MEMO

Aan: [redacted], waterschap Limburg
Van: [redacted]
Datum: 12 februari 2021
Projectnummer: PR3701.22
Onderwerp: Uitgangspunten ontwerpbelastingen Lob van Gennep

1 Inleiding

Het MIRT project Lob van Gennep is inmiddels in de Verkenningsfase, waarin een keuze voor één van de drie alternatieven moet worden gemaakt:

1. Reguliere dijken.
   Bij Alternatief 1 worden alle dijken rond het gebied om de Lob van Gennep versterkt op basis van de veiligheidsnorm en worden geen specifieke voorzieningen aangelegd ten behoeve van de waterbergende werking.
2. Verbindende dijken met vaste drempels.
   Bij Alternatief 2 worden de dijken rondom de Lob over een aantal strekkingen overstroombaar ontworpen (instroomdrempels). Er is géén inlaatkunstwerk. De hoogte van de dijken die overstromen is gelijk aan de uiteindelijk voor Alternatief 1 bepaalde dijkhoogte. De overige dijken (die niet overstromen) worden 30 cm hoger.
3. Verbindende dijken met waterkerende instroomvoorziening .
   Bij dit alternatief worden de dijken versterkt en wordt een constructie gebouwd die functioneert als waterkering en bij zeer extreme hoogwatersituaties geopend zal worden om water het gebied in te laten.

Om deze keuze te kunnen maken, zijn onder meer de benodigde dimensies (geometrie) van de dijken rondom de Lob van Gennep bij de drie alternatieven nodig. Om deze dimensies te kunnen bepalen zijn hydraulische ontwerpbelastingen nodig. Het resultaat van dit project is dan ook een set ontwerpbelastingen voor de verschillende alternatieven in de m.e.r.-procedure, en de daarmee bepaalde dijkhoogten.

Voorliggende notitie bevat de uitgangspunten voor het afleiden van de ontwerpbelastingen en dijkhoogten en een navolgbare toelichting op de productie.

2 Uitgangspunten en werkwijze

2.1 Algemeen

2.1.1 Normen traject 54-1

- Signaleringswaarde 1:1000^{e}
- Ondergrens 1:300^{e}

2.1.2 Zichtjaren

Binnen dit project worden drie zichtjaren beschouwd: 2023, 2075 en 2125. De fysica (geometrie rivier) wordt voor deze drie zichtjaren gelijk verondersteld. Er is dus geen verschil in (bodem)schematisatie, een afvoergolf loopt op dezelfde wijze door de rivier. We veronderstellen geen invloed van zeespiegelstijging op de benedenstroomse Qh-relaties.

2.1.3 Klimaatscenario's

Binnen dit project wordt gerekend met KNMI 2006 klimaatscenario W+. Deze keuze is eerder door waterschap Limburg gemaakt.

2.1.4 Rivierkilometers

Aleen de rivierkilometers nabij de Lob van Gennep worden beschouwd, van km 154 tot en met km 166.

2.1.5 Software

De volgende software wordt in dit project gebruikt:

- ArcGis 10.4.1;
- Baseline 5.3.3 (official release);
- SIMONA 2019 (official release);
- Hydra-NL 2.7.1

2.2 Baseline schematisering

Vertrekpunt is het bestaande HOB2020-model ([redacted], 2020), gemaakt in opdracht van waterschap Aa en Maas. Voor de berekening van waterstanden wordt WAQUA gebruikt.

In 2017 heeft HKV voor Waterschap Aa en Maas in het kader van project "Hydraulische Ontwerpbelasting Maas" het Baseline- model HOB Fase 1 gebouwd. Voor de MIRT-verkenning Cuijk-Ravenstein en de planuitwerking Meanderende Maas is vervolgens, wederom in opdracht van Waterschap Aa en Maas, in de eerste helft van 2020 dit Fase 1-model geactualiseerd tot wat het HOB2020 model is gaan heten. Waterschap Limburg was betrokken bij het opstellen van de uitgangspunten voor deze modelontwikkeling, omdat ook het Limburgse Maasdal, met daarin de diverse rivierverruimende maatregelen (waaronder twee versies van de maatregel Lob van Gennep) zijn verwerkt.

2.2.1 MIRT maatregelen Maasdal

In het HOB2020-model zijn de MIRT maatregelen in de Limburgse Maasvallei, waarvoor een besluit is of naar alle waarschijnlijkheid zal worden genomen, verwerkt. Zie hiervoor [[redacted], 2020].
Het inmixen van andere of meer actuele schematisaties van (MIRT) projecten en/of KRW maatregelen in de Limburgse Maasvallei is binnen deze opdracht niet voorzien.

2.2.2 Overstroombare dijken Maasdal

Uitgangspunt voor de dijkhoogtebepaling van alle dijken in het Limburgse Maasdal is dat de overige dijken in het Maasdal NIET overstromen en als een 'glazen wand' in het WAQUA-model zitten. De Limburgse normtrajecten stromen dus niet over, op de Lob van Gennep na. Dit heeft vanzelfsprekend een waterstandsverhogend effect. Wanneer gerekend wordt voor de dijken in Noord-Brabant of Gelderland wordt WEL met overstromen gerekend (systeemwerking).

Aangezien het in dit project gaat om Limburgse dijken rondom de Lob van Gennep, worden alle dijken in het Maasdal tussen St. Pieter en de Lob van Gennep als NIET overstroombaar gemodelleerd in Baseline (glazen wand). De eerdere berekeningen voor de Lob van Gennep (project PR3701.20) en die voor het Noord-Brabantse HOB2020-project zijn WEL met overstroombare dijken in het Maasdal uitgevoerd.

2.2.3 Ligging dijken rondom de Lob van Gennep

De ligging van de dijken is weergegeven in Figuur 1. Rondom de Niers zijn ten opzichte van de ligging in het HOB2020 modelaanpassingen doorgevoerd in de ligging van de dijken/drempels. In de MIRT verkenning zijn meerdere tracévarianten voor diverse dijkvakken in beeld, waarmee echter in dit project geen rekening wordt gehouden. De meest recente ligging van de dijken rondom de Lob van Gennep (conform Figuur 1) wordt 'ingemixt' in de Baseline-schematisering.

De glazen wand rondom de Lob van Genep betreft de referentie-schematisering, benodigd voor de bepaling van de hoogte van de dijken en drempels rondom de Lob van Gennep.

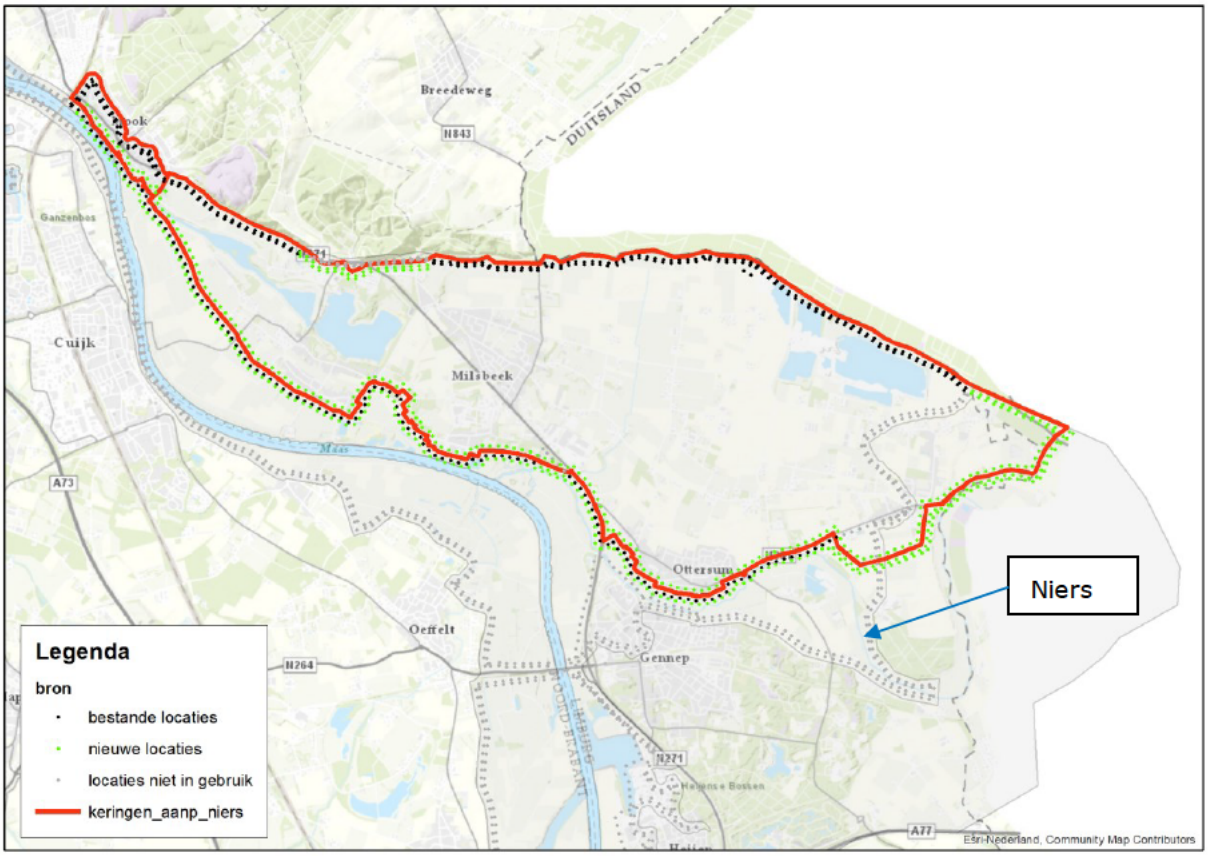
2.2.4 Baseline schematisering gelijk voor diverse zichtjaren

De Baseline schematisering van de rivier wijkt voor diverse zichtjaren en klimaatscenario's *in principe* af met name omdat het Lateraalkanaal West verschillende drempelhoogte kent voor verschillende zichtjaren. Daarnaast is de in de WAQUA-berekeningen gebruikte Q(h) benedenrand

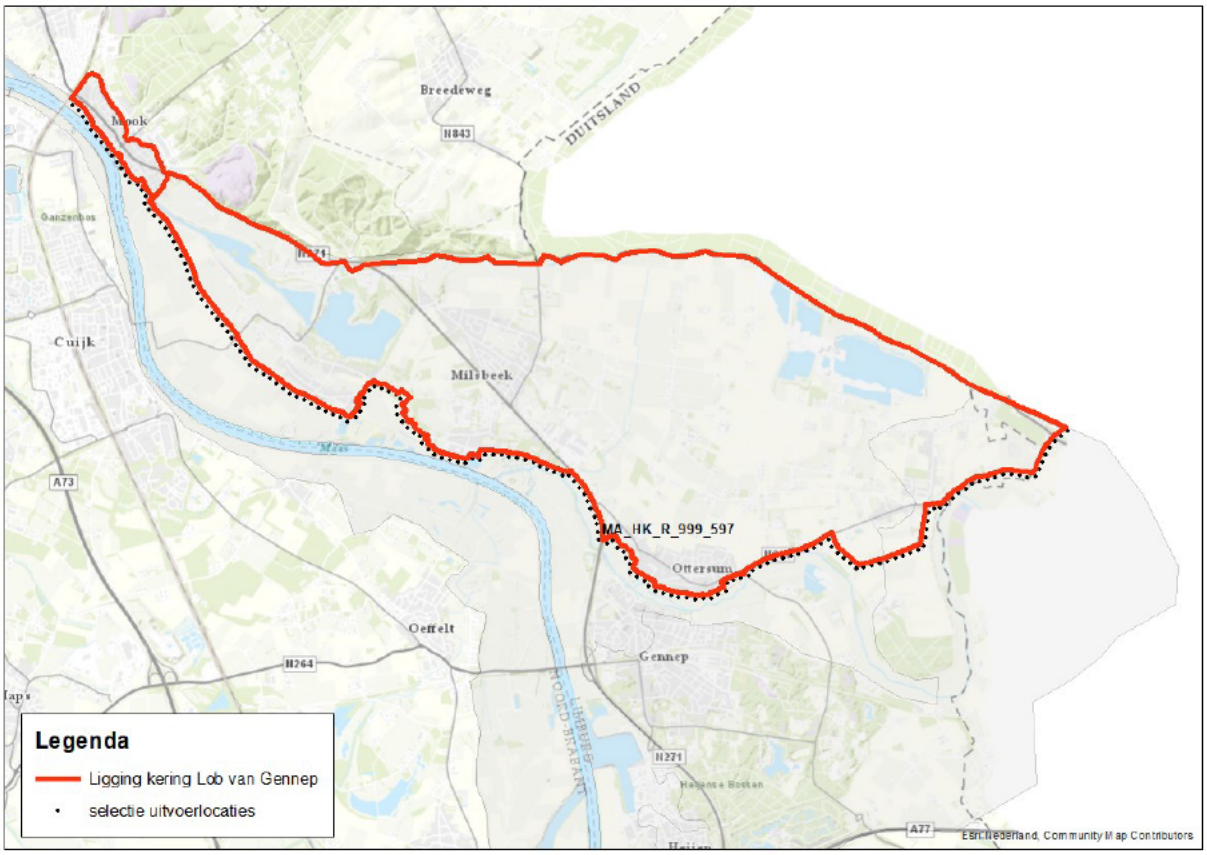
in de verschillende zichtjaren ook anders als gevolg van klimaatverandering. Beide effecten worden echter dusdanig klein verondersteld nabij de Lob van Gennep dat één Baseline-schematisering volstaat voor alle zichtjaren. De verschillen worden dus bepaald door de afvoerstatistiek.

2.2.5 Uitvoerlocaties voor de ontwerpbelastingen

In het HOB2020 model wordt uitvoer gegenereerd op de as van de rivier en aan de teen van de dijken met een resolutie van 100 m. In Figuur 1 zijn uitvoerpunten opgenomen langs de dijken rondom de Lob. Bestaande locaties (HOB2020) zijn als zwarte punten weergegeven, in groen de aangepaste en nieuw toegevoegde locaties. Naast de nieuwe punten langs de Niers, zijn ook punten toegevoegd aan de binnenzijde van de dijken, dit met het oog op de bepaling van de snelheden op kruin en binnentalud voor het erosiebestendige ontwerp. In Figuur 1 zijn alle uitvoerpunten weegegeven, inclusief de locaties die worden gebruik als backup in geval van droogval (zie paragraaf 2.5). De selectie van locaties die in de databases opgenomen worden is in Figuur 2 weergegeven. Uitgangspunt is dezelfde set uitvoerpunten voor de drie alternatieven.
Op de rivieras liggen aparte uitvoerpunten voor waterstanden om de 20 meter. De punten aan de noordzijde zitten standaard in de WBI2017-puntset maar zijn voor dit project niet nodig en daarom uiteindelijk niet in de database opgenomen. Zie Figuur 2.



Figuur 1 Alle uitvoerlocaties



Figuur 2 Selectie van uitvoerlocaties die opgenomen worden in de Databases

2.3 Berekeningen waterstanden met WAQUA t.b.v. dijk/drempelhoogtebepaling

2.3.1 Afvoeren

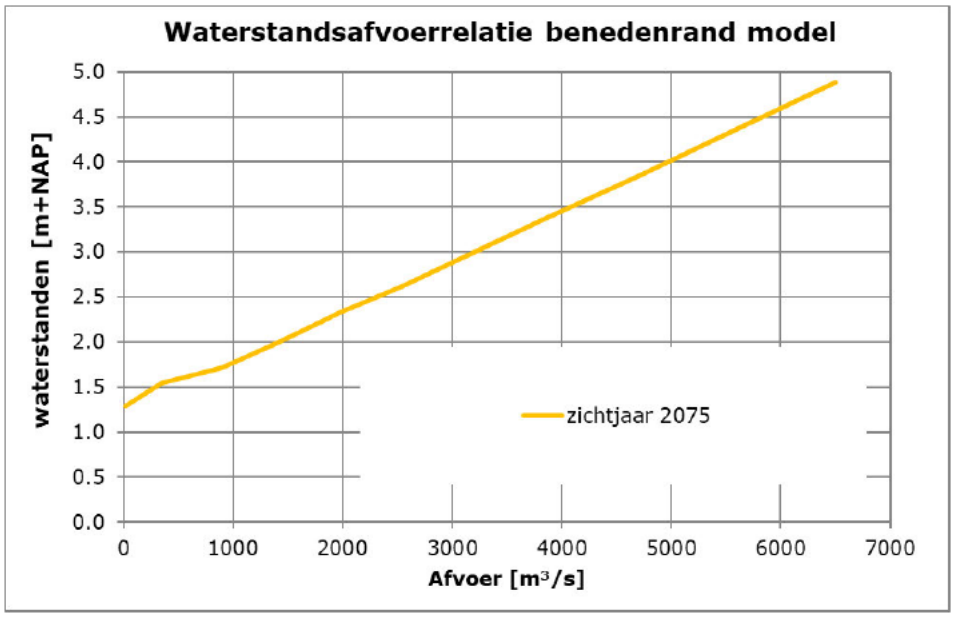
In Tabel 1 zijn de veertien *standaard* Maasafvoergolven opgenomen die met WAQUA worden doorgerekend. Zes extra afvoeren in het hoge bereik zijn toegevoegd t.o.v. de HOB2020 berekeningen, omdat de afvoerstatiestiek inclusief statistische onzekerheden tot 7.000 m^3/s gaat en om waterstanden bij de Lob-dijken te kunnen berekenen met een T600 afvoergolf, afgeleid van de laatste versie van de beschikbare statistiek. De T600 golf met statistische onzeherheid heeft een top van 4.368 m^3/s en de golf zonder 4.219 m^3/s. De set afvoeren is gelijk aan de set gebruikt in HOB2020, aangevuld met extra afvoeren uit het lopende project Lob van Gennep (zie Tabel 1).

Piekafvoer bij St. Pieter van de doorgerekende afvoeren [m³/s]									
1.300	2.260	3.275	3.317	3.612	3.900	4.100	4.200	4.219	4.350
4.368	4.500	4.600	4.800	5.000	5.200	5.500	6.000	6.500	7.000

Tabel 1 Afvoergolven, zoals ook toegepast bij het HOB2020 model en extra zes niveaus (extra afvoeren aangegeven door de grijze arcering)

2.3.2 Benedenrand

Voor elk zichtjaar geldt in principe een benedenstroomse (Keizersveer) Q-h-relatie, vooral vanwege de stijgende zeespiegel. Voor de WAQUA-berekeningen gebruiken we echter één Q-h relatie voor alle zichtjaren om het aantal WAQUA berekeningen te beperken. De verschillen nabij de Lob van Gennep zijn dermate klein dat dit verantwoord is. We bepalen de Q-h relatie dus éénmalig en wel voor zichtjaar 2075, gebaseerd op de Q-h relaties uit het Deltaprogramma (2050 en 2100). De Q-h relatie voor zichtjaar 2075 volgt uit interpolatie tussen de jaren 2050 en 2100. De resulterende benedenstroomse Q-h relatie voor de WAQUA-berekeningen binnen dit project, zijn weergegeven in Figuur 3.



Figuur 3 Waterstandafvoer-relaties voor de zichtjaar 2075 op de benedenrand in het model bij Keizersveer

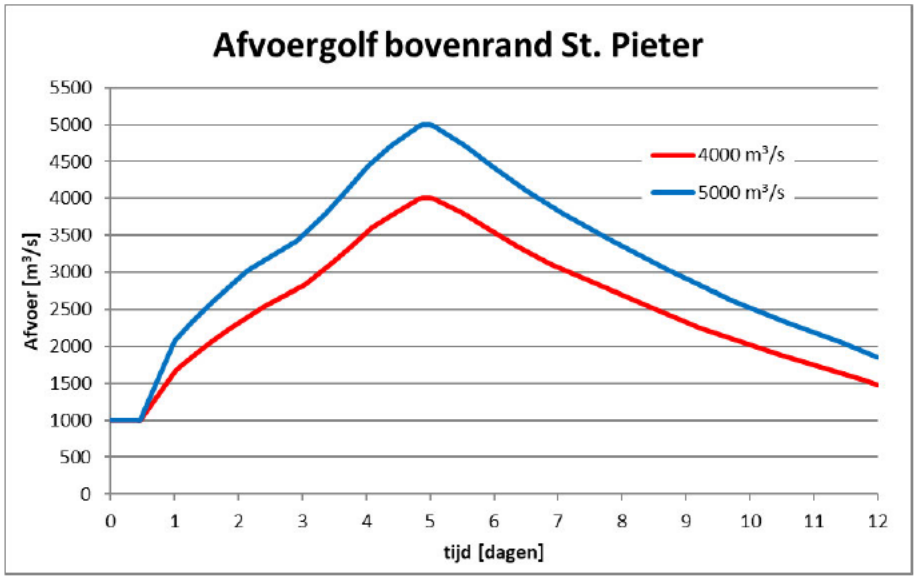
2.3.3 Lateralen

De laterale afvoeren van o.a. de Roer en Niers zijn conform de methode Van der Veen en Deltaprogramma Rivieren (2015), met aftoppen op 3.800 m³/s (beleidskeuze.)

2.3.4 Golfvorm

Voor elk van de afvoerniveaus uit Tabel 1 construeren wij een afvoergolf. Hierbij is – evenals bij het HOB Fase 1 en HOB2020 modellen- uitgegaan van de golfvormen en lateralen conform het Deltaprogramma Rivieren (2015). Figuur 4 toont de vorm van de afvoergolven met een piekafvoer

van 4.000 m³/s en 5.000 m³/s bij St. Pieter. Bij het gebruik van andere afvoerniveaus wordt de betreffende afvoergolf geschaald.



Figuur 4 Vorm van de afvoergolven op de bovenrand van het model bij St. Pieter

2.3.5 WAQUA berekeningen t.b.v. de 3 alternatieven.

De effectiviteit van de drie Lob van Gennep-alternatieven is afhankelijk van de hoogte van de dijken/drempels (Alternatief 1 en 2) en de dimensionering van het inlaatkunstwerk in samenhang met de waterstand/afvoer waarbij de instroom start (Alternatief 3). Om de hoogte te kunnen bepalen zijn allereerst waterstandsberekeningen nodig, uit te voeren met WAQUA. Met alle 20 afvoergolven (zie 2.3.1) worden, met WAQUA, de zogenaamde max13-waterstanden in elke roostercel bepaald en weggeschreven. De max13-waterstand is de waterstand *rond de piek* van de afvoergolf en wel het gemiddelde van de 13 uitvoerwaarden rond het maximum in een tijdreeks ([redacted], 2016).

Bij alternatief 3 worden de dijken rondom de Lob hoger aangelegd dan bij alternatief 1 en 2. Al het water dient immers de Lob in te stromen via het inlaatkunstwerk. Het inlaatkunstwerk gaat open bij/rond een 1/3.000e afvoer (frequentie), niet te verwarren met een 1/3.000e overstromingskans. Uitgangspunt is dat alle m³'s boven de 1:3000e de Lob van Gennep instromen. Tot de daarbij horende waterstanden is de eis dat de kans dat de dijken *doorbreken* of *overstromen* zeer klein is (vergelijk een 'doorbraakvrije' of 'Deltadijk'). Vanaf de 1/3.000e afvoer start de instroom (en daarmee de waterstand bij het inlaatwerk) en nemen de waterstanden langs de dijken niet verder toe totdat de Lob vol zit. Dit betekent dat voor alternatief 3 de afvoeren tot ongeveer 1/3.000e relevant zijn i.r.t. de belastingen op de dijken.

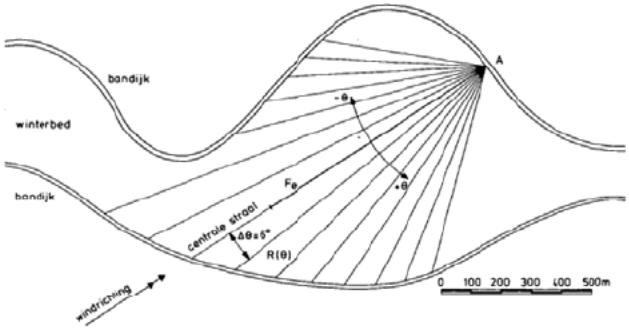
(De sturing van) het inlaatwerk wordt niet opnieuw geoptimaliseerd en ook niet toegepast in de WAQUA berekeningen. Ook in het hoge bereik rekenen we dus met een glazen wand rondom de Lob van Gennep. Het gaat in deze opdracht immers niet om het bepalen van de effectiviteit van de maatregel Lob van Gennep, maar om de belastingen op de dijken rondom de Lob van Gennep.

Het resultaat is een set maximale waterstanden langs de dijken rondom de Lob van Gennep bij de 20 afvoeren die gebruikt worden om de dijkhoogte te kunnen bepalen voor alternatief 1, alternatief 2 én alternatief 3.

2.4 Berekening golven met Bretschneider, t.b.v. dijk/drempelhoogtebepaling.

2.4.1 Bepalen effectieve strijklengtes met de methode van Bretschneider

Voor het ontwerp van de drie alternatieven (grasbekleding, hoogte, taludhellingen e.d.) zijn naast waterstandsgegevens ook golfcondities aan de teen van de dijk en nodig. De effectieve strijklengtes en bijbehorende bodemhoogtes t.o.v. NAP worden in Baseline bij elk van de 16 windrichtingen bepaald met de Baseline 5 Fetch tool. Omdat de bodemhoogtes voor alle drie de alternatieven hetzelfde zijn, hoeven de strijklengtes slechts éénmaal bepaald te worden. Windgolven op de oeverlocaties worden voor iedere relevante combinatie van windrichting, windsnelheid en waterstand bepaald met de golfgroeiformule van Bretschneider. Het toevoegen van de golfcondities aan de databases gebeurt op basis van strijklengtes en bodemhoogten.



$$F_e = \frac{\sum R(\theta)\cos^2(\theta)}{\sum \cos\theta}$$

Figuur 5 Principe strijklengtebepaling volgens methode van Bretschneider (ref: Baseline 5 Fetchtool, user manual)

De effectieve strijklengte (F_e) is feitelijk een gewogen gemiddelde van alle strijklengtes. Voor elke windrichting is in stappen van 22,5° (16 totaal) met de Fetch tool de effectieve strijklengte bepaald en een bijbehorende gemiddelde bodemhoogte. Er is daarbij rekening gehouden met de aangepaste bodemschematisatie van het HOB2020-model (bodemgeometrie, hoogwatervrije zones, kaden en modelbegrenzing). De werkwijze is in meer detail beschreven in zowel de User Manual van de Baseline Fetch tool als in (Deltares, 2016).

Voor elke combinatie van de rivierafvoer (20 afvoeren tussen 1.300 en 5.500 m^3/s), windrichting (16 windrichtingen) en windsnelheid (9 windsnelheden tussen 0 en 40 m/s) worden de golfcondities (significante golfhoogte, de spectrale golfperiode ($T_{m-1,0}$) en de piekperiode) afgeleid met de golfgroeiformules van Bretschneider (zie onderstaande formuleringen).

$$\bar{H} = 0.283 \tanh\left(0.530\bar{d}^{0.75}\right) \tanh\left[\frac{0.0125\bar{F}^{0.42}}{\tanh\left(0.53\bar{d}^{0.75}\right)}\right]$$

$$\bar{T} = 2.4\pi \tanh\left(0.833\bar{d}^{0.375}\right) \tanh\left[\frac{0.077\bar{F}^{0.25}}{\tanh\left(0.833\bar{d}^{0.375}\right)}\right]$$

$$\bar{d} = \frac{dg}{u^2}, \bar{F} = \frac{Fg}{u^2}$$

$$\bar{H} = \frac{H_s g}{u^2}, \bar{T} = \frac{T_s\, g}{u}$$

Where:

g = gravity acceleration [m/s^2]
u = wind speed at 10m height [m/s]
d = water depth [m]
F = fetch length [m]
H_s = Significant wave height [m]
T_s = Significant wave period [s]

Figuur 6 Bretschneider formules voor significante golfhoogte en –periode

De resultaten worden per uitvoerlocatie en per windrichting opgeslagen in de database fysica (zie pararagraaf 2.6).

2.4.2 Bepalen bodemhoogten op uitvoerlocaties

Voor elk uitvoerpunt (oeverlocatie) wordt in Baseline ook de bodemhoogte ter plaatse van het uitvoerpunt bepaald. De resulterende tabel heeft de volgende opmaak. Deze tabel wordt alleen gebruikt bij de controle op droogval en wordt niet opgenomen in de database.

Geometrie

x	y	richting	B	FE
176162	319803	22.5	0	0
176162	319803	45	0	0
176162	319803	67.5	0	0
176162	319803	90	0	0
176162	319803	112.5	0	0
176162	319803	135	0	0
176162	319803	157.5	0	0
176162	319803	180	0	0

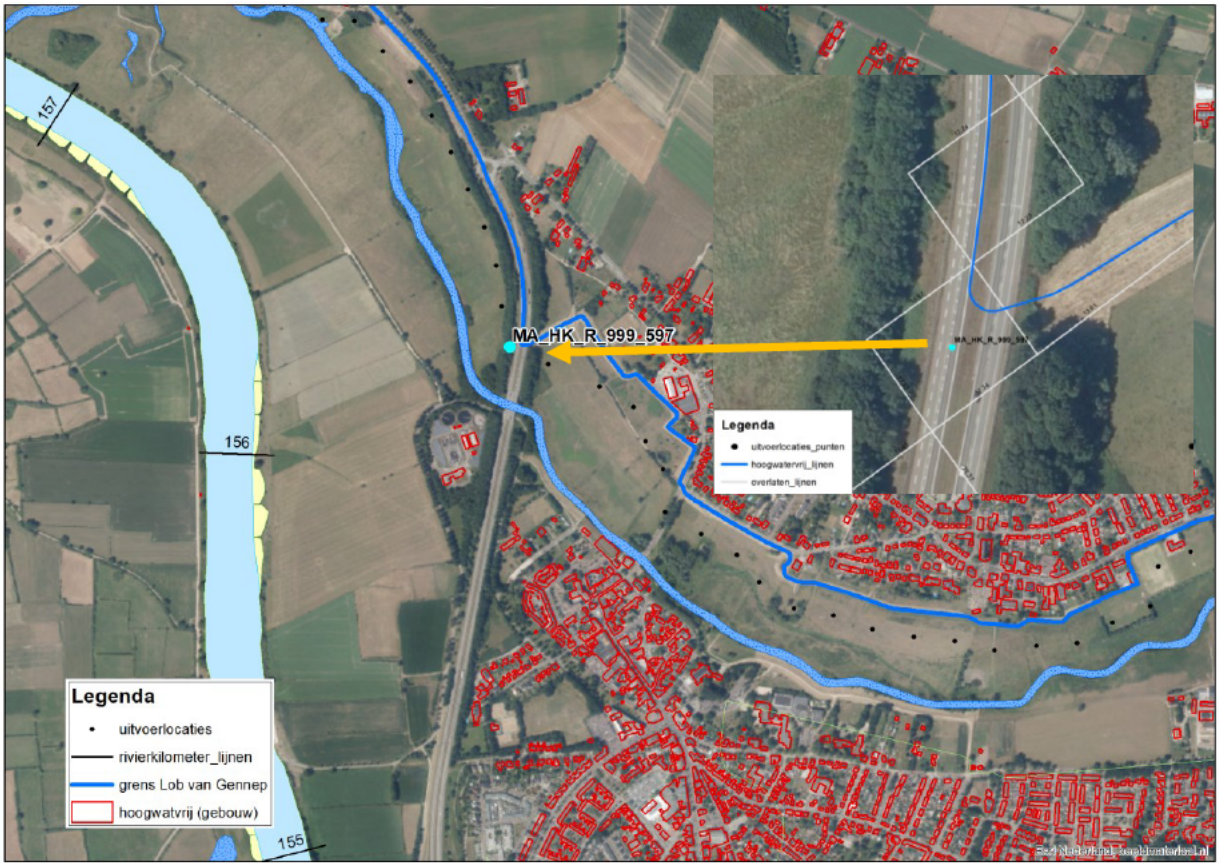
Tabel 2 Voorbeeld uitsnede tabel met bodemhoogtes (B) en strijklengte (FE) op uitvoerlocaties

2.4.3 Bepalen gemiddelde waterdiepte per windrichting

De gemiddelde bodemhoogte combineren wij met de waterstand om te komen tot de waterdiepte. De resultaten worden opgeslagen in de database fysica (zie par. 2.6).

2.5 Droogvalprocedure

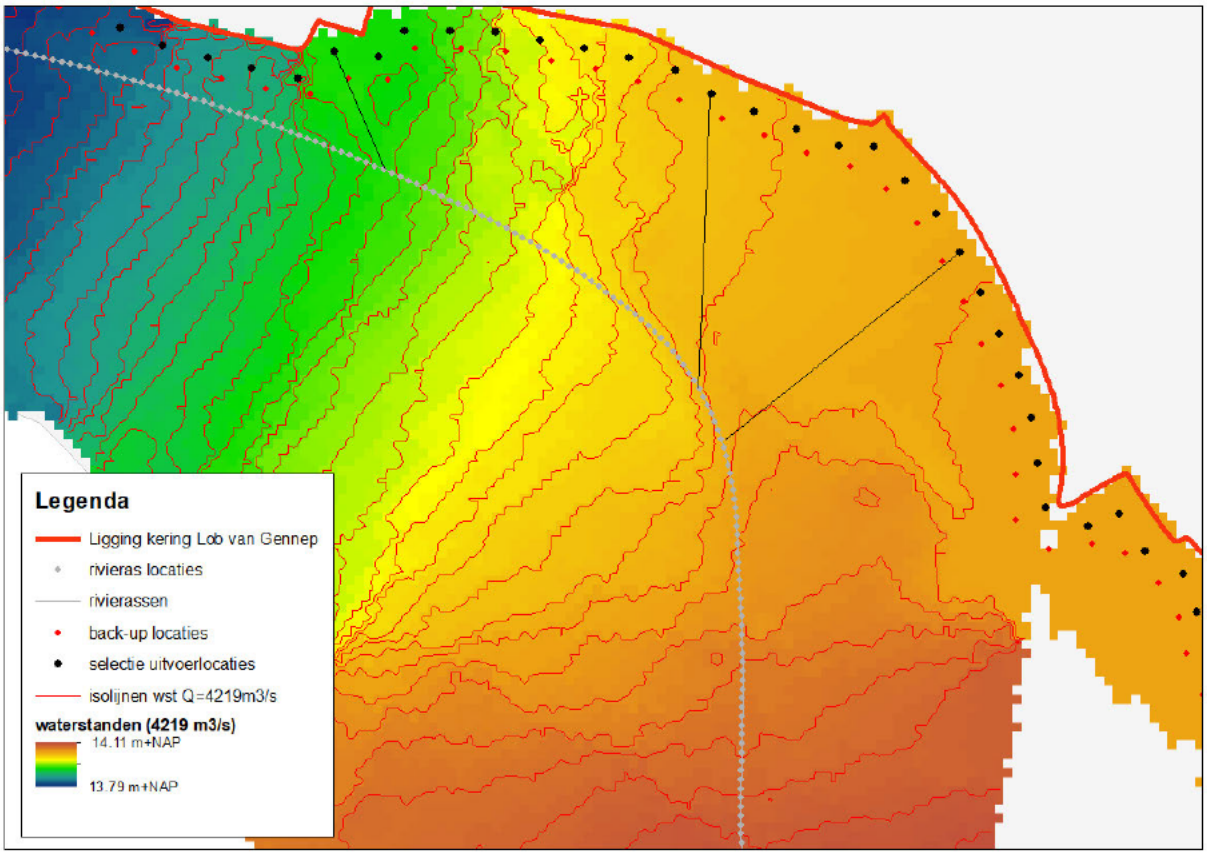
Indien uitvoerlocaties aan de teen van de dijk bij alle afvoergolven droogvallen, wordt het uitvoerpunt verwijderd. Dat geldt voor de uitvoerpunten rondom de Lob slechts in één geval. Zie Figuur 7.



Figuur 7 Locatie niet opgenomen in de databases waarbij alle veertien doorgerekende afvoerniveaus droogvallen

Wanneer een locatie voor een deel van de doorgerekende afvoerniveaus droogvalt, wordt de zogenaamde droogvalprocedure uitgevoerd, alvorens de databases te vullen, omdat anders de Hydra-NL niet goed werkt. De droogvalprocedure wordt in Baseline (GIS) uitgevoerd. De werkwijze van de koppeling tussen de droogvallende en 'vervangende' locaties is als volgt (zie ook Figuur 8):

- De waterstand behorende bij een bepaalde afvoer van een nabijgelegen, niet drooggevallen locatie (de zogenaamde back-up-locaties) met een vergelijkbare waterstand wordt opgeslagen. De golfparameters worden echter op nul gezet waardoor overslag is uitgesloten.
- Wanneer geen nabijgelegen 'natte' oeverlocatie aanwezig is, wordt de waterstand op de as van de rivier als waterstand op de oeverlocatie in de database gezet. Hiervoor is een GIS analyse procedure toegepast die op basis van het 2D-beeld van de waterstand bij een van de hooge afvoeren een koppeling maakt tussen oeverlocaties en de dichtstbijzijnde as-locatie (in Figuur 8 weergegeven met grijze punten) met gelijke waterstand. Deze koppeling van locaties (grijze lijnen in Figuur 8) wordt daarna toegepast bij de andere lagere afvoeren waarbij droogval aanwezig is.
- Voor één oeverlocatie, kunnen twee alternatieve locaties worden gebruikt: de droogvalwaardes worden –gegeven een afvoer- zoveel mogelijk gevuld met waterstanden van een back-up-locatie en daarna pas met waterstanden van de rivieras.
- Als een oeverlocatie (altijd) droogvalt zijn de golfhoogte en golfperiode gelijk aan nul gesteld.



Figuur 8 Droogvalprocedure. Koppeling droge uitvoerlocatie aan waterstand op as rivier.

De koppeling tussen de drooggevallen en de gekoppelde vervangende locaties is weergegeven in Bijlage II. Daarnaast is weergegeven tot en met welk afvoerniveau de oeverlocatie droogvalt. Bij de afvoerniveaus tot en met het weergegeven afvoerniveau is het droogvalprotocol toegepast.

Het resultaat van de droogvalprocedure is een Excel-werkblad (Bijlage III) met daarin de maximale waterstanden op de uitvoerlocaties bij de verschillende afvoeren.

2.6 Databases fysica

De waterstanden uit WAQUA en de golven bepaald met de formules van Bretschneider slaan we op in de 'databases fysica' met waterstanden en golven op de oeverlocaties (HRD-databases) en in de databases met statistiek en rekeninstellingen (HLCD databases). De databases (sqlite-formaat) worden gemaakt conform het protocol van RWS/Deltares (WBI2017 en OI2014).

2.6.1 Vullen databases met waterstands- en golfgegevens

De resultaten van de 20 waterstandsberekeningen, verwerken we m.b.v. een Python-script in een database (fysica). In de database worden alleen de waterstandsgegevens op de geselecteerde oeverlocaties (zie 2.2.5) langs de dijken rondom de Lob van Gennep opgenomen. Uitvoer in de rest van de Maasvallei is niet voorzien.
Tegelijk met de waterstanden worden ook de golfcondities op de oeverlocaties aan de databases toegevoegd, via hetzelfde Python-script.

2.6.2 Controle databases

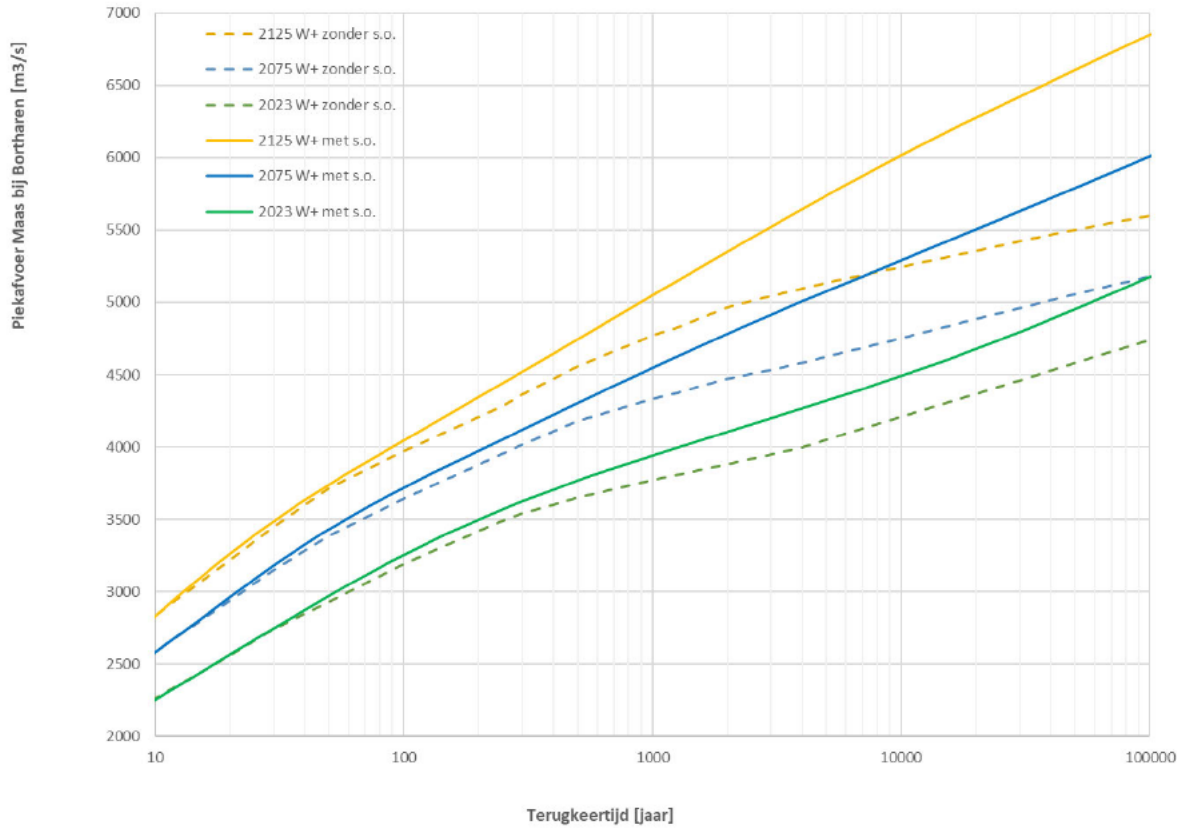
De databases worden gecontroleerd voor een selectie van locaties, gebruik makend van de meest recente versie van Hydra-NL (2.7.1), een standaardprofiel van 1:3 en een lokale dijknormaal. Globaal om de kilometer wordt een HBN testberekening uitgevoerd bij 5 l/s/m, de waterstand bij de norm en de golfhoogte (Hs) bij de norm. Door de resultaten te vergelijken met onder meer de rivierbedgeometrie worden onlogische resultaten, zoals bijvoorbeeld sprongen in waterstand en golfhoogten, zichtbaar. Zo nodig wordt de database aangepast.

2.7 Berekenen ontwerpbelastingen en dijkhoogten met Hydra-NL

2.7.1 Afvoerstatistiek

- Voor de verschillende zichtjaren (2023, 2075, 2125) wordt gebruik gemaakt van de meest recente statistiek t.a.v. *afvoeren Borgharen* (bovenrand) en *wind* (richting, snelheid), voor gebruik in Hydra-NL. De afvoerstatistiek is gebaseerd op de meest recente GRADE (Generator of Rainfall and Discharge Extremes) werklijnen bij Borgharen rapportage (Deltares 2019). GRADE levert afvoerstatistiek voor 2050 en 2100. Voor de overige zichtjaren is de statistiek hiervan afgeleid.
- De meest recente Maas-afvoerstatistiek (Borgharen) is inclusief overstromingen in Wallonië (ook wel v02), vanaf afvoeren van circa 3.000 m^3/s. Dat betekent dus een lagere werklijn dan zonder deze overstromingen.
- De afvoerstatistiek voor 2075 en 2125 is gelijk aan de statistiek die voor het project HOB2020 en daarmee de dijkversterkingen Cuijk-Ravenstein en Ravenstein-Lith in Noord-Brabant. Voor zichtjaar 2023 passen we OI2014_W_*2015*_v02 toe: zichtjaar 2015 wordt dus niet omgezet naar 2023 vanwege de zeer beperkte invloed van klimaatverandering in acht jaar.
- De afvoerstatistiek (met en zonder statistische onzekerheid) is voor 2075 gemaakt door middeling van de afvoerstatistieken van 2050 en 2100. Als voorbeeld 2075W+: Q_{2075W+} = 0.5 * Q_{2050W+} + 0.5 * Q_{2100W+}.
- De afvoerstatistiek voor 2125 volgt uit een lineaire extrapolatie met steunpunten 2050 en 2100. Als voorbeeld 2125W+: Q_{2125W+} = Q_{2100W+} + (Q_{2100W+} - Q_{2050W+})/2.
- De afvoerstatistiek voor Hydra-NL wordt vastgelegd in *.txt bestanden, volgens het daarvoor geldende format. In Hydra-NL kan met en zonder statistische onzekerheid worden gerekend.

In Figuur 9 is de afvoerstatistiek bij Borgharen (afvoeren in m^3/s bij verschillende terugkeertijden), zowel met als zonder *uitgeïntegreerde* onzekerheden weergegeven, mét overstromingen in Wallonië voor de toekomstige zichtjaren 2023, 2075 en 2125 en klimaatscenario W+.



Figuur 9 Afvoerstatistiek Borgharen zoals toegepast in Hydra-NL (Ovkans_Borgharen_piekafvoer_OI2014_W_2100_metOnzHeid_v02.txt etc.)

2.7.2 Windstatistiek

- De windstatistiek van Deelen is van toepassing.
- Voor elke combinatie van de rivierafvoer (20 afvoeren tussen 1.300 en 7.000 m^3/s), windrichting (16 windrichtingen) en windsnelheid (9 windsnelheiden tussen 0 en 40 m/s) worden de golfcondities (significante golfhoogte, de spectrale golfperiode ($T_{m-1,0}$) en de piekperiode (T_p)) afgeleid met de golfgroeiformules van Bretschneider en weggeschreven in de database fysica. Zie paragraaf 2.4.

2.7.3 Algemene rekeninstellingen ontwerpbelastingen Hydra-NL

Op basis van de databases fysica worden met behulp van Hydra-NL versie 2.7.1 (testmodus) de ontwerpbelastingen op de dijken voor de drie alternatieven en voor de verschillende faalmechanismen bepaald. Dit zijn (combinaties van) waterstanden en golven.

- Wij bepalen ontwerpbelastingen op de dijken voor de zichtjaren 2023, 2075 en 2125.
- Wij bepalen ontwerpbelastingen op de dijken *voor de diverse ontwerpsporen.* (faalmechanismen) met Hydra-NL 2.7.1 voor de aangegeven dijklocaties, gebruik makend van een standaardtalud van 1:3, een grasbekleding en de dijknormaal op basis van een eenvoudige GIS analyse.
- Hydra-NL rekent standaard met een GRADE werklijn waarin statistische onzekerheden zijn verwerkt, hetgeen nodig is om de ontwerpbelastingen te bepalen. We maken echter ook

sommen zonder statistische onzekerheden om het vergelijk met de eerder toegepaste onzekerheidstoeslag van 30 cm te kunnen maken.
- De modelonzekerheden voor waterstanden en golven nemen wij in alle berekeningen mee.
- Voor HBN berekeningen maken wij berekeningen met een kritisch overslagdebiet van zowel 5, 10 als 50 l/m/s. Met 50 l/s/m/ wordt feitelijk een overloopsituatie gesimuleerd.
- We berekenen naast waterstanden ook golven, met name omdat deze informatie gebruikt kan worden voor het dimensioneren van het buitentalud, de kruin en het binnentalud (erosiebestendig).
- Statistiek conform 2.7.1 en 2.7.2.

Dit leidt tot verschillende dijkhoogten voor de diverse combinaties van uitgangspunten. In een gezamenlijke werksessie bepalen we de uiteindelijke dijkhoogten.

2.7.4 Dijk/drempelhoogtebepaling Alternatief 1 (en 2)

De dijkhoogte voor alternatief 1 (en daarmee 2) wordt bepaald op de reguliere wijze, dat wil zeggen met de formules voor de eis aan de hoogte op doorsnedeniveau uit WBI2017 en OI2014. Uitgangspunt is de ondergrens van het normtraject, 1:300^{e}.

De te hanteren faalkansruimte voor alternatief 1 en 2 is echter niet standaard, aangezien er binnen de MIRT verkenning is gekozen voor een dijkhoogte behorende bij de T600 terugkeertijd. De dijken rondom de Lob van Gennep moeten bij alternatief 1 een hoogte hebben die hoort bij een T600 afvoergolf (ter indicatie: 4.219 m^3/s zonder onzekerheden of 4.368 m^3/s met onzekerheden in zichtjaar 2075).

Bij een standaard faalkansbudget van 24% en een lengte-effectfactor van 1, zou de terugkeertijd voor het HBN (kruinhoogte) gelijk zijn aan (1/300^{e})/24% = 1/1250^{e}. Nu deze 1/600^{e} is gekozen vanwege de effectiviteit van de Lob, verdubbelt feitelijk de faalkansruimte voor kruinhoogte naar 50%, wat leidt tot een lagere dijk. Dat betekent automatisch dat voor het normtraject de eis voor de overige mechanismen zoals piping en macrostabiliteit, strenger wordt. Dat laatste is sowieso de bedoeling, omdat de dijk wel moet overstromen, maar (liever) niet als gevolg van erosie of geotechnisch falen.

Voor alternatief 1 (en 2) worden de HBN berekeningen t.b.v. de kruinhoogtebepaling dus met een 1/600^{e} doorsnede-eis uitgevoerd.

In het rapport *Technische uitgangspunten ten behoeve van verkenning ruimtebeslag dijkversterking Lob van Gennep* (RHDHV, juni 2020) is de verschoven faalkansruimte reeds beschreven. Zie onderstaande figuur.

Type waterkering	Faalmechanisme	$\omega_{standaard}$	$\omega_{verschoven}$
Dijk	Overloop en golfoverslag	0,24	0,50
	Opbarsten en Piping	0,24	0,04
	Macrostabiliteit binnenwaarts	0,04	0,02
	Beschadiging bekleding en erosie	0,10	0,06
Kunstwerk		0,08	0,08
Overig		0,30	0,30
	Totaal:	1,00	1,00

Figuur 10 aangepaste faalkansverdeling Alternatief 1 en 2. (bron: tabel 2.2 Technische uitgangspunten ruimtebeslag LvG, RHDHV juni 2020)

Door Hydra-NL berekeningen met en zonder statistische onzekerheden te maken, vergelijken wij het effect op de benodigde dijkhoogte met de eerder onder meer door RHDHV toegepaste 30 cm onzekerheidstoeslag. Opgemerkt wordt dat door te rekenen met HBN's in plaats van waterstanden de reguliere dijken iets hoger worden.

2.7.5 Dijk/drempelhoogtebepaling Alternatief 3

Voor alternatief 3 kan de benodigde hoogte niet op de standaard-wijze met een doorsnede-eis worden afgeleid. Immers de ondergrens (1/300^e) wordt feitelijk losgelaten omdat de dijken niet dienen in/over te stromen wanneer het inlaatkunstwerk functioneert en de Lob instroomt. De dijken moeten -min of meer- 'standzeker' zijn, gedurende de instroom door het inlaatwerk. Er dient daarom een eis aan de dijken te worden gesteld die *strenger* is dan de geldende norm van 1/300^e. RHDHV (juni 2020) constateert dit al in haar rapportage. Het KPR bevestigt dit in haar advies van september 2019 (KPR-advies 668 – Lob van Gennep, september 2019). Het KPR schrijft onder meer het volgende:

"De waterberging stelt zwaardere betrouwbaarheidseisen aan dijktraject 54-1 dan de Waterwet bij een kans op inzet van de waterberging die (ruim) kleiner is dan 1/300 per jaar. Een 1/3.000e-buitenwaterstand ligt buiten het bereik van waterstanden waar een dijk met een maximaal toelaatbare overstromingskans van 1/300e per jaar tegen bestand hoeft te zijn. Ter illustratie:de kans op falen door overloop/golfoverslag van dijktraject 54-1 mag bij toepassing van de default-faalkansbegroting gelijk zijn aan 0,24 x 1/300e = 1/1200e per jaar. De dijk mag dus zonder meer falen door overloop/overslag bij een waterstand (en golfcondities) met een overschrijdingskans van 1/3000e per jaar als wordt ontworpen op een overstromingskansvan 1/300e per jaar. Om te zorgen dat de kans op het falen van dijktraject 54-1 voorafgaand aaninzet van de waterberging klein is, zal dit dijktraject aan een strengere eis moeten voldoen."

Het is dus aan het waterschap om een (strengere) doorsnede-eis vast te stellen voor de dijken, gegeven dit alternatief.

Het uitgangspunt van het waterschap is dat het inlaatkunstwerk in 90% van de benodigde gevallen (afvoer > 1/3000^e) functioneert. In die gevallen blijven de waterstanden tegen de dijken beperkt tot de waterstanden die horen bij de 1/3000^e afvoergolf. Het uitgangspunt is dat het inlaatwerk dus 'perfect aftopt'. In dat geval is bekend wat de maximale te keren waterstanden tegen de dijken zijn. De dijken dienen niet te falen vóór inzet van de waterberging. Vraag die resteert is dan hoe veilig de dijken, gegeven die waterstanden, moeten zijn. Standzekerheid bestaat immers niet. Aan de dijken kan, gegeven een maximale waterstand wel bijvoorbeeld een 10x strengere eis worden

gehangen (1:3000e i.p.v. 1:300e *overstromingskans*). In de hydraulische databases toppen wij alle waterstanden langs de dijken boven de 1/3000e *waterstanden* af. Zo kunnen we dus ook berekeningen maken met een veel strengere doorsnede-eis, zonder dat daar hogere waterstanden bij horen. Bij een 1/3000e afvoer, waarbij de instroomvoorziening nog net dicht blijft, zijn de waterstanden tegen de dijken dus maximaal. De hoogte van de dijken in dit alternatief zijn afhankelijk van het te kiezen kritisch overslagdebiet.

Indien het inlaatkunstwerk niet of niet voldoende opent, dan zullen de waterstanden tegen de dijken toenemen tot boven het niveau dat bij de 1/3000e afvoer hoort. Uitgangspunt is dat de dijken deze hogere belastingen niet hoeven te kunnen keren.

Vanuit het project Lob van Gennep is de eis geformuleerd dat het systeem van dijken en waterkerende instroomvoorziening met een betrouwbaarheid van 90% in staat moeten zijn om:

- De maximale hydraulische belasting die voorafgaand aan het openen van de waterkerende instroomvoorziening optreedt te kunnen keren. Dit geldt voor het gehele bereik van Maasafvoeren met een kans van 1/3.000 tot 1/50.000 per jaar waarbij het gebied water zal bergen, alsook voor de situaties tot de kans van 1/3.000 per jaar, waarbij er nog geen water geborgen wordt.
- De maximale belasting die optreedt tijdens het bergen van water, waarbij lokaal de waterstanden binnendijks hoger kunnen zijn dan aan de Maaszijde, te kunnen keren. Ook hierbij geldt dat dit van toepassing is tot en met zeer extreme hoogwatersituaties (van kans van 1/3.000 tot 1/50.000 per jaar).

Hoewel de methodiek van het ontwerpinstrumentarium voor dijken met de faalkansbegroting niet 1-op-1 toepasbaar is op het alternatief VD-W, vanwege de andere grondslag van de betrouwbaarheidseisen, is toch een vertaling gemaakt van betrouwbaarheidseisen naar een faalkansbegroting. Deze is in Tabel 3-4 opgenomen.

Tabel 3-4 Verschoven faalkansruimteverdeling t.b.v. betrouwbaarheidseis alternatief VD-W

Type waterkering	Faalmechanisme	$\omega_{standaard}$	$\omega_{verschoven}$
Dijk	Overloop en golfoverslag	0,24	n.v.t.
	Opbarsten en Piping	0,24	0,02
	Macrostabiliteit binnenwaarts	0,04	0,01
	Beschadiging bekleding en erosie	0,10	0,03
Kunstwerk		0,08	0,04
Overig		0,30	n.v.t.
Overstroming als gevolg van openen waterkerende instroomvoorziening (kans 1/3.000 per jaar)		n.v.t.	0,90

Figuur 11 aangepaste faalkansverdeling Alternatief 3. (bron: tabel 3-4 Technische uitgangspunten ruimtebeslag LvG, RHDHV juni 2020)

2.7.6 Overzicht ontwerpbelastingen

In onderstaande tabel is voor alle faalmechanismen samengevat welke informatie wordt afgeleid. De inhoud van de tabel is gebaseerd op bijlagen ii en iii van de Ministriële Regeling, waarbij tenzij anders is vermeld is uitgegaan van de belastingen benodigde voor de gedetailleerde toets per vak. Merk op de faalkansruimte voor de overige faalmechanismen 50% (alternatieven 1 en 2) respectievelijk 10% (alternatief 3) is. Indien de standaard faalkansbudgetten van de onderstaande mechanismen optellen tot boven deze percentages, dan zullen we de budgetten proportioneel verkleinen.

Faalmechanisme	Alternatief 1&2, eis	Alternatief 3, eis
Hoogte (GEKB)	1/600e	1/3000e
Piping, STPH	Buitenwaterstand bij de norm: 1/300e	Buitenwaterstand bij de aangepaste norm: 1/3000e
Macrostabiliteit binnenwaarts, STBI	Idem als STPH	Idem als STPH
Macrostabiliteit buitenwaarts, STBU	Idem als STPH	Idem als STPH
Microstabiliteit, STMI	Idem als STPH	Idem als STPH
GEBU, Grasbekleding erosie buitentalud	Toets op Maat belastingen Per waterstandsniveau bij de faalkanseis per doorsnede (ω=4,5%) wordt de significante golfhoogte, de golfperiode en de hoek van golfinval bepaald (golfcondities bekledingen in Hydra-NL, optie Toets op Maat)	Toets op Maat belastingen Per waterstandsniveau bij de faalkanseis per doorsnede (ω=4,5%) wordt de significante golfhoogte en -periode bepaald (golfcondities bekledingen in Hydra-NL)
GABU (grasbekleding afschuiven buitentalud)	Afhankelijk van de ligging van de grasbekleding: i) sign. golfhoogte bij de norm (marginale statistiek) of ii) Toets op Maat: per waterstandsniveau bij de faalkanseis per doorsnede de significante golfhoogte	Afhankelijk van de ligging van de grasbekleding: i) sign. golfhoogte bij de norm (marginale statistiek) of ii) Toets op Maat: per waterstandsniveau bij de faalkanseis per doorsnede de significante golfhoogte
GABI (grasbekleding afschuiven binnentalud)	Waterstand bij de norm & Overslagdebiet bij de norm (1/300e) en de sign. golfhoogte in het illustratiepunt)	Waterstand bij de norm & Overslagdebiet bij de norm (1/3.000e) en de sign. golfhoogte in het illustratiepunt)
Inlaatwerk	Alle mogelijke combinaties van golven en waterstanden worden meegenomen in de uitvoering van de toets met de WBI 2017-software. waterstandsverloop (voor de berekening van de komberging) *De drukkrachten op de waterkering worden middels Goda-tabellen vertaald, zie software documentatie [ref 27].*	

Kans	Wettelijke Normdijken	Verbindende dijken met waterkerende instroomvoorziening[2)]
Signaleringswaarde	1 / 1.000	n.v.t.
Maximaal Toelaatbare kans	1 / 300	1 / 3.000
Hydr. Belasting kruinhoogte[1)]	1 / 600	1 / 3.000
Waterstand overige faalmechanismen[1)]	1 / 300	1 / 3.000

[1)] De kansen betreffende de hydraulische belasting van de kruinhoogte en de waterstand van de overige mechanismen zijn overschrijdingsfrequenties
[2)] Voor dit alternatief geldt dat de maximale hydraulische belasting die voorafgaand aan het openen van de waterkerende instroomvoorziening optreedt gekeerd moet kunnen worden, waarmee andere en strengere randvoorwaarden gelden dan vanuit de reguliere systematiek (zie paragraaf 3.2.3)

Figuur 12 Overschrijdingskansen van de hydraulische belastingen (bron: tabel 4.1 Technische uitgangspunten ruimtebeslag LvG, RHDHV juni 2020)

Mechanisme	Te bepalen parameters	Te gebruiken instrument*/bronnen
Hoogte	Buitenwaterstand	Hydra-NL
	OF buitenwaterstandsverloop	Hydra-NL + Waterstandsverlooptool
	Golfhoogte	Hydra-NL
	Binnenwaterstand	Lokale gegevens
Niet sluiten	Buitenwaterstand	Hydra-NL/ Tienjarige overzichten/ Waterdata
	OF Buitenwaterstandsverloop	Hydra-NL + Waterstandsverlooptool
	Golfhoogte	Hydra-NL
	Binnenwaterstand	Lokale gegevens
Piping	Buitenwaterstand	Hydra-NL
	Binnenwaterstand	Lokale gegevens
Constructief bezwijken	Buitenwaterstand	Hydra-NL
	Golfhoogte	Hydra-NL
	Binnenwaterstand	Lokale gegevens

* Het WBI instrumentarium Riskeer (zie paragraaf 3.2.3) is niet opgenomen in de tabel, terwijl er wel mogelijkheden zijn dit te gebruiken. Op dit moment is dat nog maatwerk wat vraagt om veel extra inspanning en externe hulp.

Figuur 4-3 Overzicht Belastingparameters en hiervoor beschikbaar instrumentarium per faalmechanisme

Figuur 13 Overzicht belastingparameters en hiervoor beschikbaar instrumentarium per faalmechanisme (bron: figuur 4.3 Technische uitgangspunten ruimtebeslag LvG, RHDHV juni 2020)

2.8 Aanpassen Baseline-schematisering aan daadwerkelijke dijkhoogten

Nadat de dijkhoogtes voor de drie alternatieven bepaald zijn, wordt de Baseline-schematisering voor alternatief 1 aangepast aan de werkelijke dijkhoogte. Doel is om WAQUA berekeningen te maken voor de diverse afvoergolven, gegeven de daadwerkelijk dijkhoogte, voor de bepaling van de belasting op het binnentalud door instromend water.

2.9 Uitvoeren van WAQUA-berekeningen voor de bepaling van hydraulische belastingen bij waterbergende werking.

Zodra de Baseline-schematiseringen met de daadwerkelijke dijkhoogten gereed zijn converteren wij deze naar WAQUA-schematiseringen voor alternatief 1. met het bestaande rooster maas40m_5-vLG.rgf en rekenen we voor dit alternatief alleen die afvoergolven door die leiden tot overstromen van de dijken rondom de Lob van Gennep, ten behoeve van de bepaling van de belasting op het binnentalud (snelheden). Hiervoor is nabewerking op uitvoer van WAQUA-resultaten nodig (waterstanden aan weerszijden van dijk, verval) om de snelheden op het talud te bepalen. We gebruiken hiervoor overlaatformules. Uitgangspunt is dat deze analyse alleen voor zichtjaar 2075 wordt uitgevoerd.

2.10 Stroomsnelheden over de dijken

Het uitgangspunt is dat overloop het relevante mechanisme is voor stroomsnelheden over de dijken. In het geval van overloop kan de dijk als een overlaat geschematiseerd worden. Een overlaat kan volkomen of onvolkomen zijn, waarbij een onvolkomen overlaat gestuwd is (waterstand benedenstrooms beïnvloedt stroming bovenstrooms) en een volkomen overlaat ongestuwd (geen invloed waterstand benedenstrooms op stroming bovenstrooms). De stroomsnelheden op de dijk volgen niet direct uit WAQUA resultaten. Deze kunnen wel via overlaatformules gemodelleerd worden. Daarom zijn ze afgeleid uit hydraulische parameters boven- en benedenstrooms van de dijk (waterstanden, stroomsnelheden en afvoer).

Voor deze analyse kunnen de resultaten van golfberekeningen gebruikt worden. In het kort bestaat dit uit de volgende stappen:

1. Bepalen van de grootte en richting van de snelheden rechts (rivierzijde of bovenstrooms) van de kade (= resultaat WAQUA berekeningen)
2. Bepalen van de component van de stroomsnelheid loodrecht op de kade (loodrechte aanstroming), op basis van de oriëntatie van de kade
3. Bepalen van waterstanden rechts (rivierzijde of bovenstrooms) en links (polderzijde of bovenstrooms) van de kade (volgen uit de WAQUA berekeningen)
4. Controle van stromingscondities (volkomen of onvolkomen overlaat). Het criterium voor een volkomen situatie is:
   $h_3 - h_{kr} < \frac{2}{3} H_1$ met $H_1 = (h_1 - h_{kr}) + \frac{u_1^2}{2g}$

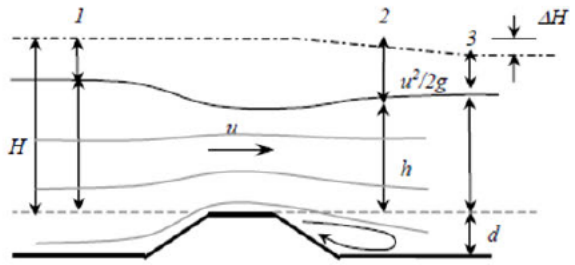
   Waarin:

   h_1 = waterstand bovenstrooms [m+NAP]
   h_3 = waterstand benedenstrooms[m+NAP]

H_1 = Energiehoogte bovenstrooms t.o.v. kruin [m+NAP]
h_{kr} = kruinhoogte overlaat [m+NAP]
u_1 = stroomsnelheid bovenstrooms [m/s]
g = zwaartekrachtversnelling [m/s^2]

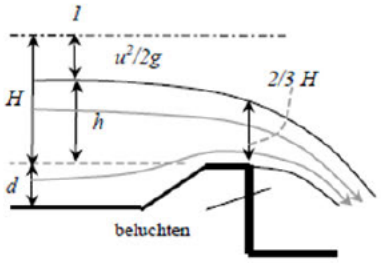
1. Bepalen van snelheden op de dijk via overlaatformules:

onvolkomen overlaat



$$u_2 = c_{ok}\sqrt{2g\,(H_1 - h_3)}$$

volkomen overlaat



$$u_2 = c_{vk}\sqrt{\frac{2gH_1}{3}}$$

Waarin:

U_2 = stroomsnelheid op de overlaat [m/s]
c_{ok} = overlaatcoëfficiënt onvolkomen
c_{vk} = overlaatcoëfficiënt volkomen

De volkomen overlaatcoëfficiënt is verondersteld gelijk te zijn aan 1 en de onvolkomen overlaatcoëfficiënt gelijk aan 1,2.

Met deze stappen worden tijdreeksen met de snelheden op de kruin van de dijk gemaakt voor elke berekende afvoer. Met deze tijdreeksen worden daarna de maximale stromsnelheden op de kruin van de dijk tijdens elke golf bepaald.

3 Referenties

[redacted], 2020
Hydraulische Ontwerpbelastingen Bedijkte Maas 2020, Rapport, HKV Lijn in Water i.o.v. waterschap Aa en Maas.

[redacted], 2019
Update afvoerstatistiek Maas [Deltares-memo 11203685-000-ZWS-0001]. Deltares, 25 juli 2019. Rapport, i.o.v. Rijkswaterstaat.

[redacted], 2019
Spreadsheet Afvoerstatistiek_Maas_KNMI06_WenG_NIEUW_VERSIE5_040919_CHECKED.xlsx. Rijkswaterstaat WVL, 4 september 2019.

[redacted], 2016
WAQUA Productieberekeningen Bovenrivieren Rijntakken Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017.

[redacted] e.a., 2016
Input database for the Bretschneider wave calculations for narrow river areas, Rapport, Deltares i.o.v. Rijkswaterstaat.

4 Bijlagen

- Bijlage I: Shapebestand met alle uitvoerpunten die in de database zijn opgenomen.
- Bijlage II: Koppeling van de namen van de nieuwe databases met de namen van de locaties van WBI2017-databases.
- Bijlage III: Koppeling tussen de drooggevallen en de gekoppelde vervangende locaties.