterdiepte in het gehele zomerbed (ongeveer 230 m breed). Het effect hiervan is weergegeven in onderstaande figuur.

Doordat de waterdiepte in het hele zomerbed over het algemeen lager is dan in enkel de vaargeul, is de inzinking in deze berekening over het algemeen hoger (de oranje lijn ligt hoger dan de blauwe lijn). Dit is een argument om niet te kiezen voor het gehele zomerbed in de berekening van de representatieve bodemhoogte.

De grote pieken bij rkm 877 en 886 zijn niet langer aanwezig omdat aan de overliggende oever juist een grote erosiekuil ligt. Dit is vermoedelijk een realistischer resultaat en een voordeel van het kiezen van het gehele zomerbed in de berekening van de representatieve bodemhoogte.

De vaste laag bij Nijmegen (rkm 884) is nog steeds duidelijk zichtbaar en de resultaten verschillen weinig tussen beide methoden.

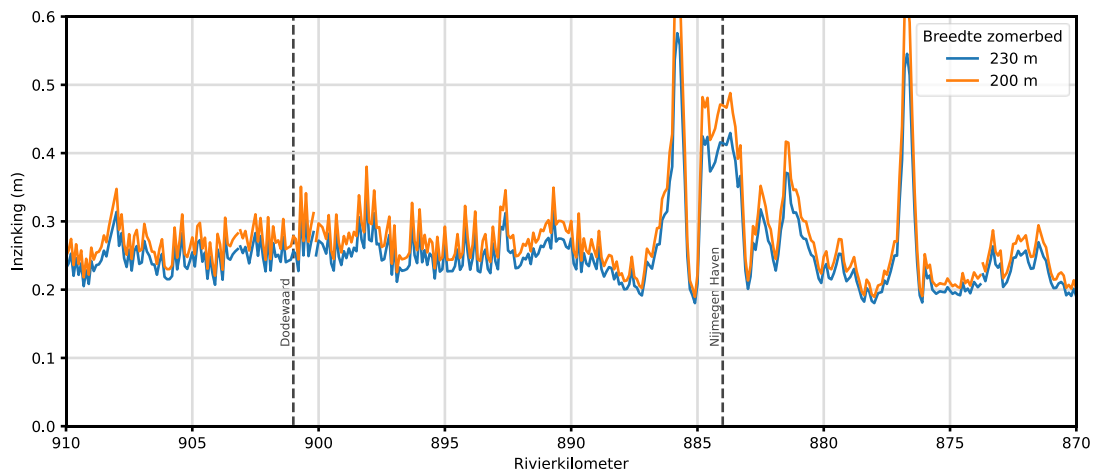
Vermoedelijk zit de waarheid in het midden van deze twee oplossingen. Hiervoor dient echter verder onderzoek uitgevoerd te worden zoals een vergelijking van deze resultaten met modelberekeningen.



Figuur: Effect op de berekening van de inzinking als de representatieve waterdiepte niet bepaalt wordt op basis van de mediaan bodemhoogte in de vaargeul, maar op basis van de gemiddelde bodemhoogte in het zomerbed.

A.4.2 Effect van een versmalling

In onderstaande gevoeligheidsstudie is het effect van een versmalling weergegeven. In dit voorbeeld is het zomerbed versmald van 230 naar 200 m. Het effect hiervan is over het algemeen beperkt. Op locaties waar door ondiepte de vaarsnelheid dicht bij de kritische vaarsnelheid komt (zoals bij rkm 884) en hierdoor de inzinking toeneemt, is ook het effect van de versmalling het sterkst merkbaar. De toename in inzinking is tussen de 2 en 10 cm.



Figuur: Het effect van een versmalling van het zomerbed op de inzinking

B Tabel kabels en leidingen

Tabel B.1: Locaties met kruisende kabels en leidingen en de waterdiepte bij 1.020 m³/s (Minimale diepte eis op de Boven-Rijn en Waal 2.8 m, en 2.5 m op de overige riviertakken, en waterdiepte afname. De afvoer 1.020 m³/s bij Lobith is de overeengekomen lage rivierafvoer) behorende bij de een afvoer die niet vaker dan 20 ijsvrije dagen wordt overgeschreden (ongeveer 5% van de tijd) (Koedijk, 2020). Bij deze afvoer hoort ook een waterstand ook wel OLR (Overeengekomen lage rivierstand)

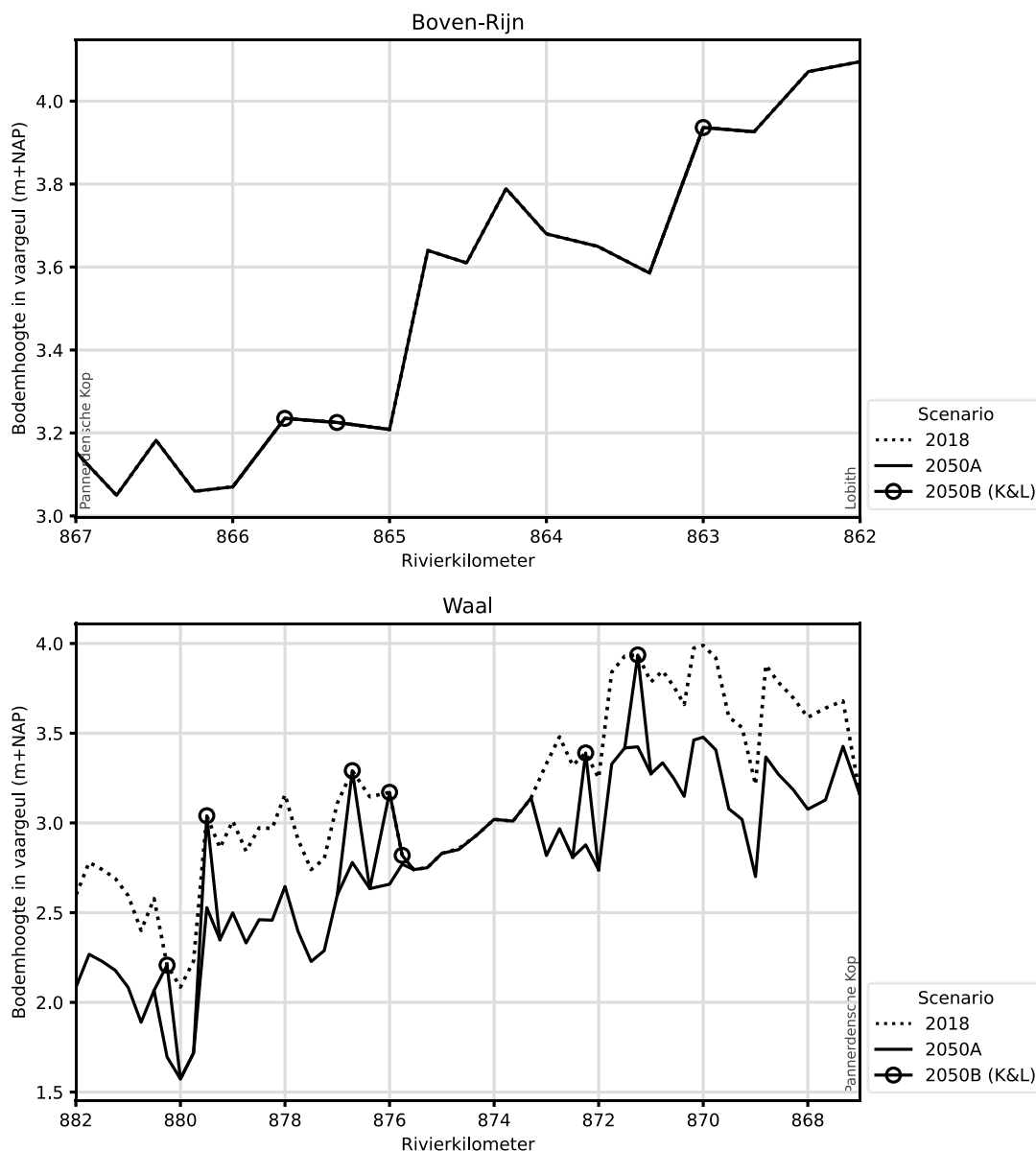
Tak	RKM	Waterdiepte bij 1020 (m)			Verschil (m) 2050A - 2050B
		2018	2050A	2050B	
Boven-Rijn	863.0	3.32	3.01	3.01	0.00
	865.3	3.89	3.54	3.54	0.00
	865.7	3.87	3.51	3.51	0.00
Waal	871.3	2.82	2.97	2.45	0.51
	872.2	3.28	3.43	2.92	0.51
	875.8	3.47	3.18	3.13	0.05
	876.0	3.10	3.27	2.76	0.51
	876.7	2.90	3.08	2.57	0.51
	879.5	2.92	3.11	2.60	0.51
	880.3	3.68	3.88	3.37	0.51
	882.4	2.99	3.22	2.71	0.51
	884.6	3.01	2.76	2.76	0.00
	885.0	2.78	2.57	2.55	0.02
	885.5	2.92	3.18	2.69	0.49
	886.0	3.15	3.41	2.93	0.48
	889.2	3.28	3.53	3.09	0.44
	889.5	3.26	3.51	3.08	0.44
	890.6	3.20	3.45	3.03	0.42
	891.0	3.36	3.60	3.19	0.41
	891.3	3.45	3.69	3.28	0.41
	891.7	3.09	3.33	2.93	0.40
	893.0	3.42	3.65	3.28	0.37
	894.3	3.28	3.50	3.14	0.36
	902.5	3.33	3.53	3.28	0.25
	903.0	3.46	3.65	3.41	0.24
	914.0	3.43	3.65	3.45	0.20
	914.2	3.28	3.50	3.30	0.20
	915.0	3.40	3.63	3.43	0.20
	919.3	3.06	3.30	3.12	0.18
	932.7	4.01	3.98	3.98	0.00
	933.3	3.06	3.03	3.03	0.00
	933.7	4.06	4.03	4.03	0.00
	934.5	3.77	3.74	3.74	0.00
	935.7	3.84	3.81	3.81	0.00
	936.7	3.41	3.39	3.39	0.00
	937.0	3.48	3.46	3.46	0.00
941.3	4.08	4.07	4.07	0.00	
941.7	3.95	3.95	3.95	0.00	
947.7	4.20	4.22	4.22	0.00	
949.0	4.57	4.59	4.59	0.00	
951.8	5.03	5.05	5.05	0.00	

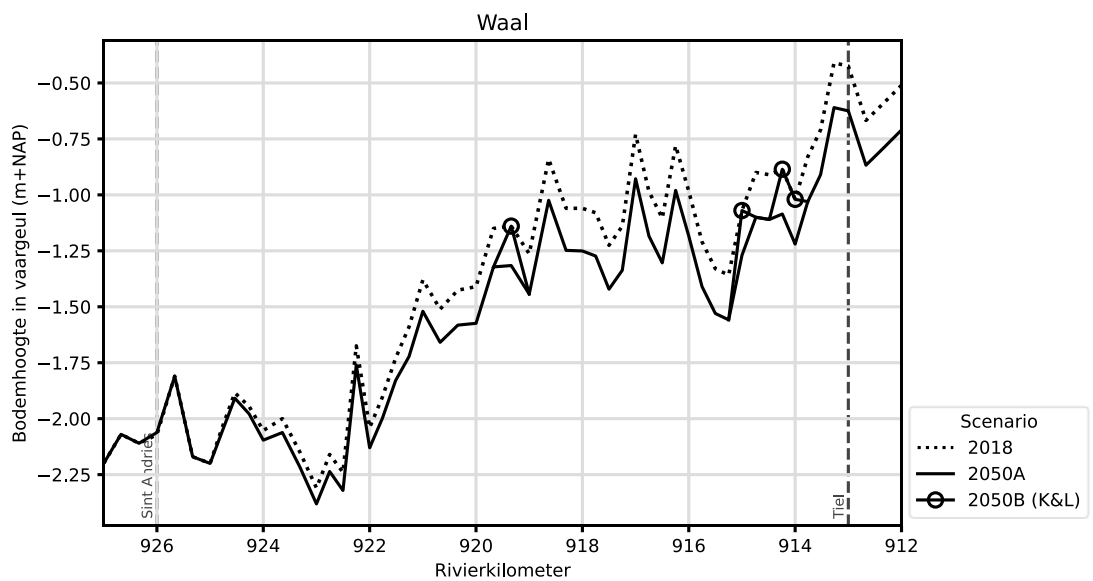
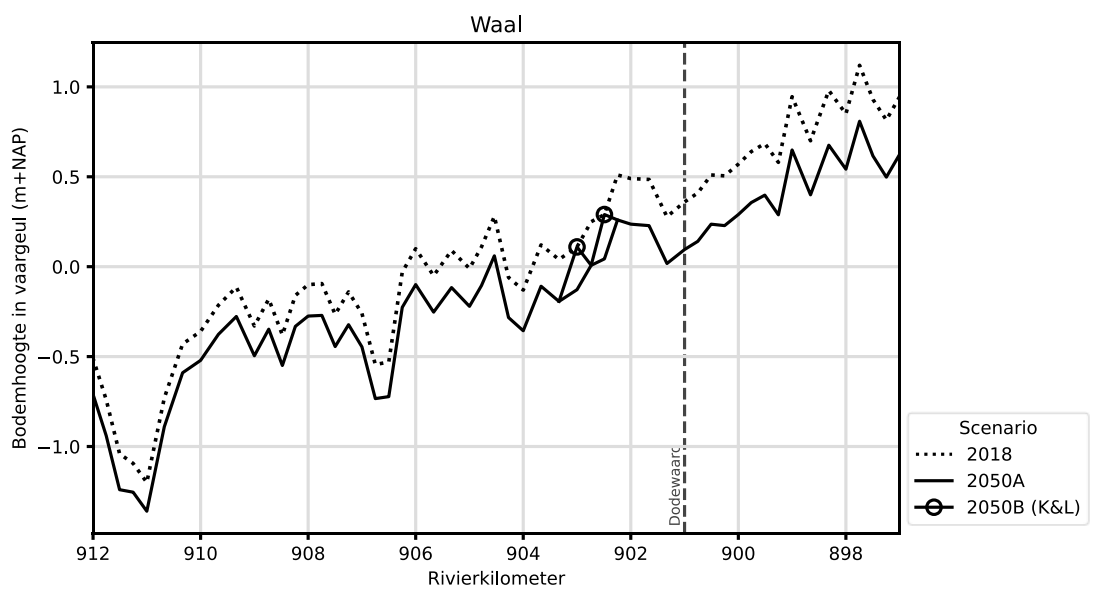
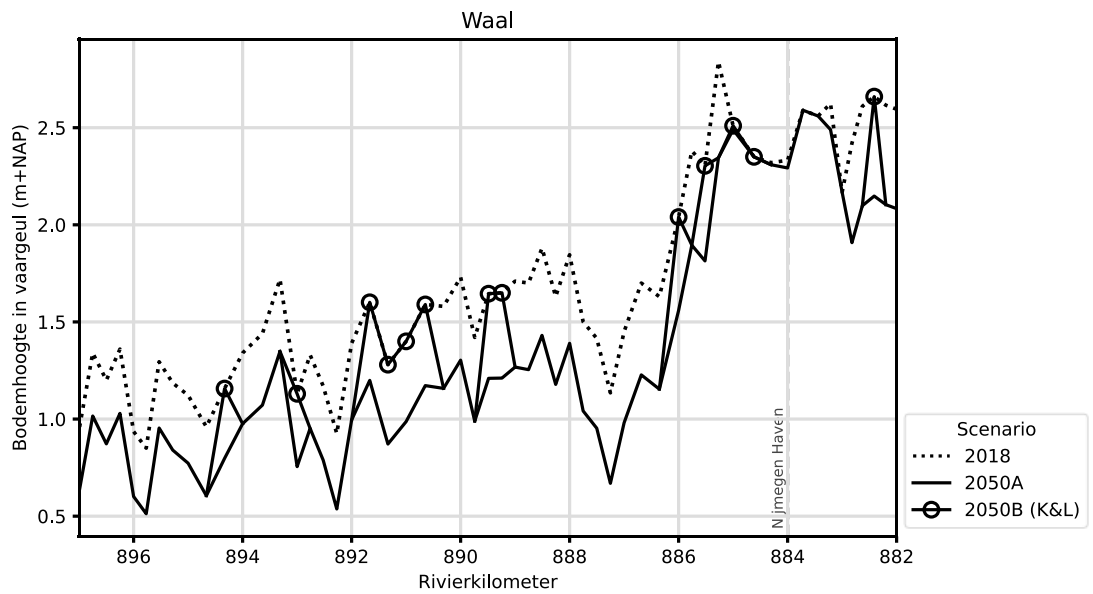
Tak	RKM	Waterdiepte bij 1020 (m)			Verschil (m) 2050A - 2050B	
		2018	2050A	2050B		
Pannerdensch Kanaal	872.5	3.80	3.75	3.43	0.31	
	872.7	3.75	3.70	3.39	0.31	
	874.6	3.82	3.79	3.47	0.32	
	874.8	3.59	3.55	3.23	0.32	
	875.0	3.84	3.79	3.49	0.30	
	875.3	4.01	3.98	3.66	0.32	
Nederrijn_vanafDriel	892.8	2.57	2.49	2.49	0.00	
	893.0	2.91	2.87	2.87	0.00	
	918.2	6.27	6.17	6.17	0.00	
	918.4	6.33	6.24	6.24	0.00	
	926.0	3.26	3.67	3.67	0.00	
	926.7	3.28	3.69	3.69	0.00	
	951.5	4.13	4.03	4.03	0.00	
	953.5	3.39	3.30	3.30	0.00	
		953.7	3.49	3.39	3.39	0.00
		953.7	3.49	3.39	3.39	0.00
IJssel_1	883.8	2.41	2.23	2.08	0.15	
	883.9	2.42	2.24	2.09	0.15	
	884.0	2.25	2.08	1.92	0.17	
	904.0	2.89	2.65	2.59	0.06	
	904.1	2.88	2.63	2.57	0.06	
	904.3	2.85	2.60	2.54	0.06	
	904.4	2.73	2.49	2.43	0.06	
	930.0	2.81	2.55	2.52	0.03	
	930.1	2.88	2.63	2.59	0.03	
	930.3	3.14	2.88	2.85	0.03	
IJssel_2	931.7	3.07	2.82	2.78	0.03	
	931.8	3.00	2.75	2.72	0.03	
	931.9	3.09	2.83	2.80	0.03	
	939.3	3.05	2.82	2.79	0.03	
	939.4	3.20	2.97	2.94	0.03	
	939.6	2.92	2.69	2.66	0.03	
	948.6	3.49	3.29	3.27	0.02	
	948.7	3.14	2.93	2.92	0.02	
	948.8	3.21	3.01	2.99	0.01	
	957.3	3.11	2.92	2.92	0.00	
957.4	3.16	2.97	2.97	0.00		
	957.5	2.96	2.77	2.77	0.00	
IJssel_3	974.0	3.37	3.24	3.24	0.00	
	974.1	3.21	3.09	3.09	0.00	
	974.3	3.45	3.33	3.33	0.00	
	974.4	3.35	3.23	3.23	0.00	
	974.5	3.40	3.28	3.28	0.00	
	979.6	3.27	3.18	3.18	0.00	
	979.7	3.63	3.54	3.54	0.00	
	979.9	3.59	3.49	3.49	0.00	

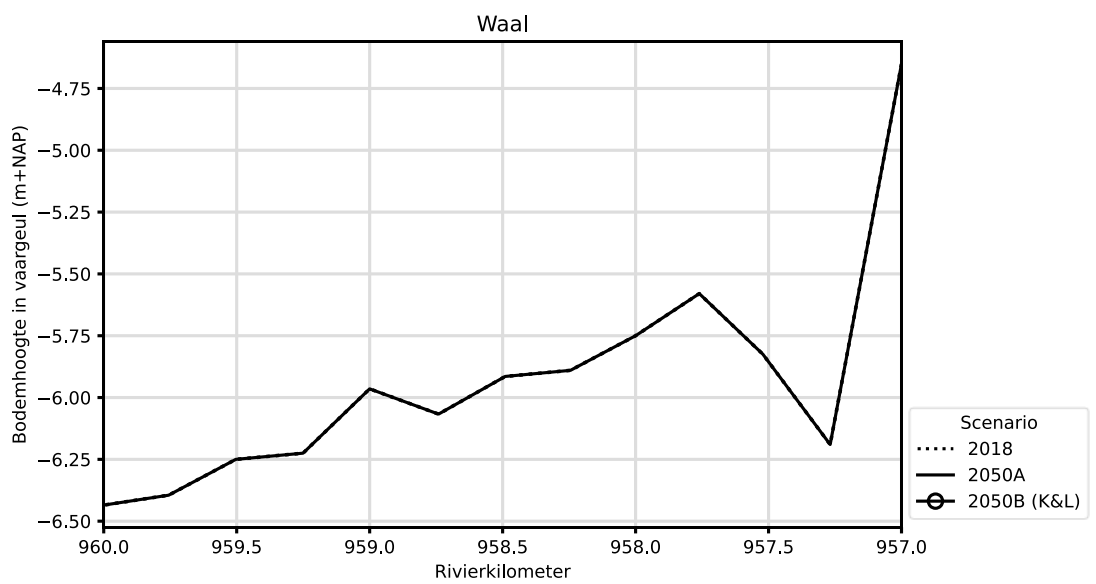
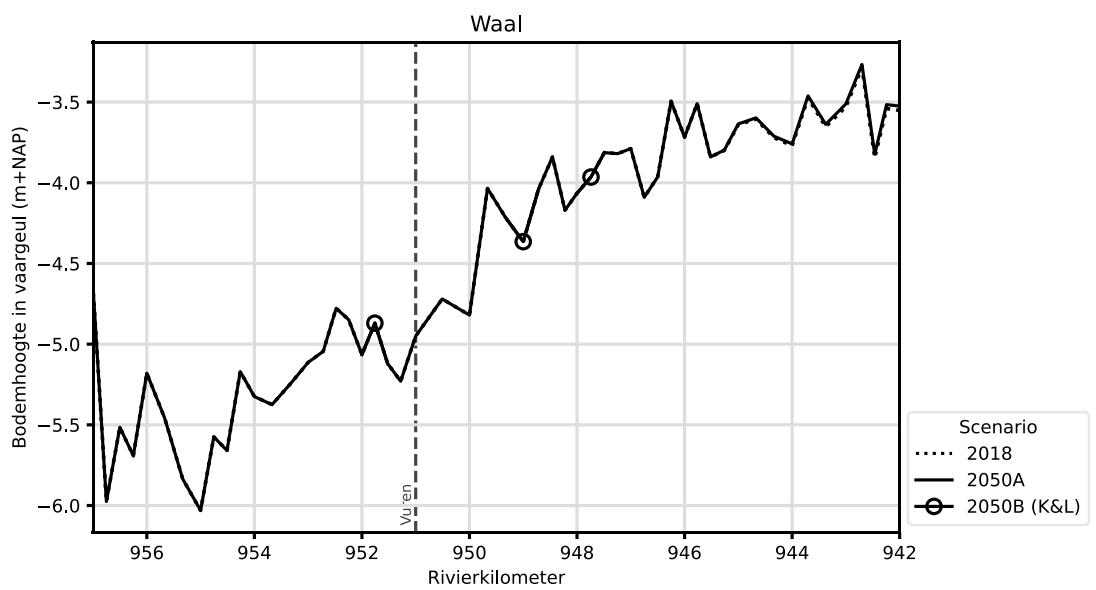
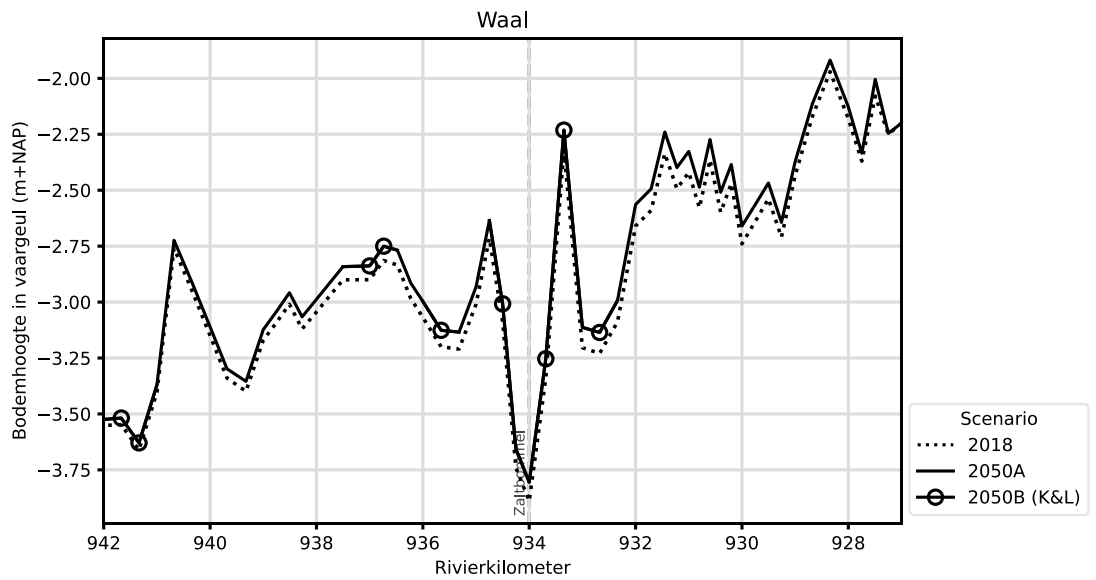
C Langdoorsneden kabels en leidingen

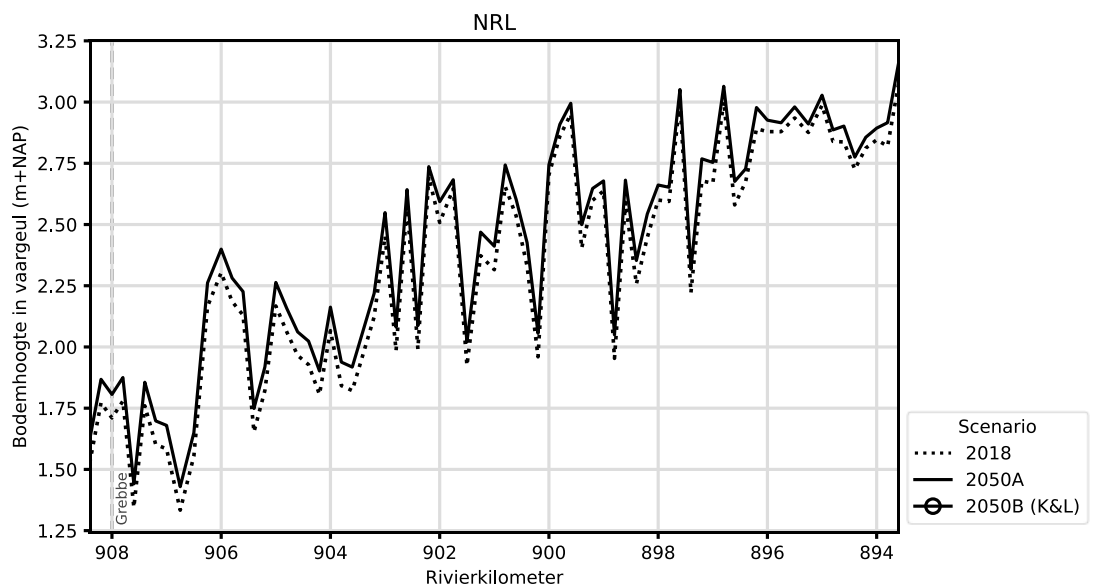
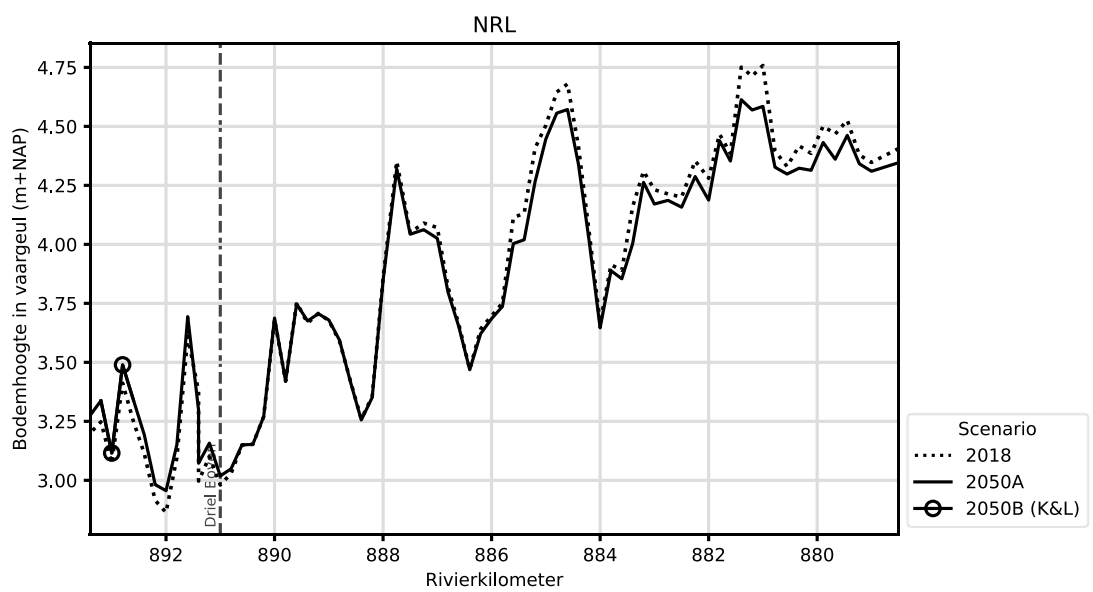
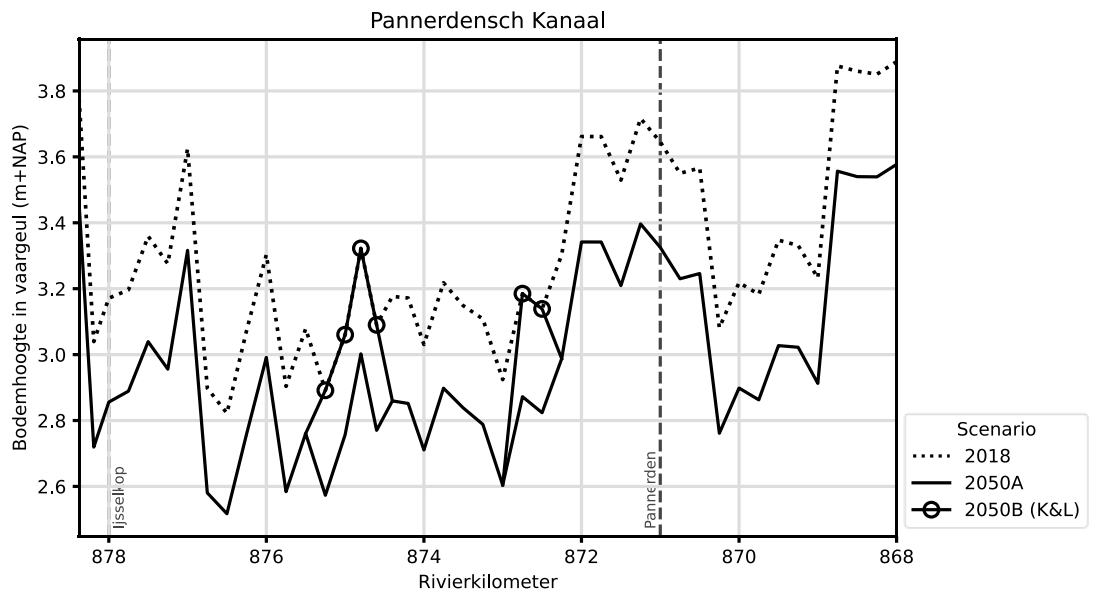
C.1 Bodemhoogte

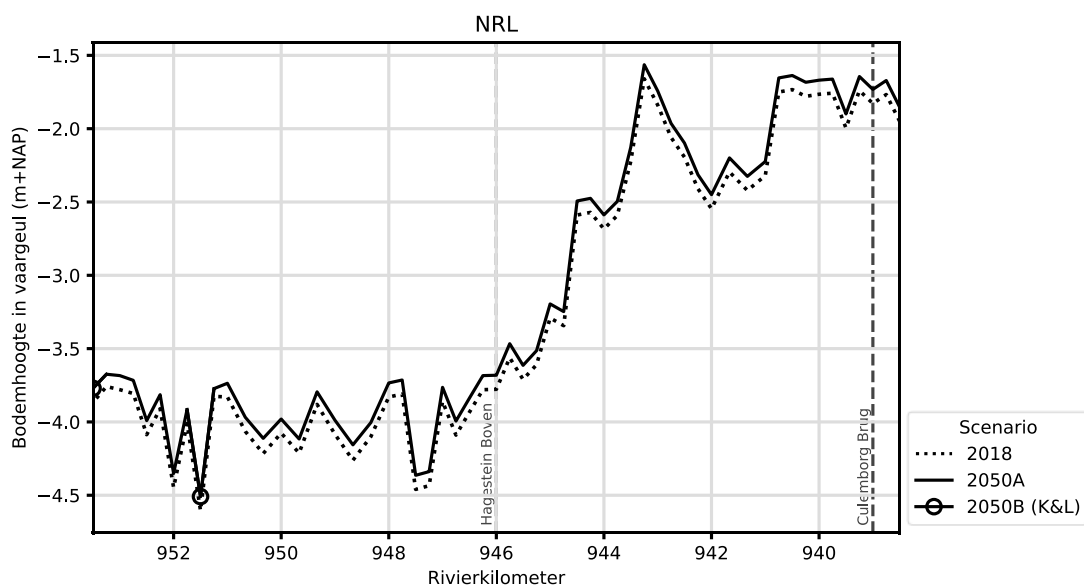
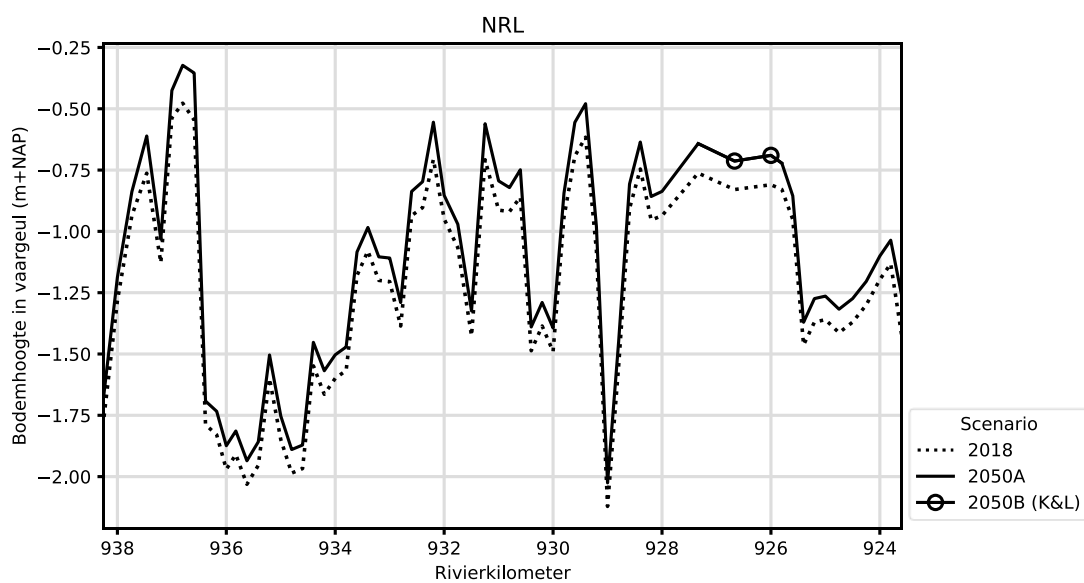
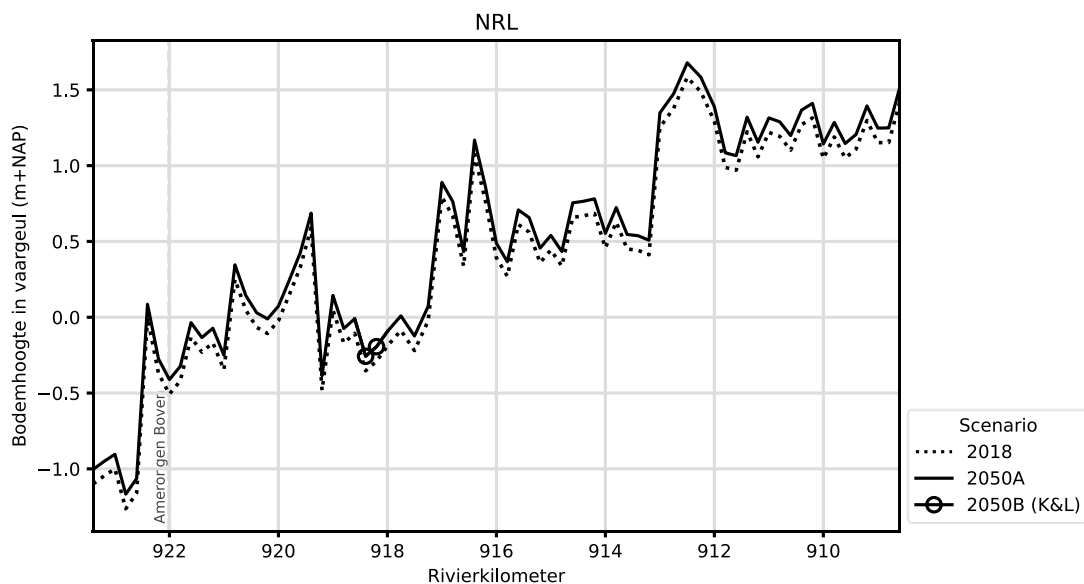
In deze bijlage zijn langdoorsneden opgenomen van de bodemhoogte van de Rijntakken. De bodemhoogte '2018' is de 95% hoogste waarde per gridcel van 300 m (zie De Jong & Van der Mark, 2020). De bodemhoogte '2050' is verkregen door het optellen of aftrekken van de bodemerosie in het bodemhoogtescenario 2050 (Sloff, 2019). De bodemhoogte bij kabels en leidingen (K&L) in 2050 is een aanname: bij erosie wordt uitgegaan dat de bodem blijft liggen op de situatie van 2018, bij aanzanding wordt uitgegaan van de situatie van 2050.

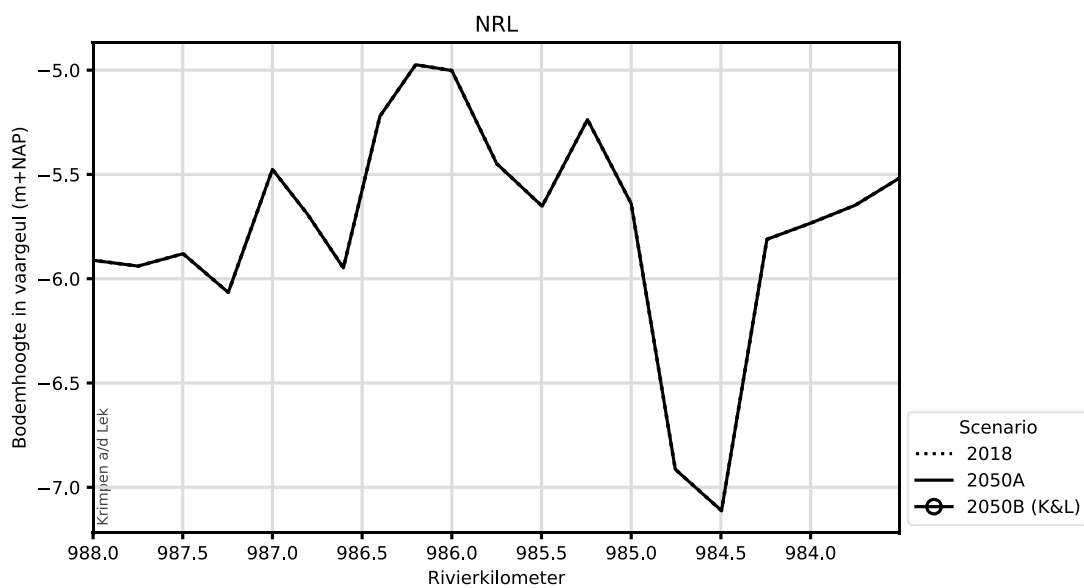
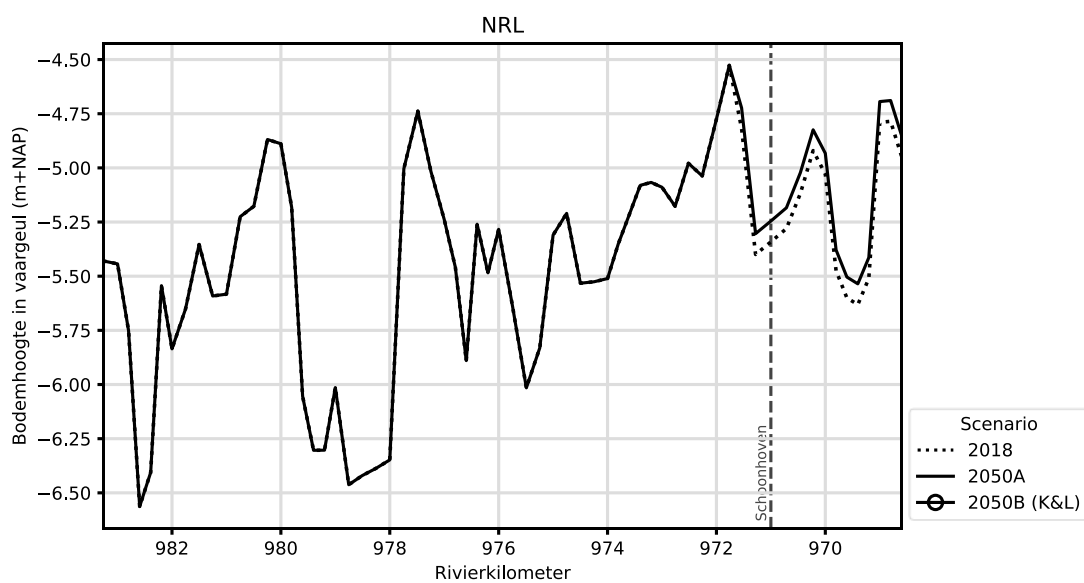
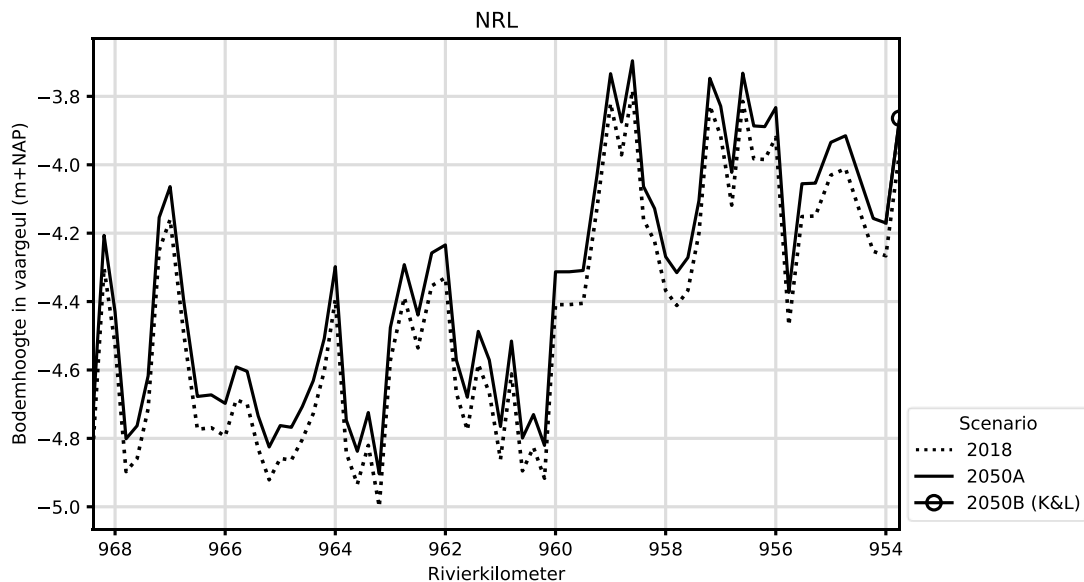


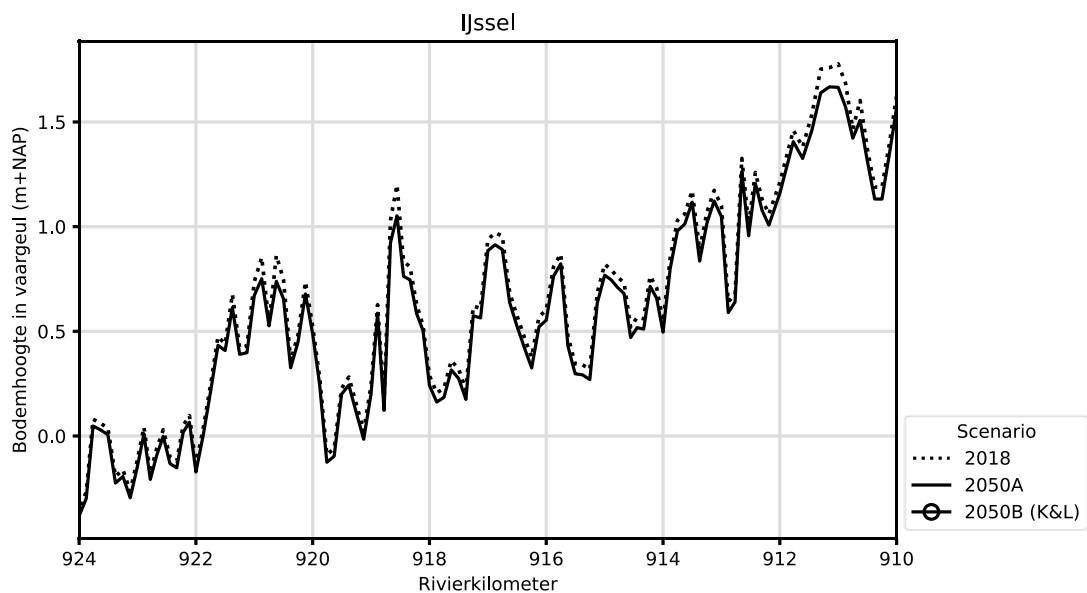
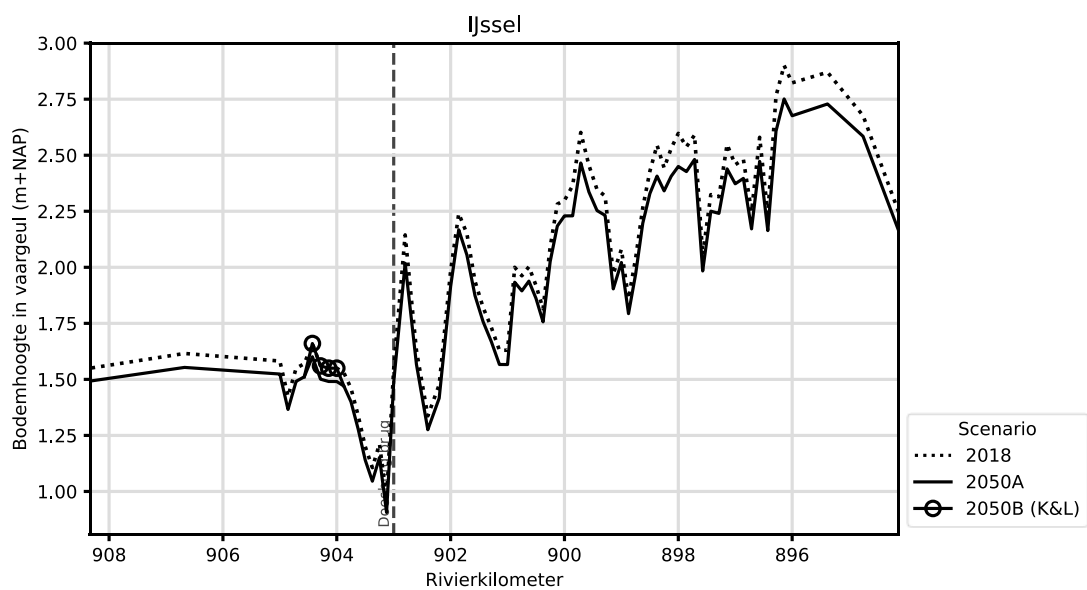
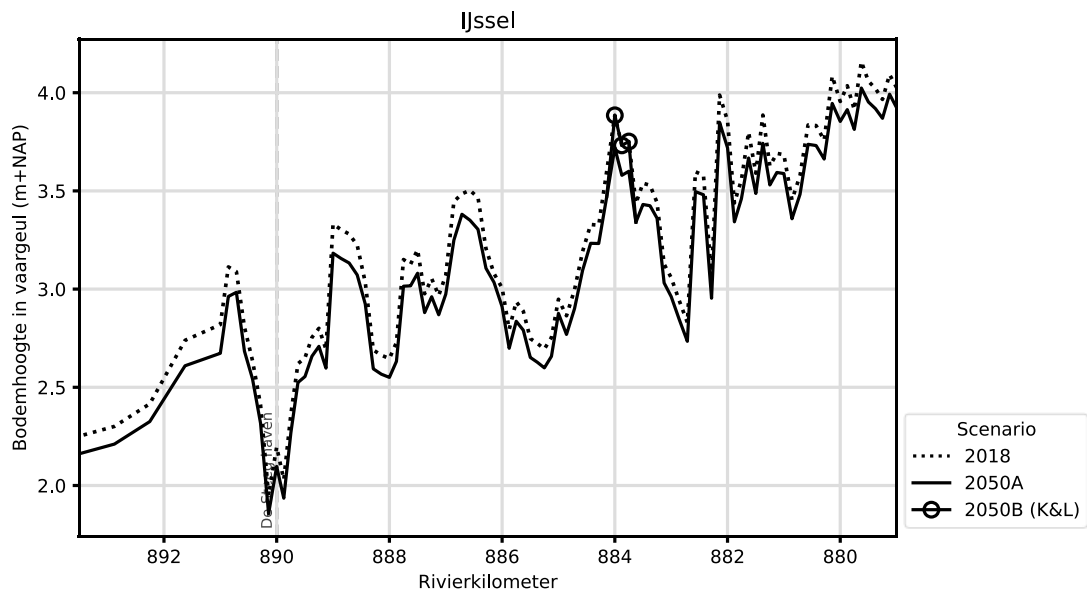


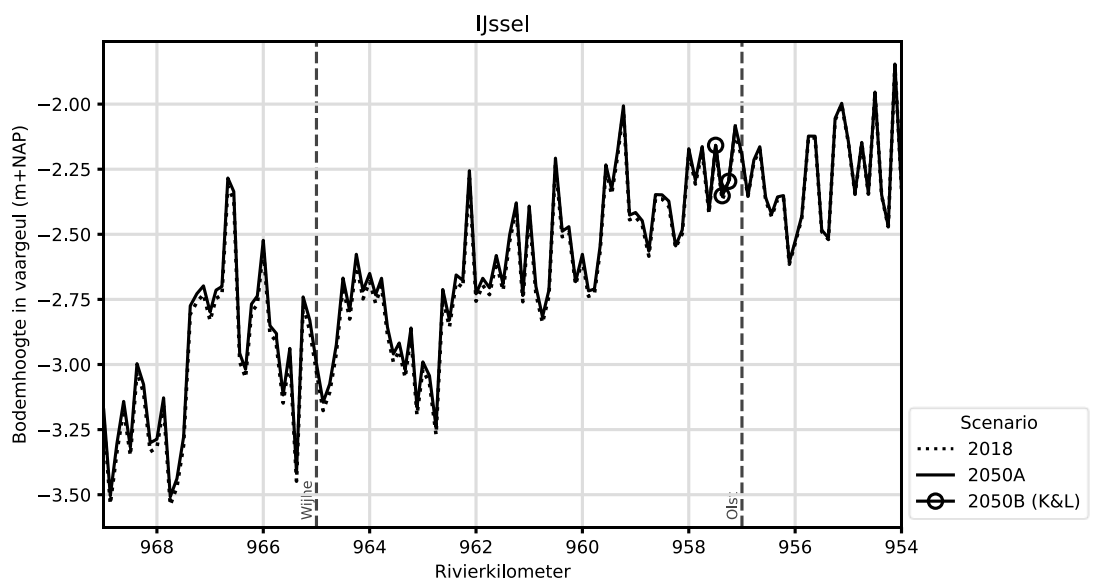
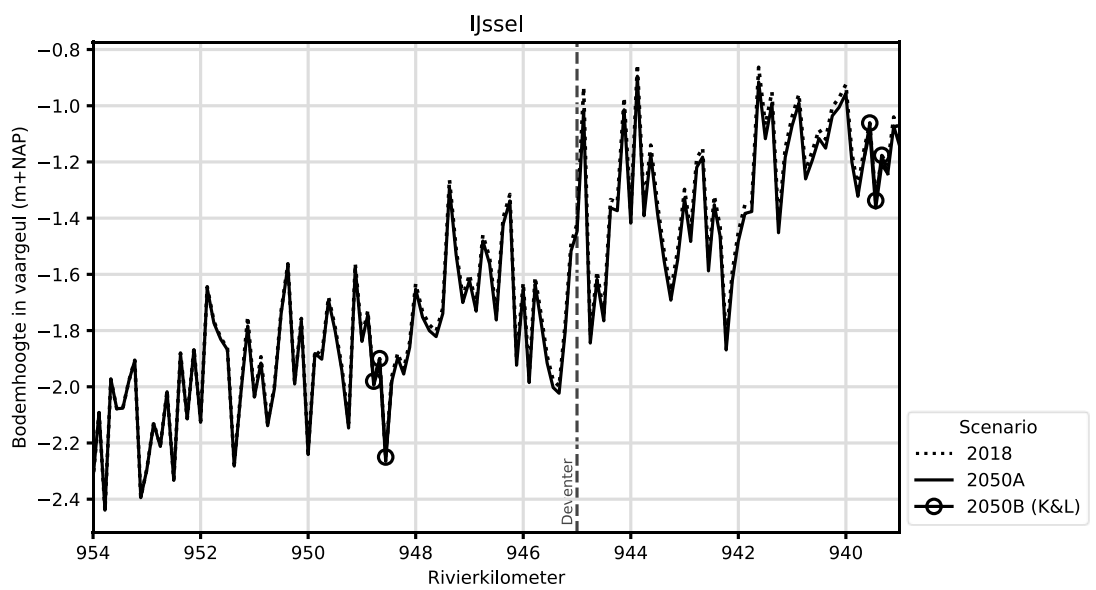
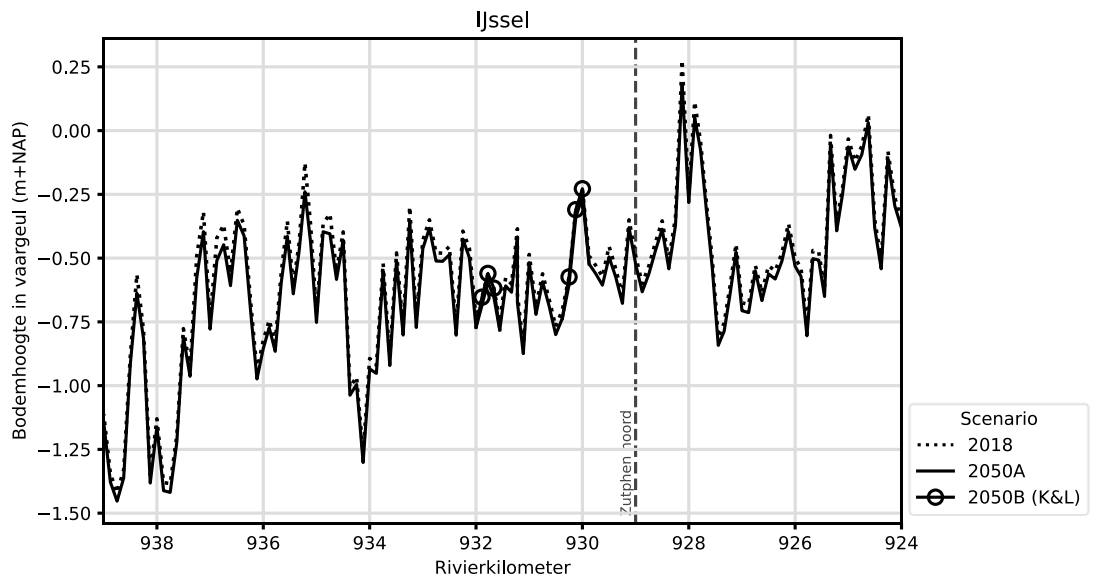


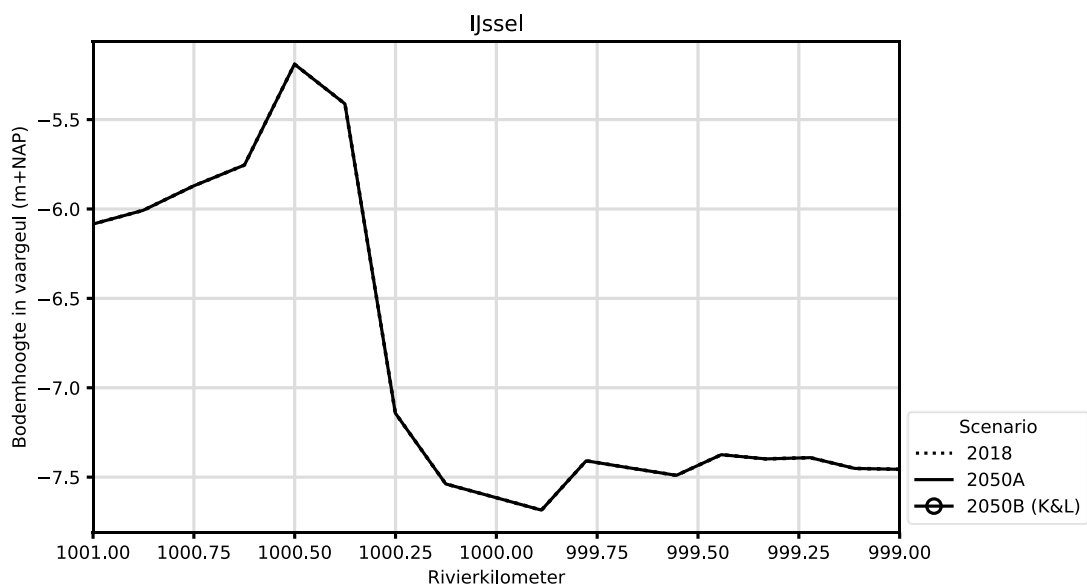
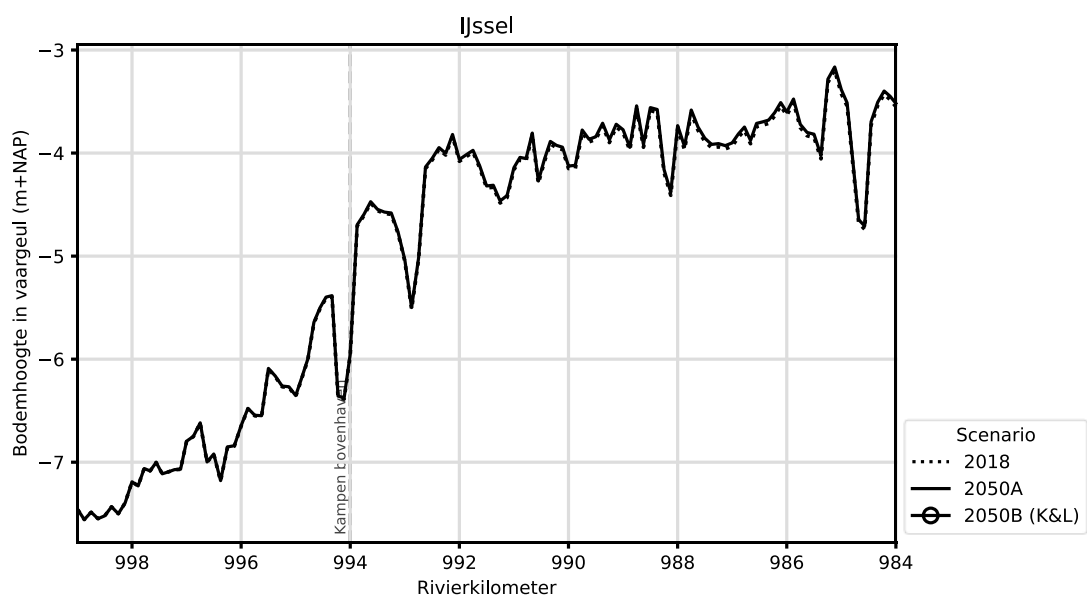
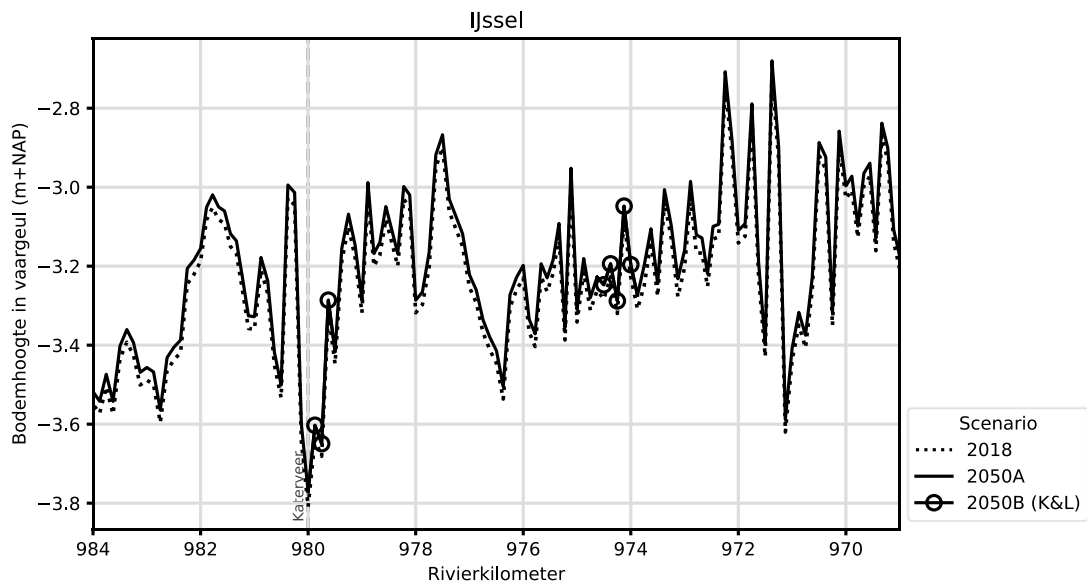






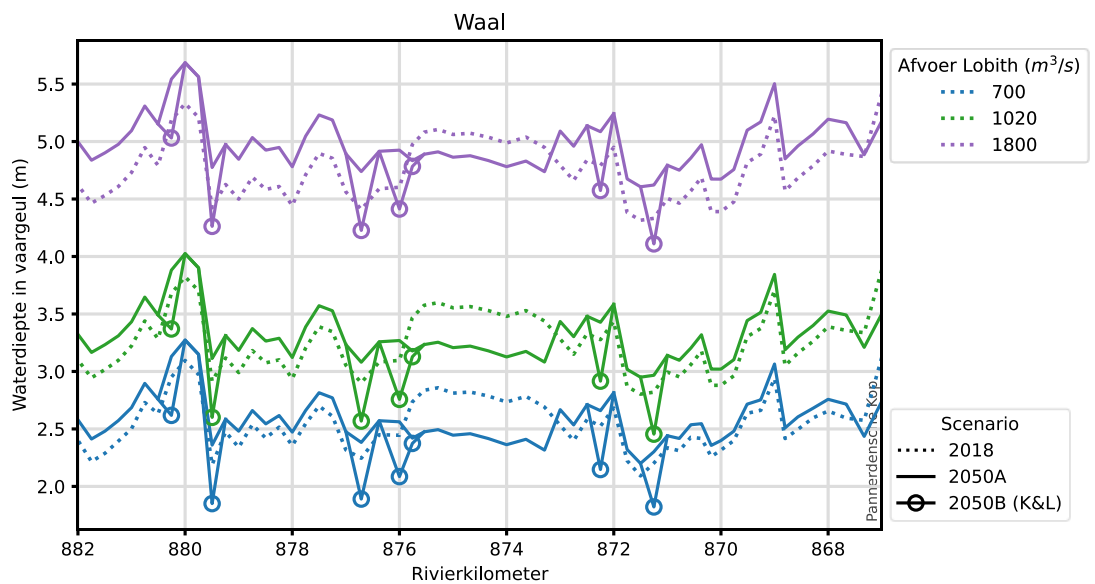
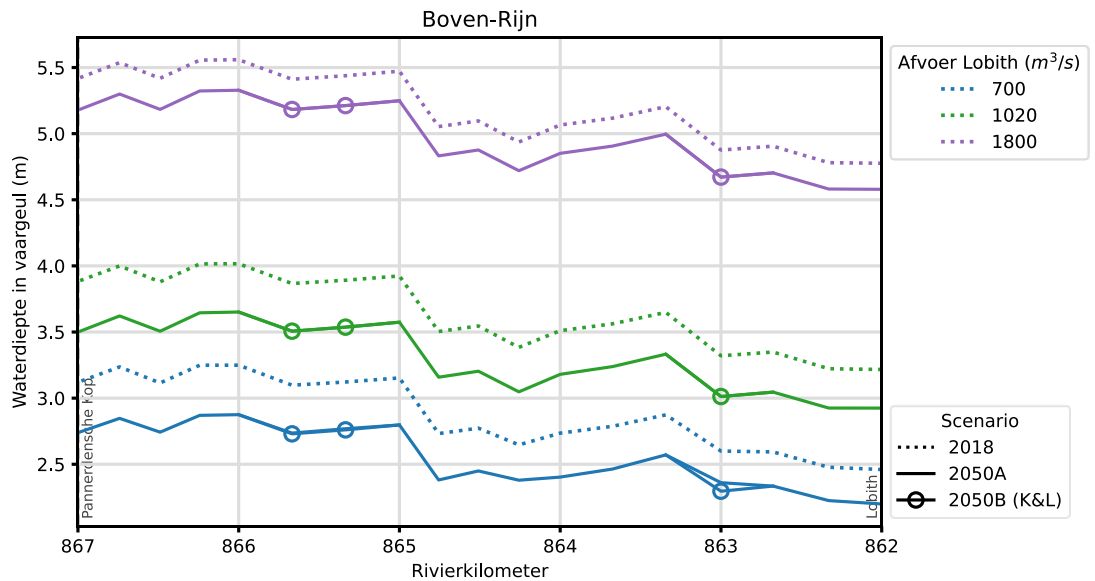


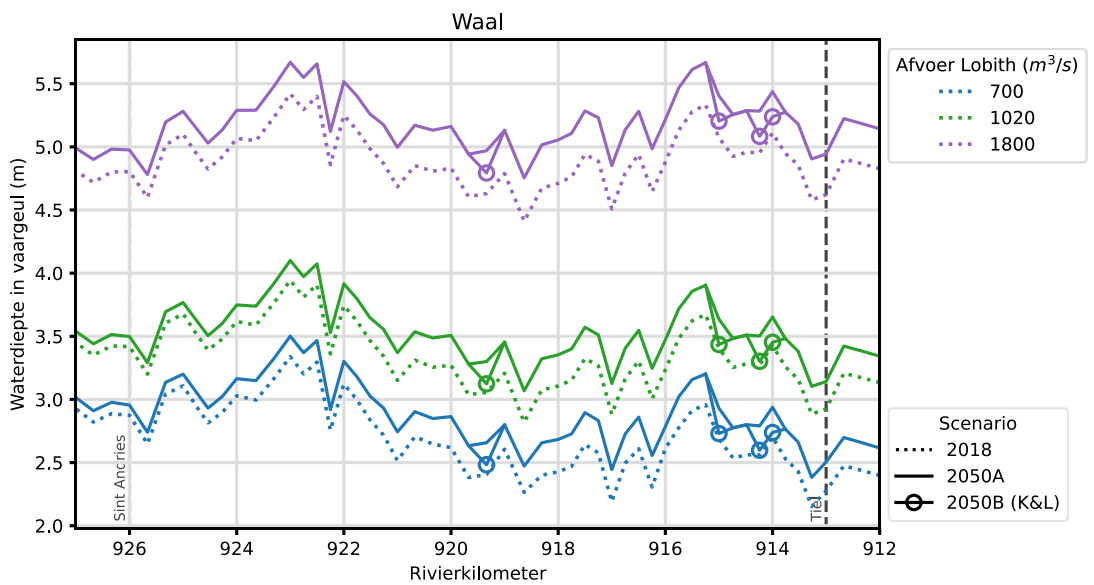
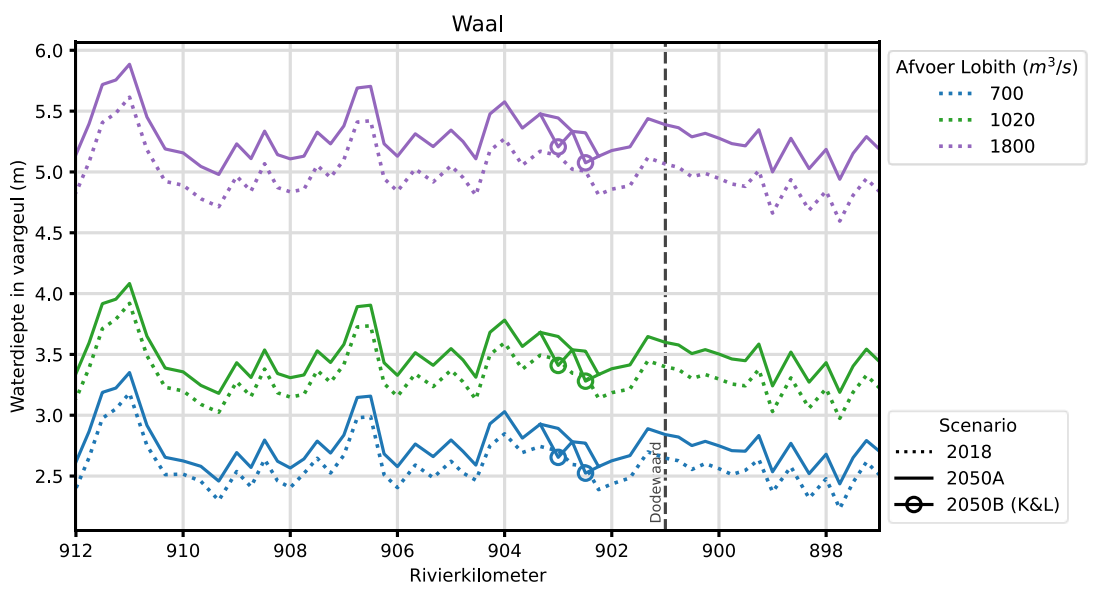
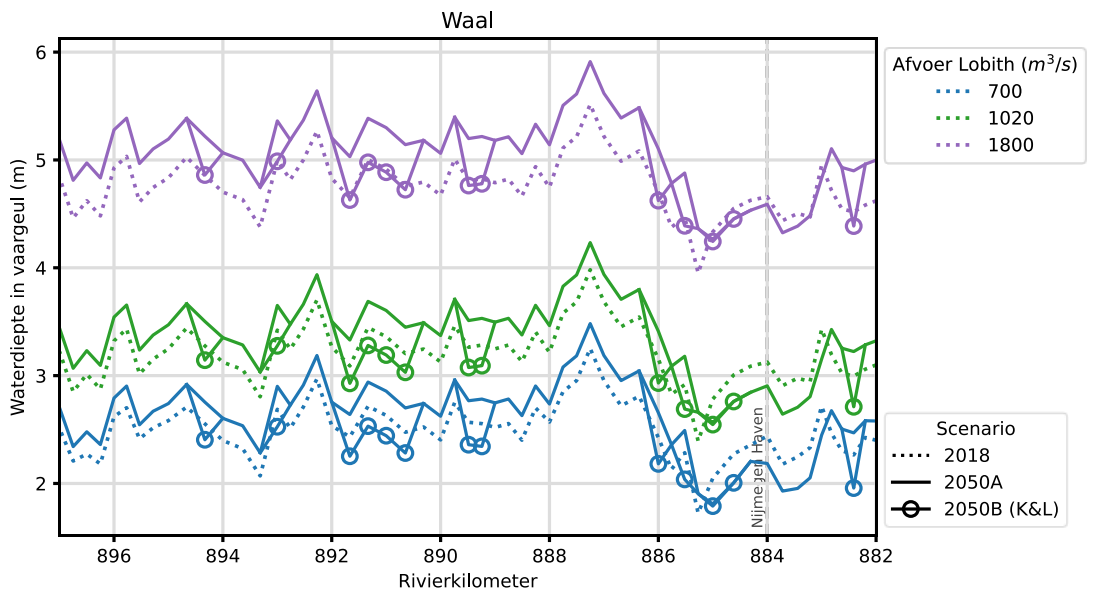


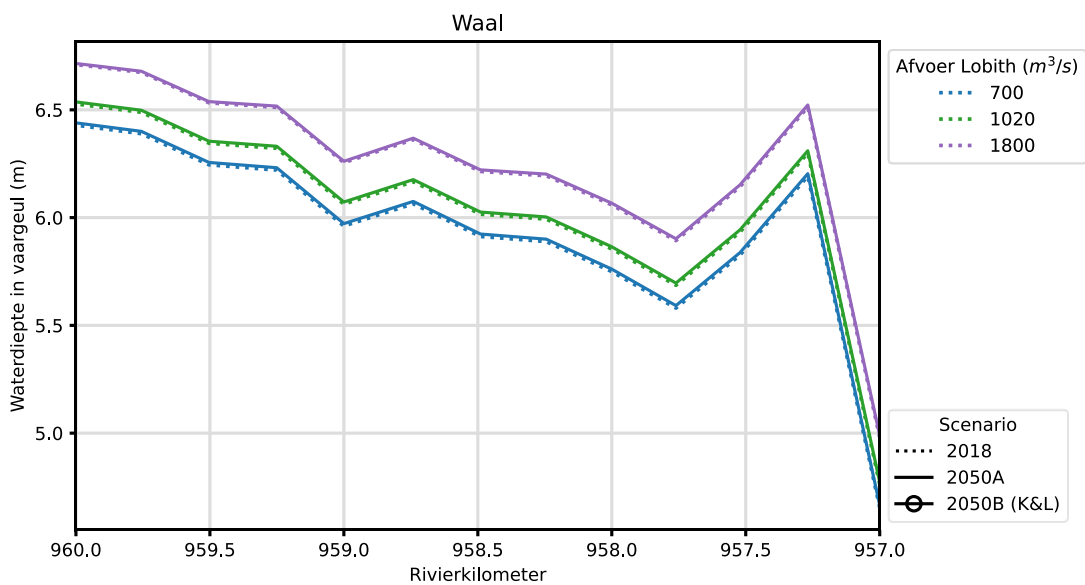
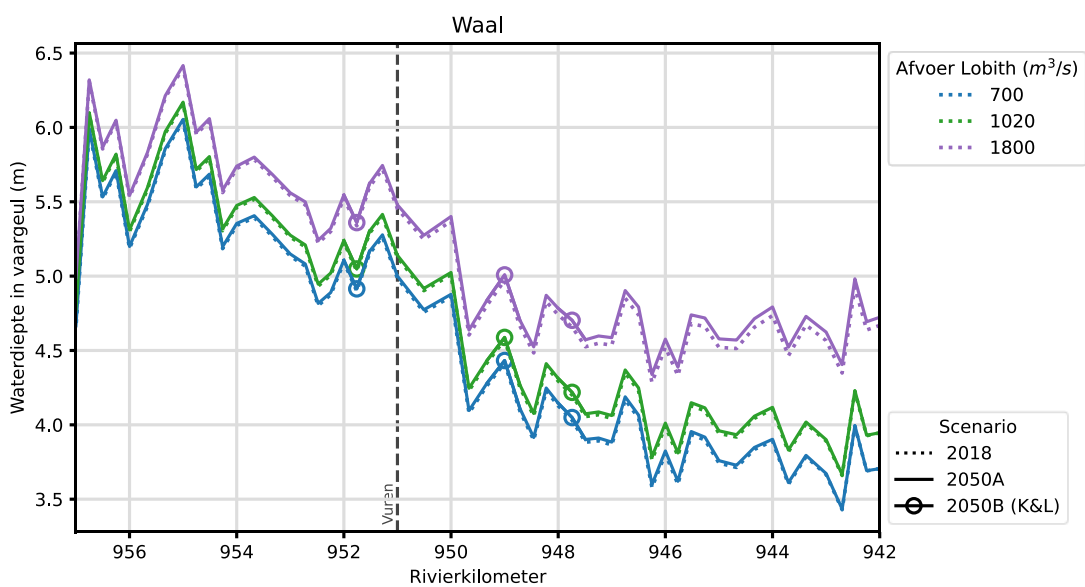
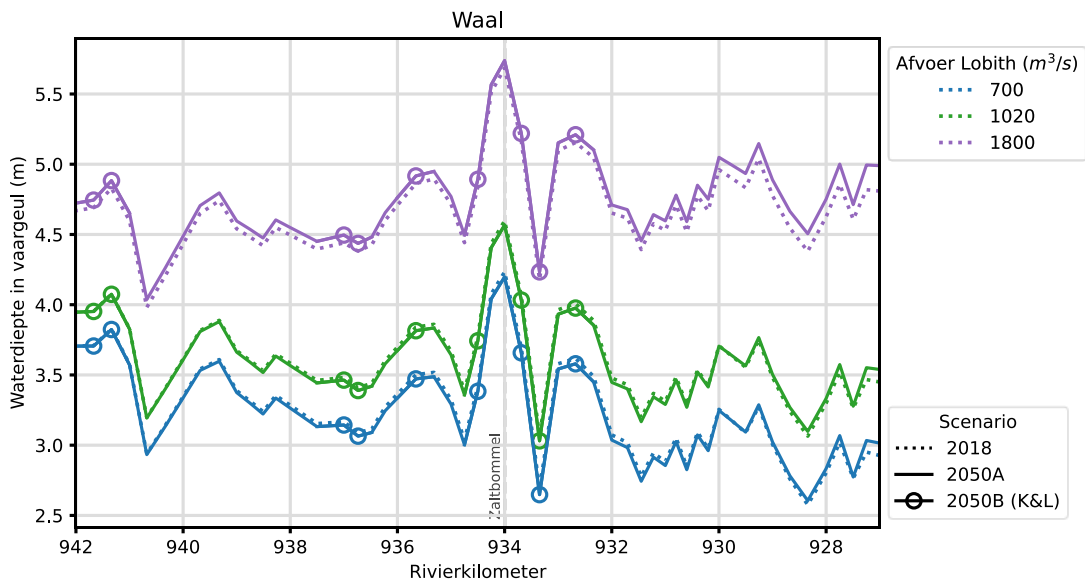


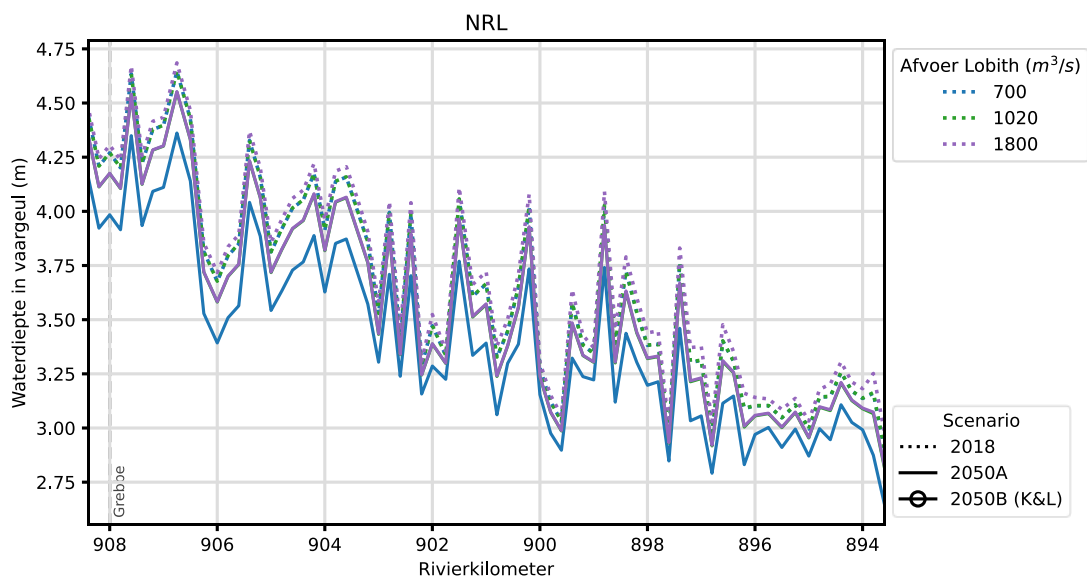
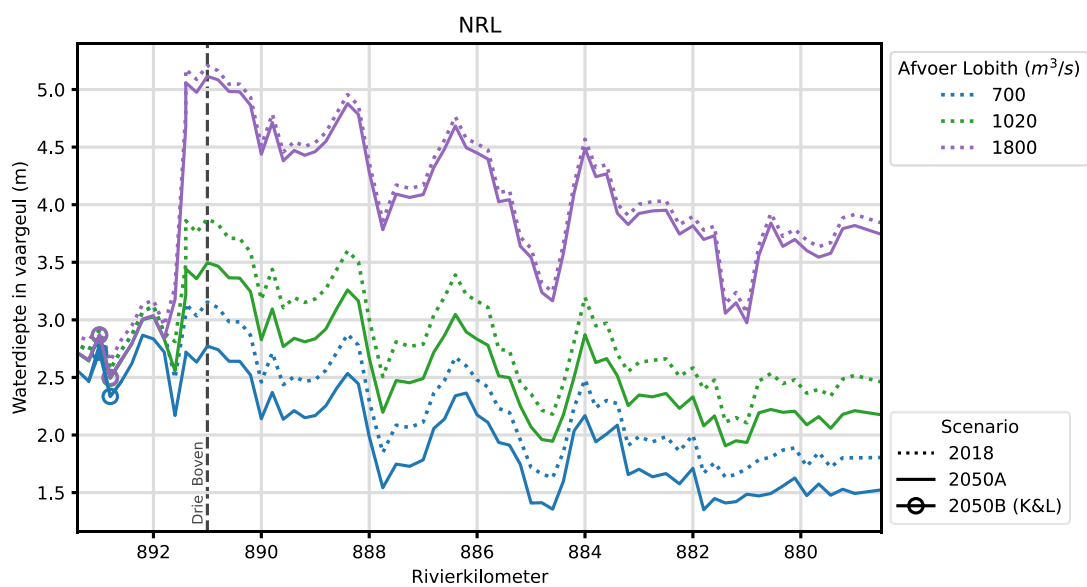
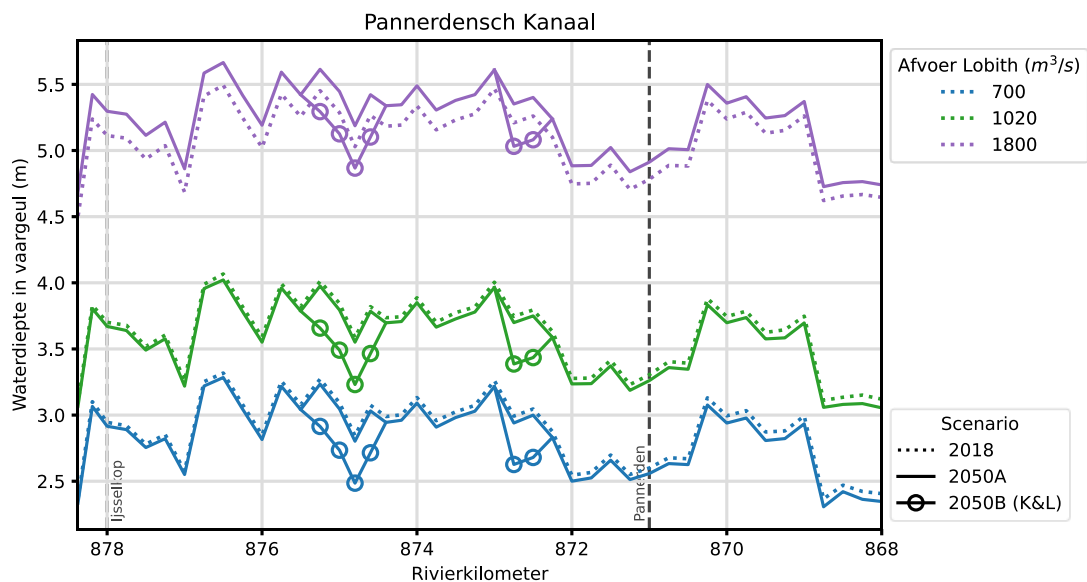
C.2 Waterdiepte bij 1.020 m³/s bij Lobith

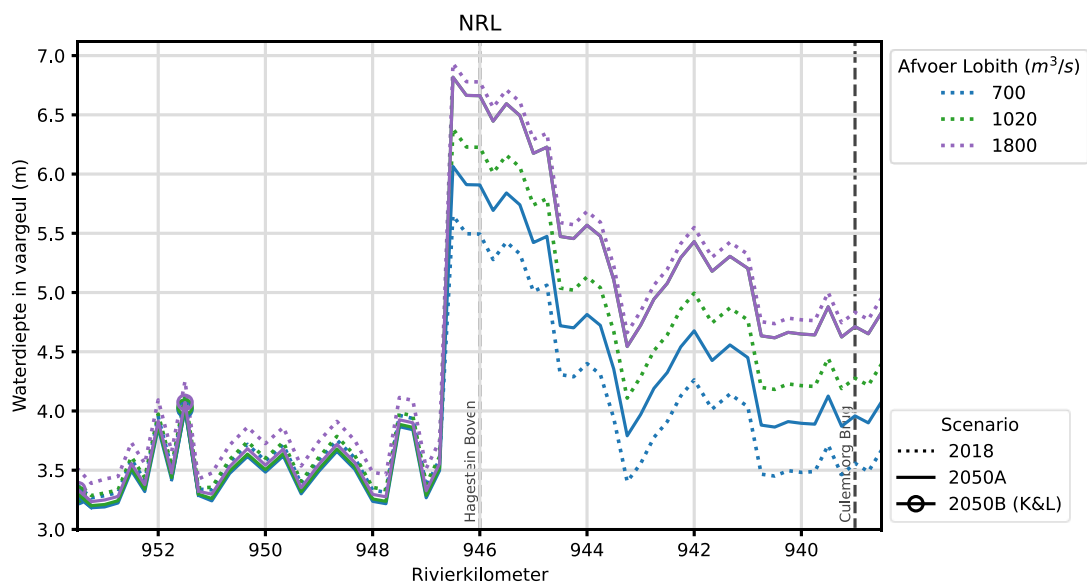
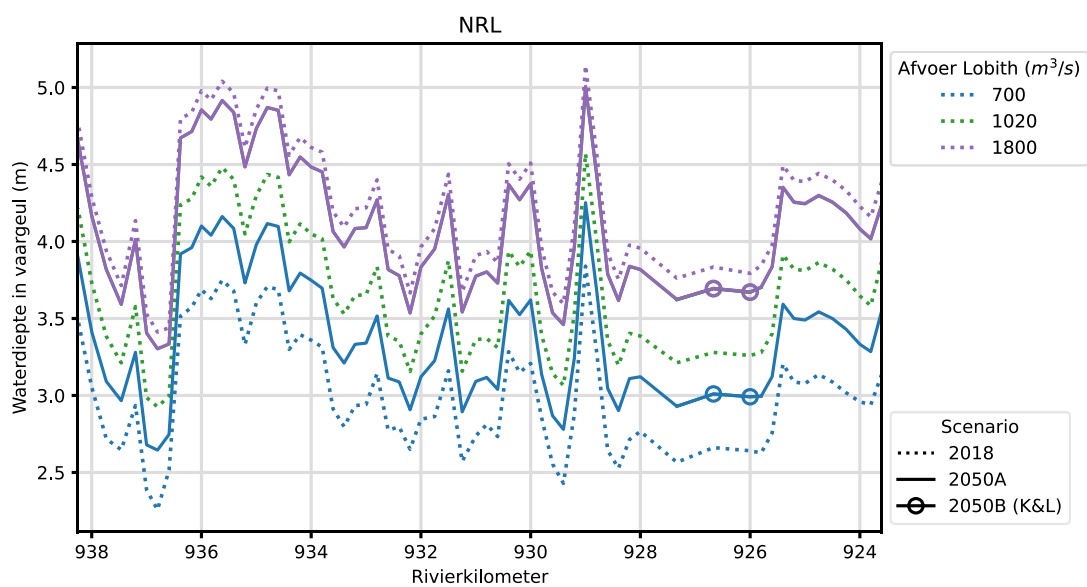
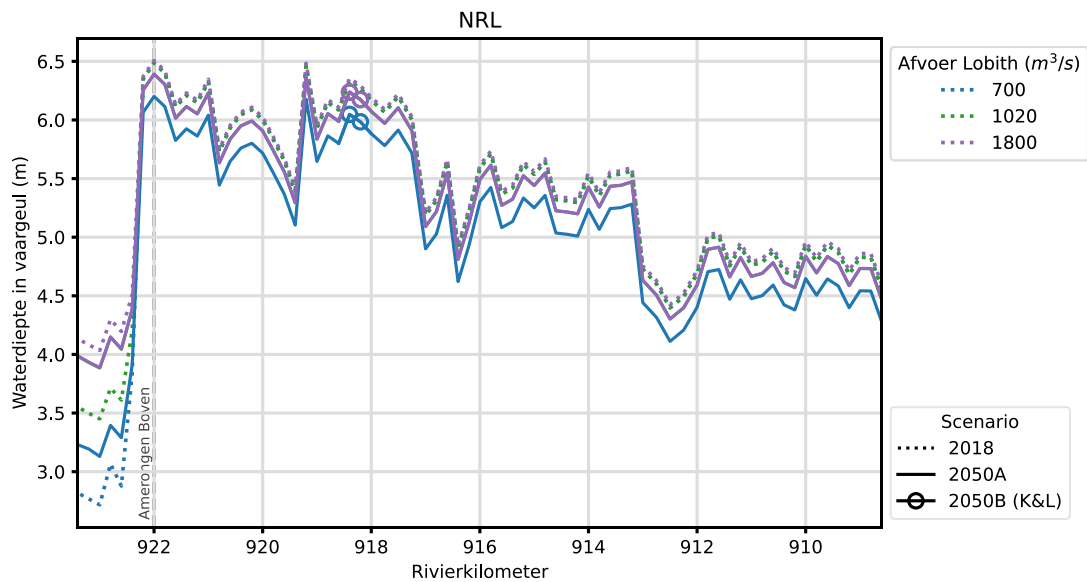
In deze bijlage zijn langsdoorsneden opgenomen van de waterdiepte in de vaargeul. Enkel de waterdiepte bij een afvoer bij Lobith van 1.020 m³/s is in de figuren opgenomen. Weergegeven zijn de waterdiepte met de huidige bodem (2018), de waterdiepte ten opzichte van de alluviale bodem in het scenario met bodemerosietrends tot 2050, en de waterdiepte ter hoogte van kabels en leidingen (K&L) als daar geen erosie plaats vindt.

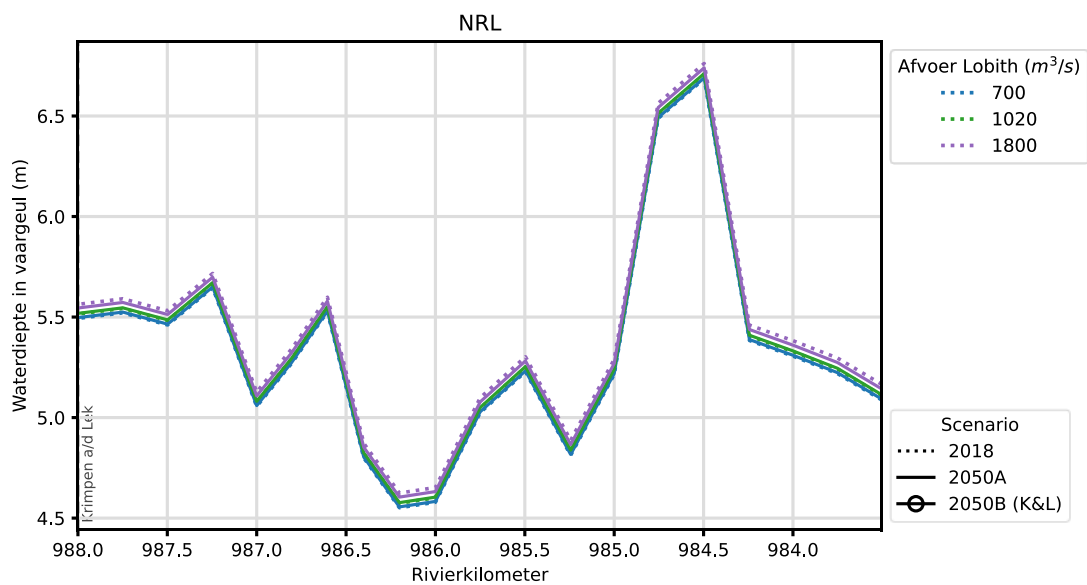
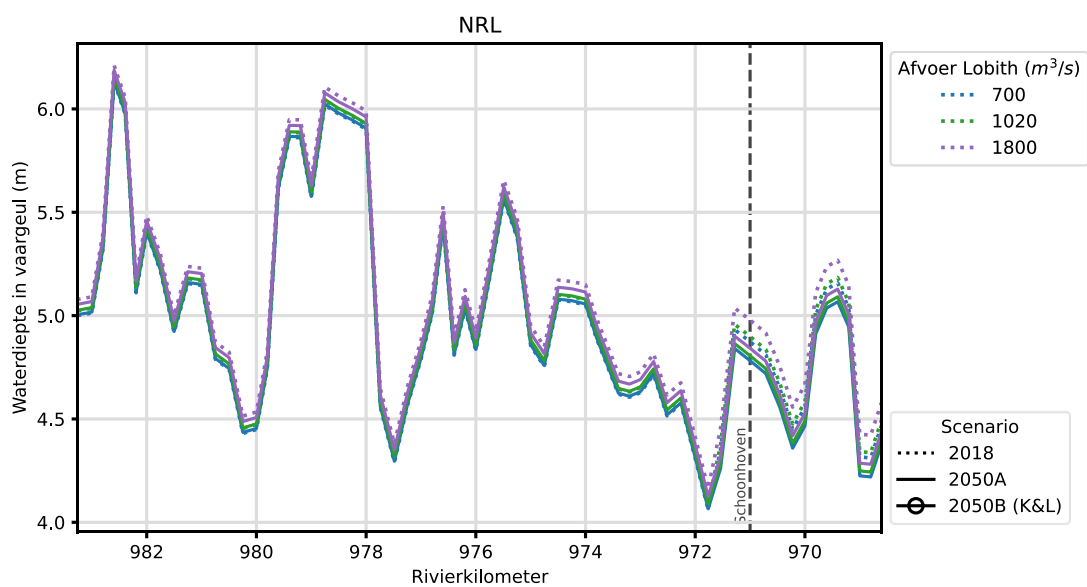
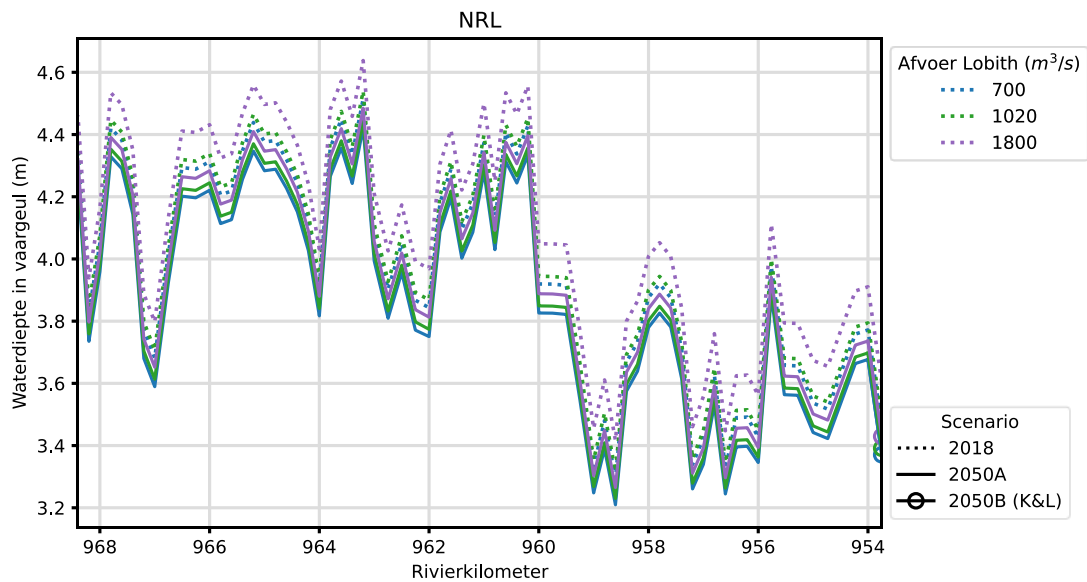


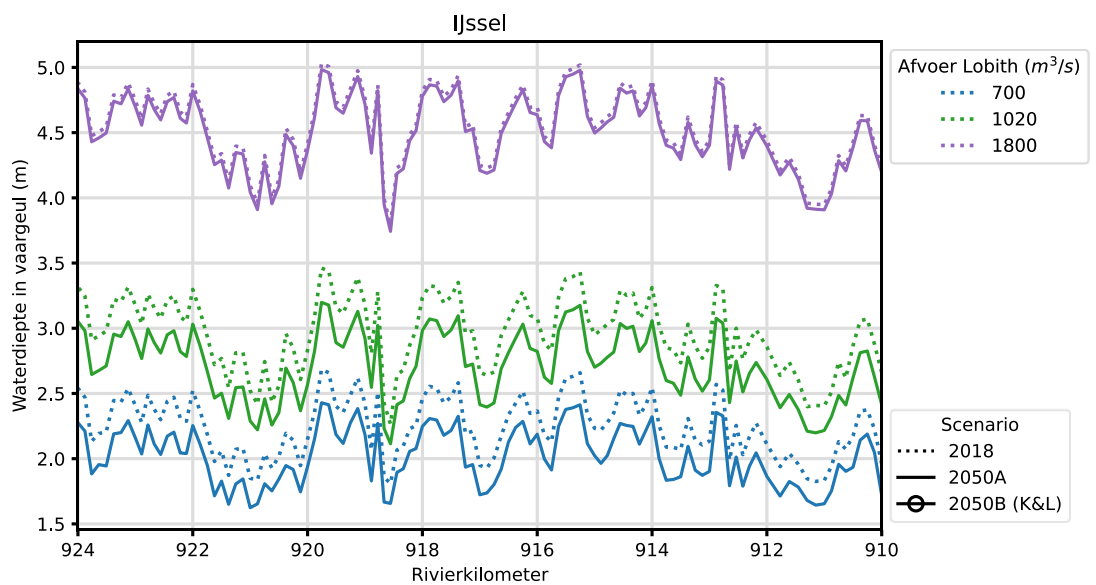
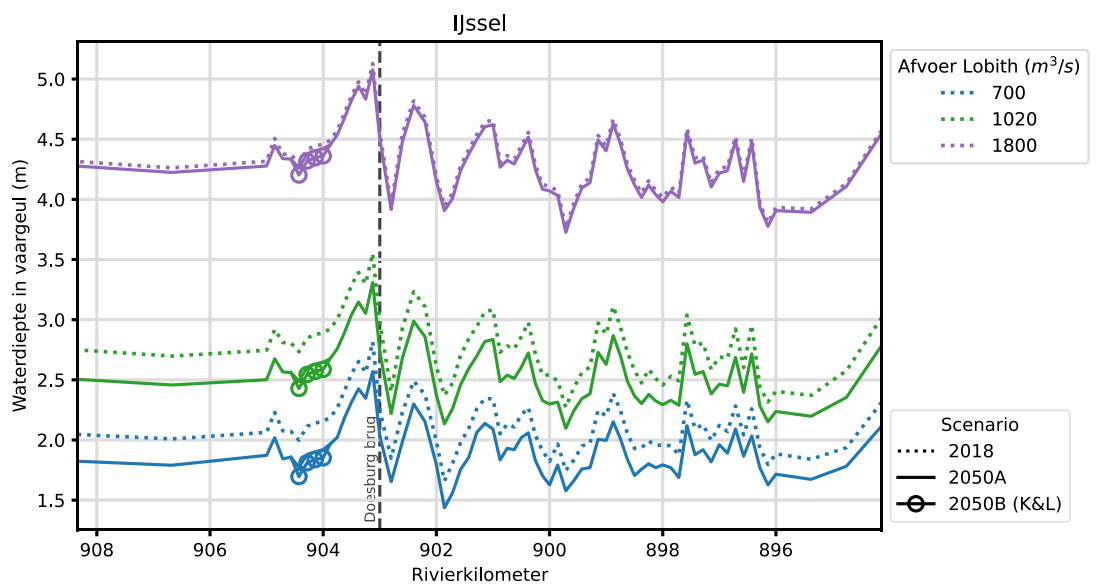
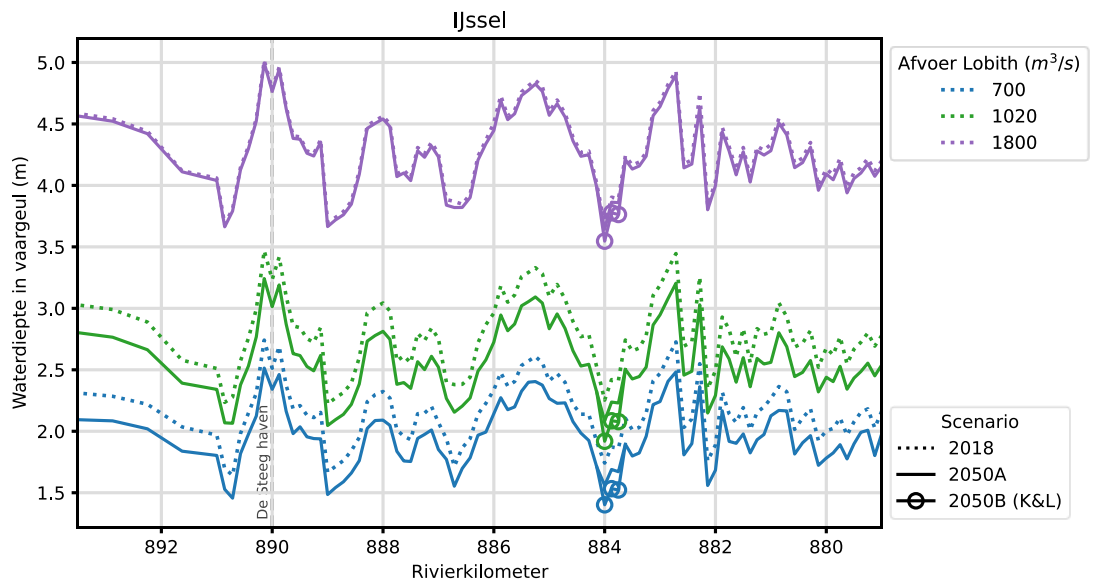


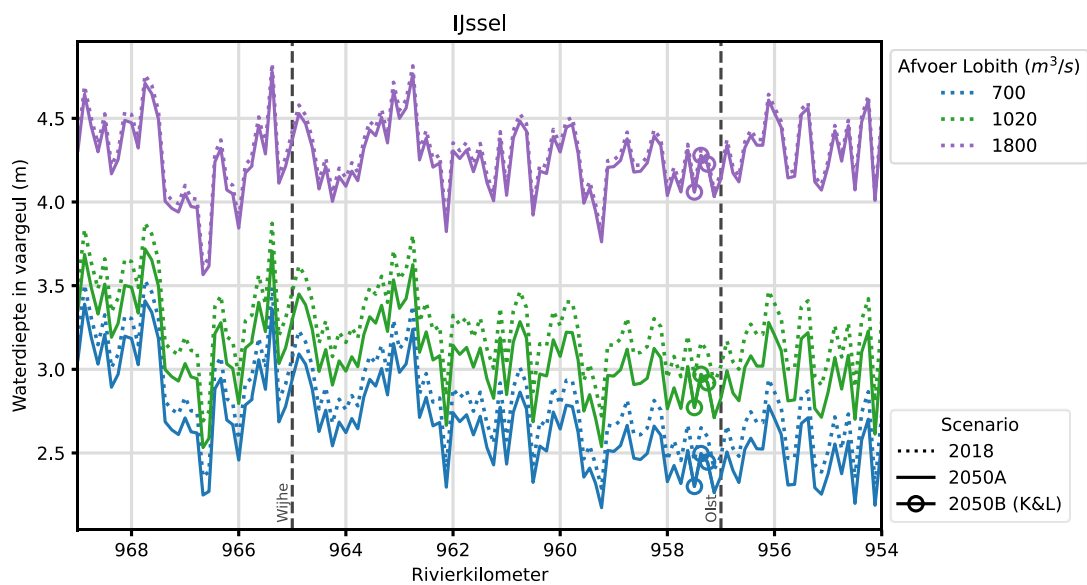
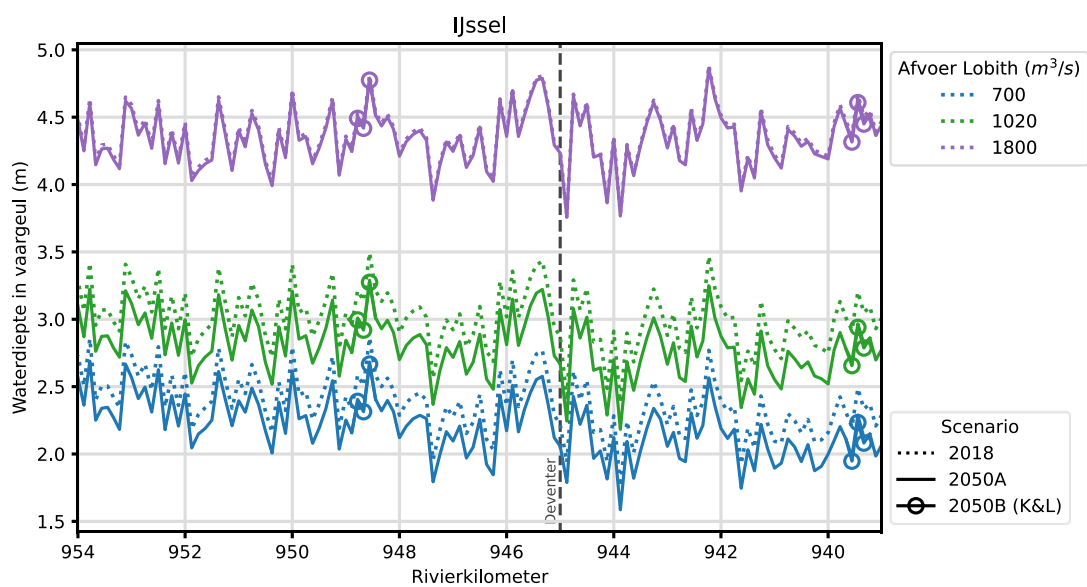
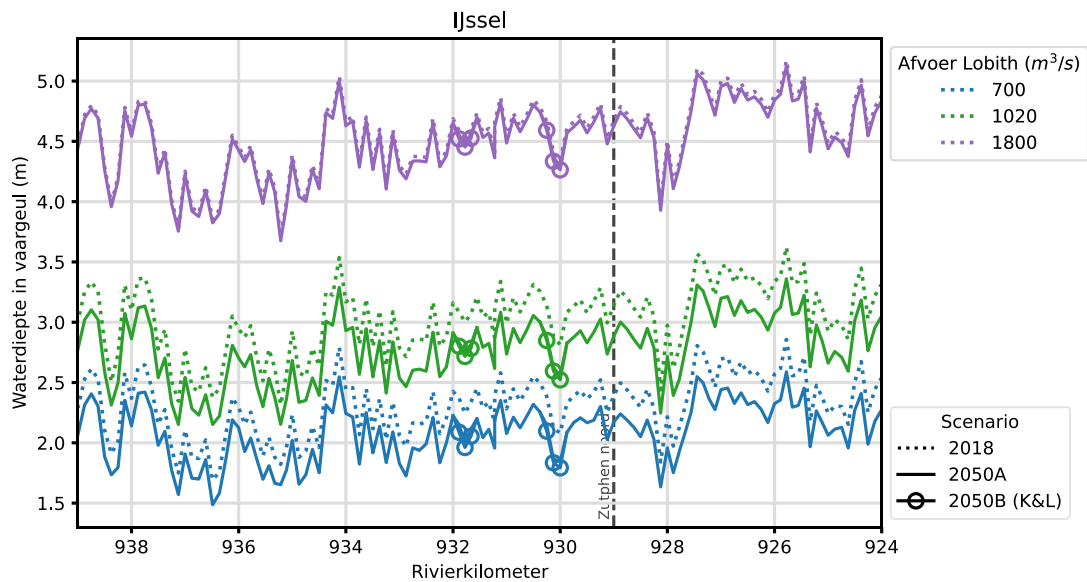


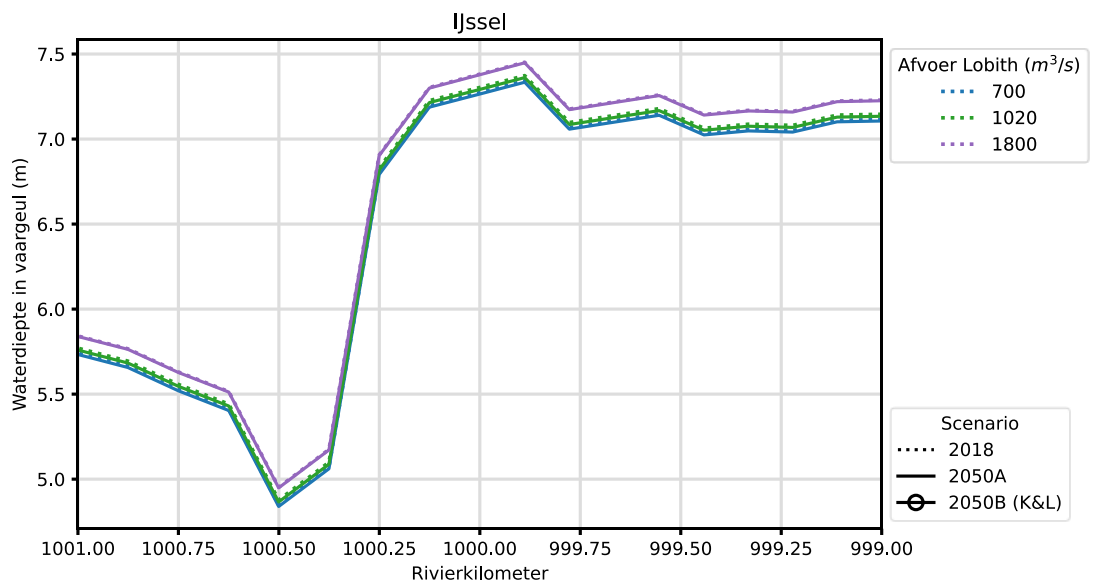
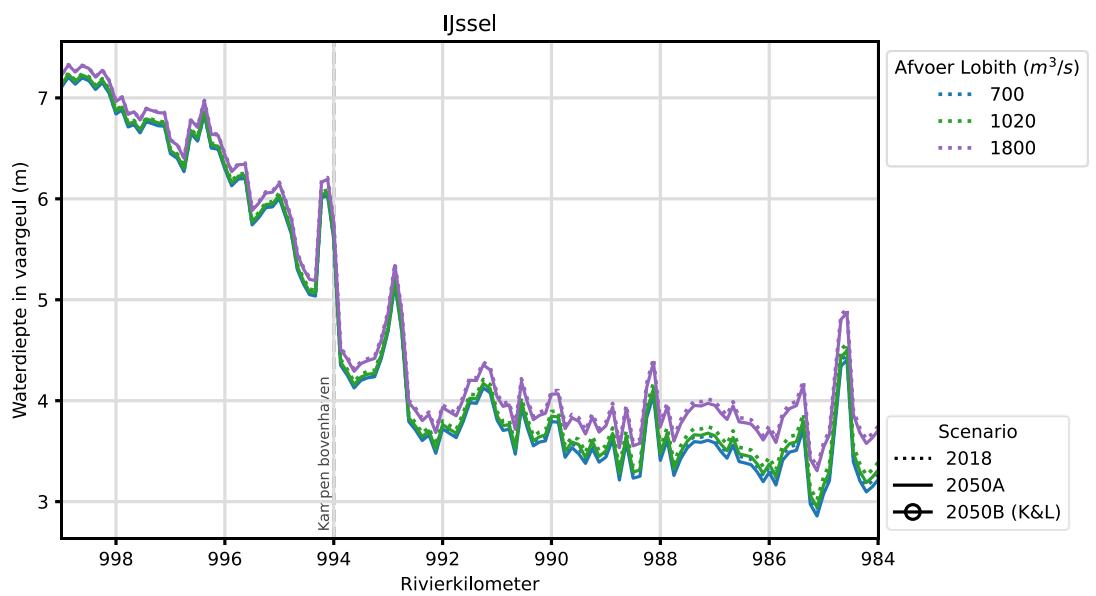
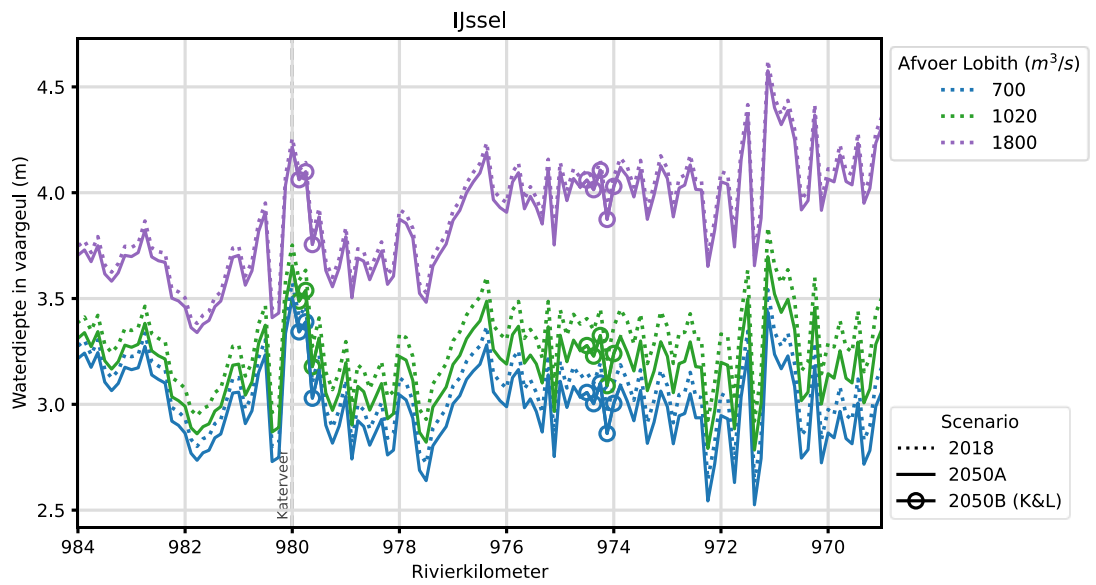












Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl