

OVERSTROMINGSMODEL VAN NEDERLAND



Een stormvloed op de Noordzee en 40 dijkdoorbraken. Niemand in Nederland weet of het 2 uur of 2 dagen duurt voordat het water ons huis bereikt. Deze thesis gaat over de ontwikkeling van een overstromingsmodel dat de aankomsttijd van dit water berekent.

LOUISE KLINGEN
TU DELFT, 2016

OVERSTROMINGSMODEL VAN NEDERLAND

Master Thesis
Louise Klingen

Technische Universiteit Delft
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Watermanagement

Afstudeercommissie:

prof. dr. ir. N.C. van de Giesen	TU Delft
prof. dr. ir. S.P. Hoogendoorn	TU Delft
dijkgraaf mr. J.H. Oosters	Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard
watergezant H.J.W. Ovink	Ministerie van Infrastructuur en Milieu
dr. ir. P.E.R.M. van Leeuwen	Deltares, Stichting 3Di
dr. ir. M.W. Ertsen	TU Delft
dr. ir. O.A.C. Hoes	TU Delft, Nelen&Schuurmans

louiseklingen@gmail.com
Delft, 2016

VOORWOORD

Mijn nieuwsgierigheid voor water begon op de Waddeneilanden, waar ik iedere vakantie als klein kind een zelfgebouwd eiland verdedigde tegen de vloed. Daarna groeide mijn passie voor water in ieder werkstuk op de basis- en middelbare school, met als eindwerkstuk: 'Land en zee strijden om de grens'. Het kan dan ook geen toeval zijn dat deze scriptie over hetzelfde onderwerp gaat.

Met veel plezier heb ik de afgelopen maanden aan mijn thesis gewerkt. Wellicht met een iets te grote drang om het ook steeds over te willen brengen naar anderen. Ik werd blij van alle mensen die na enkele zinnen overtuigd waren van het nut van een landelijk overstromingsmodel. Zij gaven mij het groeiende besef dat ik op het goede spoor zat, maar ook dat het einde van deze scriptie geen einde zal zijn van mijn hardnekkige motivatie voor overstromingen.

Graag wil ik iedereen bedanken die mij heeft geholpen tijdens het afstuderen. Alle medewerkers van Nelen en Schuurmans voor hun hulp, de gezelligheid aan de Oude Gracht en de mogelijkheid om 3Di te gebruiken. Marlies en Lotte voor de fijne gesprekken. Henk die bij de start al veel mogelijkheden zag. Serge die mij nieuwsgierig heeft gemaakt naar het combineren van overstromingsmodellen en evacuaties. De gehele afstudeercommissie voor het vertrouwen, hun energie en tijd. Maurits voor zijn nuchtere begeleiding en hulp bij het schrijven van deze scriptie.

Bovenal, ben ik Olivier enorm dankbaar voor zijn onvoorwaardelijke begeleiding, enthousiasme en hulp bij het schrijven en modeleren. Het was leuk om de gezamenlijke interesse in overstromingen te delen. Zonder een eigen belang te hebben heeft hij van begin tot eind met veel energie mij door het afstuderen heen geholpen.

Louise Klingen

Delft, oktober 2016

SAMENVATTING

Tijdens het bestrijden van de gevolgen van een overstroming is het zinvol om te weten in welke richting het water stroomt en hoe laat het water een kruispunt bereikt. Deze thesis gaat over een overstromingsmodel van heel Nederland. Met dit model kan in 15 minuten het verloop van elke overstroming voor de komende 24 uur worden uitgerekend. Tot nu toe bestond een dergelijk model niet. De overstromingsmodellen die in de praktijk gebruikt worden rekenen namelijk te langzaam, waardoor alleen kaarten met het resultaat van vooraf uitgerekende theoretische scenario's gebruikt konden worden om inzicht te verschaffen in het verloop van een overstroming.

In dit onderzoek is als eerste de toegevoegde waarde van een landelijk model bij het bestrijden van een overstroming uitgewerkt. Daarna is onderzocht welke processen het model minimaal moet bevatten om een realistisch verloop van een overstroming te kunnen berekenen. Als laatste is met 3Di een eerste versie van dit model gebouwd, waarmee voor elke willekeurige plek langs de kust een doorbraak en het verloop van een overstroming snel kan worden uitgerekend.

Van de verschillende crisispartners zijn vooral de waterschappen en de veiligheidsregio's geholpen met een goede voorspelling van een overstroming. Voor de waterschappen is het berekende verloop relevant, omdat zij daarmee weten in welke richting en in welke volgorde het land overstroomt en zij met hetzelfde model snel het effect van maatregelen kunnen doorrekenen. Voor de veiligheidsregio's is het model vooral nuttig, omdat zij daarmee weten hoe lang een bepaalde route nog gebruikt kan worden voor het aanvoeren van materiaal of het evacueren van de bevolking.

Voor een model dat een realistisch verloop van een overstroming kan berekenen is een hoogtekkaart nodig waarop minimaal de belangrijkste primaire dijken en boezemkaden zijn opgenomen, maar ook andere 'objecten' die het stromen van water beïnvloeden, zoals op het maaiveld aangelegde wegen en onder het maaiveld gelegen watergangen. Zonder deze objecten berekent het model weliswaar stroming van water, maar zijn de aankomsttijden niet realistisch.

In de nu gebouwde 3Di schematisatie van Nederland is vooral aandacht besteed aan een overstroming vanuit de Noordzee, Waddenzee, IJsselmeer of Markermeer. Het rivierengebied is alleen op hoofdlijnen meegenomen. Om het model ook voor een overstroming vanuit de grote rivieren nuttig te kunnen gebruiken, wordt aanbevolen om het model daar verder uit te bouwen en te verfijnen.

INHOUD

Voorwoord	5
Samenvatting	6
1. Inleiding	8
1.1 Aanleiding	9
1.2 Doelstelling	9
1.3 Leeswijzer	9
2. Nut voor de crisispartners	10
2.1 De kwetsbaarheid van Nederland	11
2.2 Samenwerking rondom landelijke overstroming	11
2.3 Landelijke Coördinatiecommissie Overstromingsdreiging	12
2.4 Waterbeheerders	12
2.5 Veiligheidsregio's	14
2.6 Coördinatiecentrum Crisisbeheersing-min.I&M	14
2.7 Inzicht in de verwachte situatie	15
2.8 Ondersteuning door een overstromingsmodel	17
3. Het modelleren van overstromingen	20
3.1 Algemeen	21
3.2 Ondiep-water-vergelijkingen	21
3.3 Quadtree-subgrid rekenmethode	23
3.4 3Di-instrumentarium en een landelijk model	25
4. Elementen van een overstromingsmodel	26
4.1 Algemeen	27
4.2 Opzet proefpolder	28
4.3 Verspreiding van water over het landschap	28
4.4 Dijkdoorbraken	34
4.5 Buitenwaterstand	38
5. Landelijk Overstromingsmodel	42
5.1 Algemeen	43
5.2 Modelschematisatie	43
5.3 Het gebruik van de huidige schematisatie	51
5.4 Verdere ontwikkeling van de schematisatie	53
6. Conclusies en aanbevelingen	54
Executive English Summary	58
literatuurlijst en fotoverantwoording	66
Bijlagen	70
I. Landelijk Waterbeeld	71
II. Het nut van snelle modelresultaten voor de crisispartners	76
III. Dwarsprofiel van een dijk	77
IV. Dijkdoorbraken van de Watersnoodramp 1953	78
V. Windopzet en windrichtingen	80
VI. Voorspellingen van waterstanden	82
VII. De AHN en huizen, bomen, auto's	84
VIII. Modeldetails	88

1. INLEIDING



1.1 Aanleiding

Wanneer morgen een grootschalige overstroming plaatsvindt, is er geen instrument dat voorspelt hoe laat het water waar aankomt. Zowel de Waterschappen als Rijkswaterstaat hebben wel een idee, maar dat is grotendeels gebaseerd op kennis van deskundigen. Een goede analyse of een computermodel dat het overstromingsverloop snel kan berekenen bestaat namelijk niet.

De modellen die nu gebruikt worden zijn traag; ze rekenen met dezelfde snelheid als dat een overstroming stroomt: 24 uur overstroming doorrekenen duurt dan 24 uur. Hierdoor zijn de resultaten niet bruikbaar voor het toetsen van noodmaatregelen tijdens de overstroming.

Sinds 2011 wordt door een consortium van Nederlandse partijen gewerkt aan 3Di. Dit is een model dat door het combineren van verschillende technieken wel sneller kan rekenen dan dat een overstroming duurt. Tot nu toe is 3Di alleen nog achteraf ingezet voor regionale vraagstukken om na wateroverlast de gebeurtenis te reconstrueren. In deze studie wordt onderzocht of het haalbaar is om met 3Di een 2D overstromingsmodel van heel Nederland te creëren dat bruikbaar is voor de crisispartners bij een overstroming.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van dit afstudeeronderzoek is dan ook: het ontwikkelen van een landelijk overstromingsmodel waarmee kan worden gesimuleerd hoe Nederland vanuit de Noordzee, Waddenzee, IJsselmeer of Markermeer overstroomt wanneer meerdere dijken doorbreken.

Het model moet een overstroming sneller simuleren dan de werkelijke overstroming, zodat crisispartners binnen enkele minuten weten hoe een overstroming de opvolgende uren en dagen gaat verlopen en daarmee weten hoeveel tijd zij hebben voor het nemen van maatregelen.

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk twee wordt ingegaan op de relevantie van een landelijk overstromingsmodel voor de verschillende crisispartners die bij een overstroming betrokken zijn. Hoofdstuk drie gaat over het modelleren van een overstroming. De overstromingsprocessen die voor het schaalniveau van een landelijk model in ieder geval noodzakelijk zijn om mee te nemen zijn in hoofdstuk vier uitgewerkt. Hoofdstuk vijf beschrijft de ontwikkelde schematisatie van Nederland en waarop deze nog verder ontwikkeld kan worden. Hoofdstuk zes bevat de conclusie en aanbevelingen.

2. NUT VOOR DE CRISISPARTNERS



2.1 De kwetsbaarheid van Nederland

Waar rivieren in zee stromen is het omliggende land vlak en dus kwetsbaar voor overstromingen door hevige neerslag of storm op zee. In Nederland ligt 26 procent van het landoppervlak beneden NAP (Normaal Amsterdams Peil), 29 procent is gevoelig voor rivieroverstromingen en 55 procent wordt beschermd door duinen, dijken, dammen en kunstwerken (PBL, 2009). Het beschermingsniveau dat deze constructies tegen overstromingen moet bieden is opgenomen in art. 2.2 lid 2 van de Waterwet uit 2009. De waterkeringen die Noord- en Zuid-Holland beschermen tegen het buitenwater, moeten gedimensioneerd zijn op een waterstand die een gemiddelde kans van voorkomen heeft van 1:10.000 per jaar en de keringen langs de grote rivieren op een waterstand met een gemiddelde kans van voorkomen van 1:1250 per jaar. 100 procent bescherming tegen overstromingen is onbetaalbaar en daarom is het noodzakelijk af en toe een overstroming te tolereren.

Om beter voorbereid te zijn op overstromingen is in het Nationaal Waterplan 2009-2015 (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2009) het begrip meerlaagsveiligheid geïntroduceerd. Meerlaagsveiligheid geeft invulling aan het besef dat waterveiligheid niet alleen bestaat uit (de eerste laag) het keren van water maar ook dat de gevolgen kunnen worden verminderd door (de tweede laag) een geschikte ruimtelijke inrichting achter deze dijken en dammen en (de derde laag) de manier waarop in Nederland de rampenbestrijding is voorbereid op het organisatorisch beheersen van een overstroming. Het onderwerp van deze thesis is relevant voor deze derde laag.

2.2 Samenwerking rondom landelijke overstroming

Voor het organisatorisch beheersen van een bovenregionale (regio-overschrijdende) overstromingsdreiging door extreme weersomstandigheden op de Noordzee en een verhoogde kans op falen van meerdere dijken, is het Landelijk Draaiboek Hoogwater en Overstromingen (SMWO, 2015) van toepassing. In dit draaiboek staat omschreven hoe de op dat moment relevante crisispartners zullen samenwerken om een ernstige crisis te voorkomen en de situatie zo goed mogelijk te beheersen. Het gaat om de volgende crisispartners:

- Landelijke Coördinatiecommissie Overstromingsdreiging;
- Rijkswaterstaat-regio's;
- Waterschappen;
- Veiligheidsregio's;
- Departementaal Coördinatiecentrum Crisisbeheersing van het ministerie van Infrastructuur en Milieu.

2.3 Landelijke Coördinatiecommissie

Overstromingsdreiging

De Landelijke Coördinatiecommissie Overstromingsdreiging (LCO) is tijdens een dreigende bovenregionale overstroming verantwoordelijk voor het informeren van de andere crisispartners over de actuele en verwachte situatie. Zij worden pas actief wanneer de verwachte waterstanden tot gevaarlijke situaties kunnen leiden en opereren dan vanuit het Watermanagement Centrum Nederland in Lelystad.

In de LCO zitten afgevaardigden vanuit Rijkswaterstaat en het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) en eventueel spoedadviseurs van Deltares^[1] en een liaison van de Unie van Waterschappen. Gezamenlijk stellen zij een waterbeeld op, waarmee zij de andere crisispartners informeren over de actuele en verwachte situatie. In dit waterbeeld zijn opgenomen:

- Waterstands- en weersinformatie;
- Effecten van waterstanden;
- Verwachte knelpunten;
- Overzicht van maatregelen;
- Dreigingsbeeld.

De exacte inhoud hangt af van de aard en omvang van de dreigende overstroming. In december 2014 dreigde een overstroming van bovenregionale schaal en heeft de LCO een waterbeeld opgesteld. Dit waterbeeld is ter illustratie opgenomen in bijlage I.

2.4 Waterbeheerders

Het Nederlandse watersysteem wordt beheerd door Rijkswaterstaat en de Waterschappen. Rijkswaterstaat is verantwoordelijk voor het functioneren van het hoofdwatersysteem en de waterschappen voor de regionale watersystemen. Dit gebeurt vanuit zeven Regionale Rijkswaterstaatsdiensten en drieëntwintig Waterschappen (zie figuur 2-1 en figuur 2-2). Bij een dreigende overstroming zijn de Waterschappen en Rijkswaterstaat verantwoordelijk voor het nemen van watersysteemmaatregelen, zoals het instellen van dijkpatrouilles, waar nodig verstevigen van dijken, het sluiten van coupures etc. In het draaiboek is vastgelegd dat elk Waterschap en Regionale Rijkswaterstaatsdienst in een dergelijke situatie de volgende informatie aan de LCO doorgeeft:

- Informatie over zwakke plekken;
- Effecten van waterstanden;
- Verwachte knelpunten;
- Mogelijke maatregelen.

De LCO bundelt deze regionale informatie van alle waterschappen in één landelijk waterbeeld en communiceert deze naar alle Waterschappen en Regionale Rijkswaterstaatsdiensten.

Bij een bovenregionale overstroming is in eerste instantie de indeling in 95 dijkringen relevanter dan de indeling in Regionale Rijkswaterstaatsdiensten en waterschappen (zie figuur 2-3). Deze dijkringen worden gevormd door de primaire waterkeringen. Hiervan is 80% in beheer bij de waterschappen en 20% bij Rijkswaterstaat. Nu zijn er dijkringen die door meerdere waterschappen beheerd worden (bijvoorbeeld dijkkring 6 en 14). Om slagvaardig te kunnen handelen delen deze waterschappen - los van de LCO - direct onderling informatie

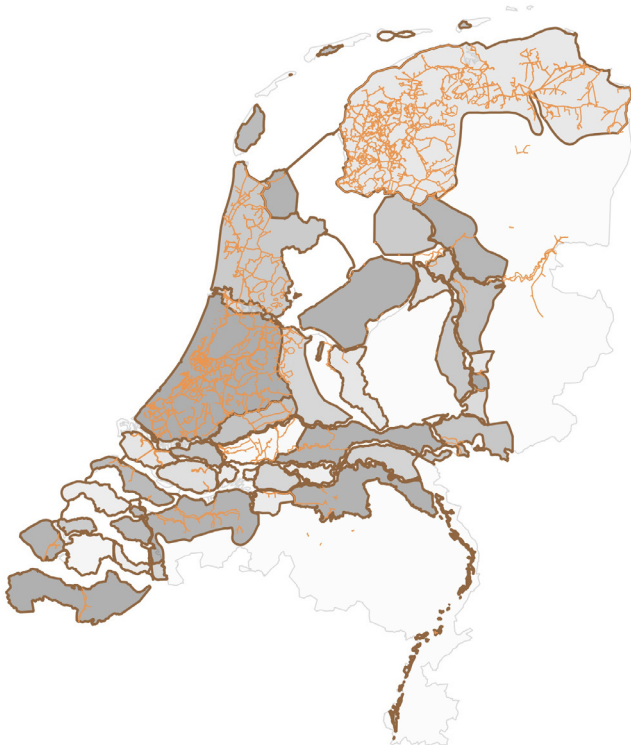
1 Deltares is een onafhankelijk instituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond.



figuur 2-1: Rijkswaterstaat Regio's



figuur 2-2: Drieëntwintig Waterschappen (anno 2016)



figuur 2-3: Primaire en secundaire keringen



figuur 2-4: Veiligheidsregio's

over waterstanden, zwakke plekken en maatregelen. In tweede instantie liggen binnen deze dijkringen nog secundaire regionale keringen, zoals boezemkaden, die volledig onder beheer van de waterschappen vallen. Deze boezemkaden zijn nadat een primaire kering is doorgebroken medebepalend voor hoe het water zich verdeelt binnen een dijkkring.

2.5 Veiligheidsregio's

Naast maatregelen om de dreigende overstroming te voorkomen of beperken zijn ook maatregelen nodig voor de openbare orde en veiligheid. Hiervoor zijn niet Rijkswaterstaat of de waterschappen, maar de veiligheidsregio's verantwoordelijk, zoals vastgelegd in de Wet Veiligheidsregio's (2010). Zij informeren de burgers over blijven of weggaan en zijn verantwoordelijk voor het eventueel organiseren en uitvoeren van evacuaties.

Nederland is ingedeeld in vierentwintig veiligheidsregio's (zie figuur 2-4), waarin gemeentes, politie, brandweer en ambulancediensten samenwerken. Deze indeling is niet gelijk aan de indeling in drieëntwintig waterschappen, maar gelijk aan de indeling van de voormalige politieregio's. De veiligheidsregio's zijn verantwoordelijk voor de regionale hulpverlening bij het bestrijden van rampen en crises en vallen onder het ministerie van Veiligheid en Justitie. De burgemeester van één van de gemeentes in de veiligheidsregio is de voorzitter. Omdat de organisaties die gezamenlijk de veiligheidsregio vormen geen specifieke waterkennis hebben, worden zij hierin ondersteund door de waterschappen (onder ander via een Liaison) en gaat de informatie van de LCO via de waterschappen naar de Veiligheidsregio's. De waterschappen en Veiligheidsregio's stemmen gezamenlijk de te nemen maatregelen af.

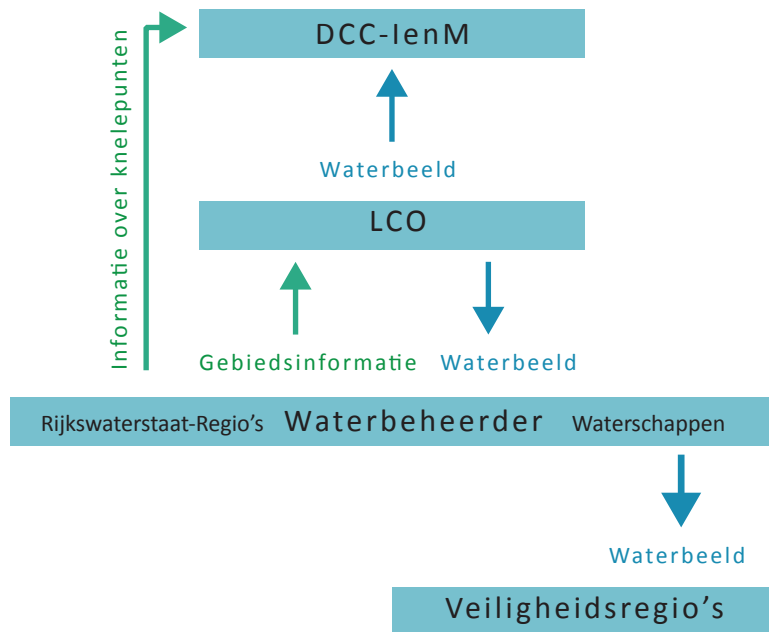
Omdat overstromingen zich niet houden aan de grenzen van waterschappen, rijkswaterstaatregio's, veiligheidsregio's of dijkringen, kan het gebeuren dat:

- Vanuit hetzelfde waterschap meerdere liaisons bij verschillende veiligheidsregio's aan tafel zitten;
- Dat een veiligheidsregio met meerdere waterschaps-liaisons van verschillende waterschappen aan tafel zit;
- Dat meerdere veiligheidsregio's ook onderling evacuatieplannen met elkaar moeten afstemmen om te voorkomen dat ze elkaar hinderen.

De commissaris van de koning heeft vanuit de provincie de rol om de samenwerking tussen waterschap en veiligheidsregio's rondom de crisisbeheersing te bevorderen (Wet Veiligheidsregio's, 2010).

2.6 Coördinatiecentrum Crisisbeheersing-min.I&M

Bij een landelijke overstromingsdreiging wordt ook het Departementaal Coördinatiecentrum Crisisbeheersing van het ministerie van Infrastructuur en Milieu (DCC-IenM) actief. Zij adviseren de directeur-generaal van Rijkswaterstaat en vormen de verbinding tussen het ministerie en de regio's. Ook kan DCC-IenM ingrijpen om te voorkomen dat bijvoorbeeld door tegenstrijdige belangen de verkeerde of géén besluiten genomen worden. Uiteraard laten zij zich wel adviseren door de hiervoor genoemde crisispartners, maar wanneer de nood hoog is, kan het gebeuren dat er geen tijd meer is voor een uitgebreid inhoudelijk advies (Rob Hagman, hoofd DCC-IenM, persoonlijke communicatie, 29 januari 2016).



figuur 2-5: Uitwisseling van Waterbeeld tussen de crisispartners o.b.v. Landelijk Draaiboek Hoogwater en Overstromingen (SMWO, 2015)

2.7 Inzicht in de verwachte situatie

Voor zowel het nemen van watersysteemmaatregelen als het organiseren van een evacuatie is het nodig om een beeld te hebben van de omvang van de overstroming. De LCO gebruikt voor het opstellen van deze verwachte situatie een database met overstromingsscenario's: de LIWO-database (Rijkswaterstaat, 2016)². Deze database bestaat uit verschillende van tevoren uitgerekende overstromingen voor een groot aantal locaties langs alle primaire waterkeringen (zie figuur 2-6). Voor iedere locatie is met drie verschillende buitenwaterstanden uitgerekend hoe het achterland overstroomt³. Deze database vormt de basis voor het opstellen van het in paragraaf 2.3 genoemde dreigingsbeeld, als onderdeel van het waterbeeld.

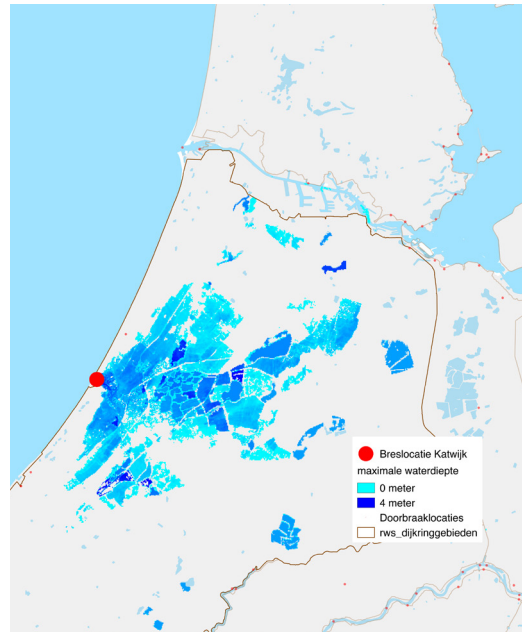
Wanneer meerdere keringen tegelijkertijd (dreigen) door (te) breken, worden de resultaten van verschillende scenario's gecombineerd. Wanneer de gevolgen van meerdere scenario's elkaar overlappen, wordt de grootste waterdiepte van deze scenario's genomen (Durk

² De scenario's die hiervoor gebruikt worden zijn ontwikkeld voor het Project Veiligheid Nederland, welke als doel had overstromingsrisico's van alle dijkkringen in Nederland in kaart te brengen (VNK, 2014). Deze scenario's zijn nu ondergebracht in het Landelijk Informatiesysteem Water en Overstromingen (LIWO)

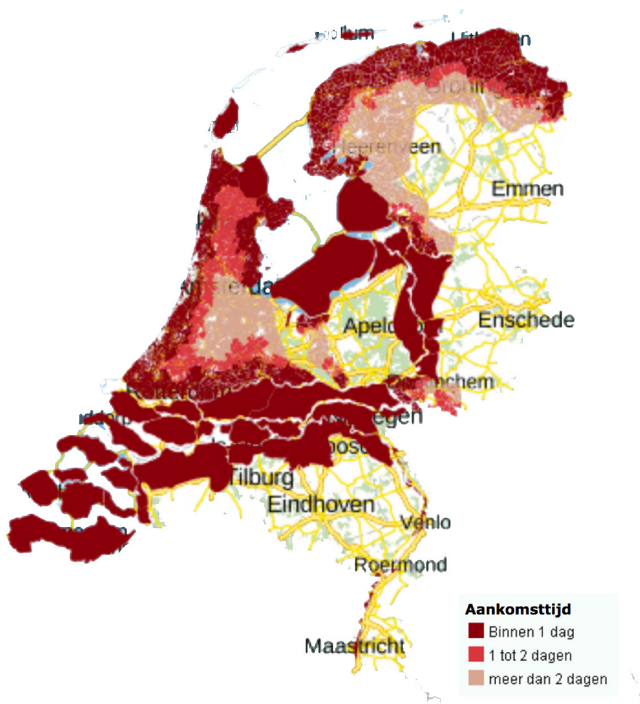
³ Beneden maatgevend scenario (TP-1D), maatgevend scenario (TP), boven maatgevend scenario (TP +1D) en extreem scenario (TP+2D). Waarbij TP, staat voor toetspeil en D voor decimeringhoogte (VNK, 2014).



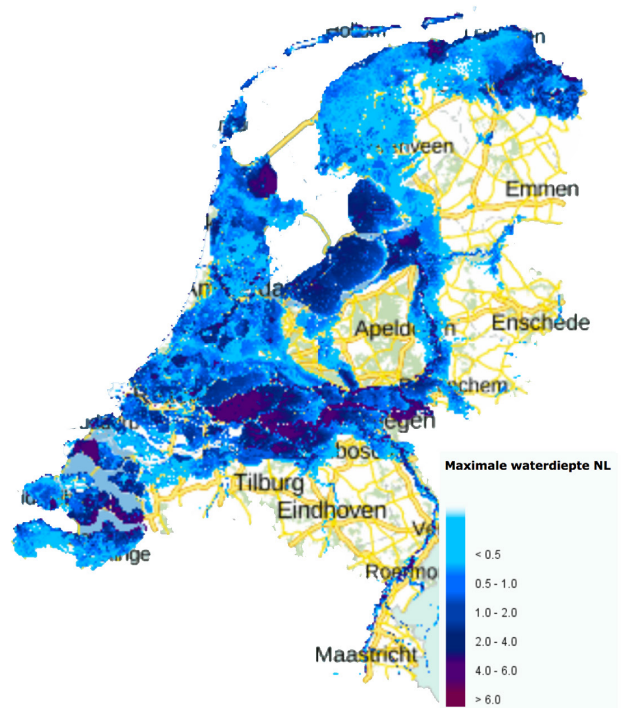
figuur 2-6: Breslocaties overstromingsscenario's (o.b.v shapefile LIWO database)



figuur 2-7: Maximale waterdiepte breslocatie Katwijk bij Extrem scenario (TP+2D), LIWO database (RWS, 2016)



figuur 2-8: aankomsttijdenkaart o.b.v. alle overstromingsscenario's samen (Rijkswaterstaat 2016))



figuur 2-9: maximale waterdieptekaart o.b.v. alle overstromingsscenario's

Riedstra, LCO Rijkswaterstaat, persoonlijke communicatie 19 september 2015). Voor de aankomsttijden van het water is in de database een aankomsttijdenkaart opgenomen figuur 2-8 en figuur 2-9. Deze kaarten zijn samengesteld uit de resultaten van alle verschillende scenario's, waarbij voor elke locatie de snelste aankomsttijd van alle scenario's is overgenomen. Bij de aankomsttijdenkaart wordt nadrukkelijk vermeld dat de actuele situatie hier altijd van zal afwijken. (LIWO, Rijkswaterstaat 2016)

De bruikbaarheid van deze losse scenario's is beperkt. Het verloop van een overstroming als gevolg van meerdere bressen kan namelijk eigenlijk niet gecreëerd worden door de resultaten van losse scenario's te combineren. Dit komt omdat het bij verschillende bressen naar binnenstromende water elkaar beïnvloedt. Zo stroomde in 1953 het water dat via een bres aan de zuidkant van Goeree-Overflakkee naar binnen stroomde (polder Klinkerland, Sielingkanaal) en via een andere bres aan de noordkant van Goeree-Overflakkee weer uit (het gat van Den Bommel). Dit werd veroorzaakt door het tijdsverschil tussen hoogwater aan de zuid- en noordkant (Hage, 2015; Rijkswaterstaat, 1961; Slager, 2009). Van de afzonderlijke scenario's voor elke locatie de maximale waterstand overnemen, geeft dan een overschatting van de eindsituatie. Daarnaast hangt het daadwerkelijke overstromingsverloop af van:

- Het verloop van de actuele buitenwaterstand vanaf het tijdstip dat een bres start;
- Het verschil in tijd waarop de bressen ten opzichte van elkaar breken;
- De snelheid waarmee de bres groeit;
- Of er eventueel al water aanwezig is in het te overstromen land achter de bres.

Al deze aspecten beïnvloeden elkaar in meer of mindere mate. Omdat van tevoren (bijna) nooit bekend is waar, wanneer en hoe snel een waterkering breekt, kan met de bestaande database het daadwerkelijke verloop van een grootschalige overstroming met meerdere bressen niet worden geschetst. De LCO kan met deze database alleen een grof en onzeker beeld van de eindsituatie in het waterbeeld opnemen. Het is dan ook maar de vraag of de veiligheidsregio's hier wel wat aan hebben en of ze niet misschien met deze informatie niet per ongeluk de verkeerde beslissing nemen.

2.8 Ondersteuning door een overstromingsmodel

Het onderwerp van deze thesis is het ontwikkelen van een snel model dat de crisispartners beter bedient: een model dat in korte tijd het verloop van een overstroming kan berekenen op basis van de actuele doorbraaklocaties, het daadwerkelijke tijdstip waarop de verschillende doorbraken plaatsvinden en op basis van de voorspelde buitenwaterstanden in de uren die gaan volgen.

In dit afstudeeronderzoek wordt ervan uitgegaan dat de crisispartners voor het nemen van efficiënte maatregelen gebaat zijn bij realistisch inzicht in de tijd die beschikbaar is tot het water komt, de snelheid waarmee het water stijgt en de uiteindelijke waterdiepte. Deze informatie is bijvoorbeeld handig voor de waterschappen om in te kunnen schatten hoeveel middelen ze in de komende uren waar moeten inzetten om een kade tijdelijk op te hogen, of voor de veiligheidsregio's om te anticiperen op het moment waarop de hulpdiensten een bepaalde (snel)weg niet meer kunnen gebruiken.

Niet is onderzocht met welke resolutie van de overstroming in tijd en ruimte de crisispartners In dit onderzoek is niet onderzocht met welke resolutie van de overstroming

in tijd en ruimte de crisispartners hun maatregelen het efficiëntst kunnen nemen. Voor deze studie is voor nu aangenomen dat een resolutie op kruispuntniveau en voorspellingen per 5-minuten voldoende gedetailleerd zijn om verkeerskundigen goed te bedienen met input voor het ontwikkelen van evacuatiestrategieën. (Adam Pel, Transport en Planning, TU Delft, persoonlijke communicatie, 6 januari 2016).

Wat de impact is van het model van deze studie op de huidige procedures die de crisispartners in de afgelopen jaren met elkaar zijn afgesproken, ligt buiten de scope van dit onderzoek. In bijlage II is wel een korte lijst van vragen opgesteld, die de crisispartners mogelijk hebben rondom een overstroming en waarbij modelresultaten het antwoord zouden kunnen geven.



figuur 2.9: Alle doorbraaklocaties van de watersnoodramp 1953
(O.A.C. Hoes, persoonlijke communicatie, 17 juni 2016)

3. HET MODELLEREN VAN OVERSTROMINGEN



3.1 Algemeen

Voor het simuleren van ‘het stromen van water’ bestaan een groot aantal modellen. De verschillen in modellen worden veroorzaakt door het doel van de studie waarvoor het model wordt ingezet. Voor eenvoudige vragen is een eenvoudig model vaak voldoende. Terwijl voor een complexe vraag een groot aantal (subjectieve) keuzes gemaakt moeten worden over welke fysische procesessen wel en niet meegenomen moeten worden. Om de complexiteit van verschillende overstromingsmodellen te kunnen begrijpen is kennis nodig van vloeistofmechanica en de zogenaamde ondiep-water-vergelijkingen. In dit hoofdstuk is de benodigde kennis voor het waarden van een landelijk model stapsgewijs uitgewerkt.

3.2 Ondiep-water-vergelijkingen

Een overstroming is het stromen van gebiedsvreemd water over een voorheen droog stuk land. Wanneer dit gebeurt na het breken van een dijk zal een relatief ondiepe laag water zich vanuit de bres over het land verspreiden. Om een overstroming te simuleren moet deze beweging van water over land worden gemodelleerd.

Stroming van ondiep water kan worden omschreven aan de hand van de ondiep-water-vergelijkingen, ook wel de Saint-Venant (1871) vergelijkingen genoemd, welke zijn afgeleid van de Navier-Stokes vergelijkingen. Ze worden de ondiep-water-vergelijkingen genoemd, omdat ze geldig zijn wanneer de diepte klein is ten opzichte van de lengte van de golf. Dit is het geval bij kustzeeën, estuaria, meren, rivieren en kanalen, waarbij kan worden aangenomen dat de stroming dieptegemiddeld is. Dit betekent dat de stroming en versnelling in verticale richting te verwaarlozen is ten opzichte van de horizontale richting en daarom kan de hydrostatische drukverdeling in verticale richting als constant worden benaderd. Bij een overstroming is er – behalve direct in de bres – ook sprake van een diepte gemiddelde stroming en daarom zijn de ondiep-water-vergelijkingen ook geschikt voor overstromingsberekeningen (Hervouet, 1996).

De ondiep-water-vergelijkingen bestaan uit twee behoudswetten: behoud van massa en behoud van impuls. Behoud van massa betekent dat de hoeveelheid water in een gebied niet verandert als de hoeveelheid water dat dit gebied instroomt gelijk is aan de hoeveelheid water dat dit gebied uitstroomt. Behoud van impuls betekent dat water in een gebied alleen kan bewegen als er een aandrijvende kracht is en de som van alle krachten die op een massa water werken nul is.

De ondiep-water-vergelijkingen in twee horizontale richtingen (x,y) zien er als volgt uit:

$$\text{Behoud van massa: } \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\text{Behoud van impuls: } \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + c_f \frac{u|u|}{h} = 0 \quad (2a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + c_f \frac{v|v|}{h} = 0 \quad (2b)$$

Dit is een set van gekoppelde partiële differentiaalvergelijkingen, met de twee onbekenden waterstand (ζ) en stroomsnelheid (u en v) als functie van tijd (t) en plaats (x, y). Hierbij is u de stroomsnelheid in de x-richting en v in de y-richting. Verder is c_f de bodemweerstand en g de zwaartekrachtversnelling. h is de waterdiepte, die voortkomt uit het absolute verschil tussen de waterstand (ζ) en bodemhoogte (z) ten op zichten van referentieniveau (bijvoorbeeld N.A.P.) ($\zeta=h+z$).

Vergelijking 1 bestaat uit de termen:

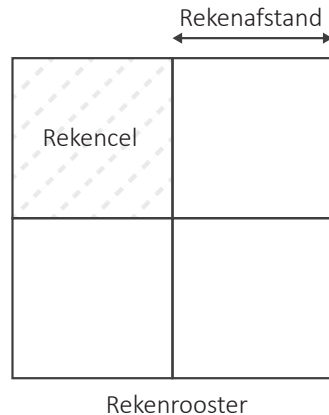
- Verandering van de waterstand;
- Verandering van het debiet in x-richting;
- Verandering van het debiet in de y-richting.

De tweede vergelijking bestaat voor beide richtingen (x en y) uit de volgende termen:

- Lokale traagheid;
- Advectie ('voortstuwende kracht') in x-richting;
- Advectie in y-richting;
- Zwaartekracht gradiënt;
- Weerstand van de bodem.

Naast deze termen speelt bij overstromingen ook nog windopzet een rol en bij hele grote hoeveelheden water het draaien van de aarde (het Coriolis-effect).

De ondiep-water-vergelijkingen zijn twee gekoppelde partiële differentiaalvergelijkingen (twee onbekenden en afhankelijk van plaats, tijd en eigen verandering) en kunnen daarom alleen numeriek worden opgelost. Om dat te kunnen doen, worden de vergelijkingen gediscretiseerd in ruimte en tijd. Discretisatie in ruimte is het in twee richtingen in stukjes opdelen van het horizontale vlak, waardoor een (reken)rooster ontstaat. Hierbij is de lengte van ieder stukje de rekenafstand (zie figuur 3-1). In iedere cel wordt met de ondiep-water-vergelijkingen een waterstand berekend en tussen de verschillende cellen een stroomsnelheid. De discretisatie in tijd geeft de rekestijdstap, wat bepaald met welk tijdsinterval de vergelijkingen worden opgelost. De temporele en ruimtelijke resolutie van de discretisatie (rekenafstand en rekestijdstap) bepalen samen met de numerieke methode de nauwkeurigheid, snelheid en stabiliteit van de berekening (Zijlema, 2012; Savage, et al., 2016; Ramirez, et al., 2016; Domeneghetti, 2016).



figuur 3-1: Schematisatie rekenrooster, voor het oplossen van de 2D ondiep-water-vergelijkingen

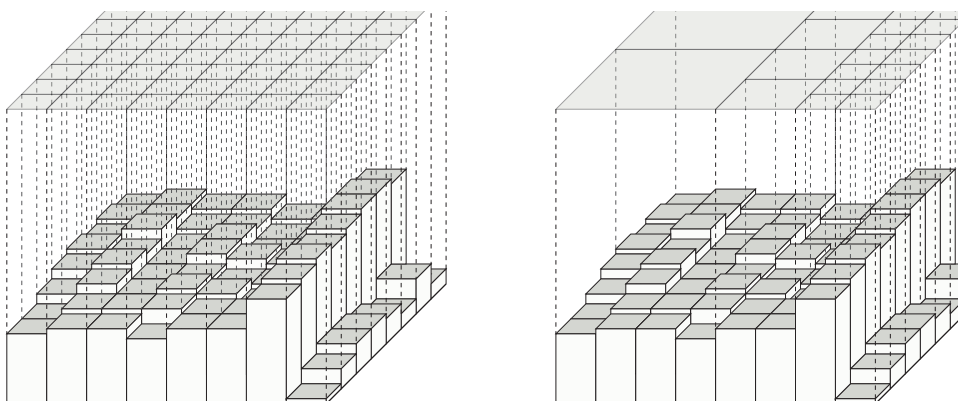
In dit onderzoek wordt niet ingegaan op de verschillende numerieke methodes. Het is echter wel van belang om te begrijpen dat er een relatie is tussen rekenafstand en rekentijdstap met de nauwkeurigheid en snelheid van een berekening. In het algemeen geldt dat een fijnere ruimtelijke resolutie (fijnere rekenrooster/kleine rekenafstand) om een kleinere rekentijdstap vraagt en daarmee de rekentijd snel toeneemt (Chatterjee, et al. 2008). Daarom wordt rondom overstromingen altijd gewerkt met van tevoren berekende overstromingsscenario's; puur en alleen omdat het uitrekenen van een overstroming te veel tijd kost. Ter illustratie: een berekening van een overstroming van 24 uur in de Wieringermeerpolder met een ruimtelijke resolutie van 25 meter, zoals in de LIWO-database van het WMCN in Lelystad (gebruikmakend van SOBEK), vergt een rekentijd van ongeveer 24 uur. (Klingen, et al., 2011). Het ad-hoc nauwkeurig uitvoeren van een berekening met meerdere bressen en het actuele getij kost dus zoveel tijd, dat de informatie voor de crisispartners te laat komt.

3.3 Quadtree-subgrid rekenmethode

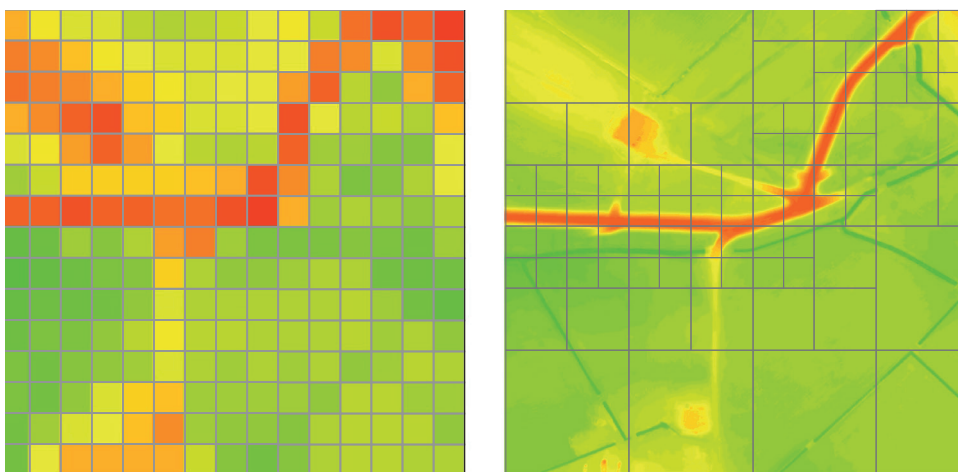
Binnen het vakgebied vloeistofmechanica is één van de richtingen waarin veel onderzoek plaatsvindt het snel en nauwkeurig oplossen van de ondiep-water-vergelijkingen (Abily, et al., 2016; Juez, et al., 2016; Liang, et al., 2016; Vacondio, et al. 2016; Stelling en Duinmeijer, 2003). In 2009 hebben Vincenzo Casulli en Guus Stelling een rekenmethode ontwikkeld die veel sneller is dan de tot dan toe gebruikelijke methodes (Casulli, 2009; Casulli en Stelling, 2011; Stelling, 2012). Het belangrijkste verschil is dat de ruimtelijke resolutie van het rekenrooster nu is losgetrokken van de ruimtelijke resolutie van de digitale hoogtekartaart. Voorheen werd voor iedere cel van de digitale hoogtekartaart de ondiep-water-vergelijkingen opgelost (zie figuur 3-2), met bijvoorbeeld programma's zoals SOBEK of Delft3D^[4].

Naast dit splitsen van rekenrooster en hoogtekartaart wordt door Casulli en Stelling ook gevarieerd met dit rekenrooster. Waarmee wordt bedoeld dat dit rooster niet uniform over het x-y vlak is verdeeld. Zo wordt op plekken waar weinig verschil in bodemhoogte is, ook slechts kleine verschillen in waterdieptes verwacht. Hier wordt dan ook met grotere cellen

4 SOBEK en Delft3D zijn softwarepakketten van Deltares.



figuur 3-2: links de gebruikelijk manier van het berekenen van een overstroming. Rechts de Quadtree-subgrid rekenmethode van Casulli en Stelling



figuur 3-3: Links homogeen rooster, rechts subgrid-quadtree rooster

gerekend. En vice versa, wordt op plekken waar veel verschillen in bodemhoogte is met kleinere cellen gerekend. Hierdoor hoeven de ondiep-water-vergelijkingen minder vaak te worden opgelost - wat rekentijd scheelt - zonder dat er detail verloren gaat.

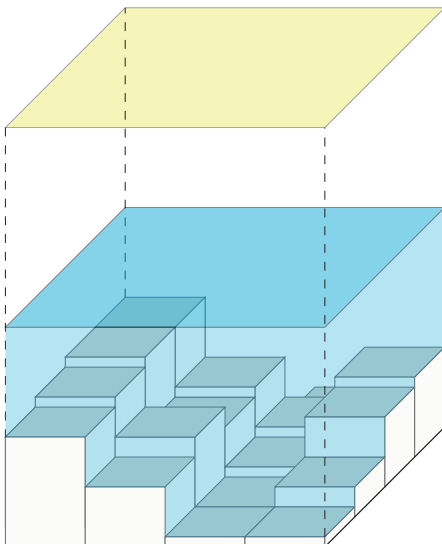
Hoe dit zich vertaalt naar een echt gebied is schematisch weergegeven in figuur 3-32. Links een homogeen rekenrooster waarbij voor elke cel van de hoogtekaart een waterdiepte wordt berekend. Rechts het rekenrooster van Casulli en Stelling, waarbij het rekenrooster waarop de waterdieptes worden berekend (quadtrees) niet meer gelijk is aan de cellen van de hoogtekaart (subgrid). Het linker rooster bestaat uit 64 cellen en het rechter rooster uit 22 cellen, waardoor de ondiep-water-vergelijking dus minder vaak hoeven te worden opgelost en de berekening sneller is.

Door dezelfde techniek kan de resolutie van de hoogtekaart ook worden verfijnd zonder dat dit extra rekencellen oplevert. Het aantal subgrid-cellen (cellen van de hoogtekaart) binnen de kleinste quadtree-cel (de cel waarvoor een waterstand wordt berekend) is namelijk niet gelimiteerd. Binnen een quadtree-cel is dan de waterstand overal gelijk, maar de waterdiepte niet. De waterdiepte wordt namelijk per subgrid cel bepaald. In figuur 3.4 is dit gevisualiseerd. De 'rode' dijk met op en afritten is in de rechter figuur met 96 quadtree-cellen beter zichtbaar dan in de linker met 256 cellen, wat invloed zal hebben op het overstromingspatroon. Met de huidige generatie computers kan tot ongeveer 100 000 quadtree cellen en 1 miljard subgrid cellen nog 'snel' gerekend worden. Boven deze aantallen gaat de prestatie van het model achteruit (Stichting 3Di, 2016)

3.4 3Di-instrumentarium en een landelijk model

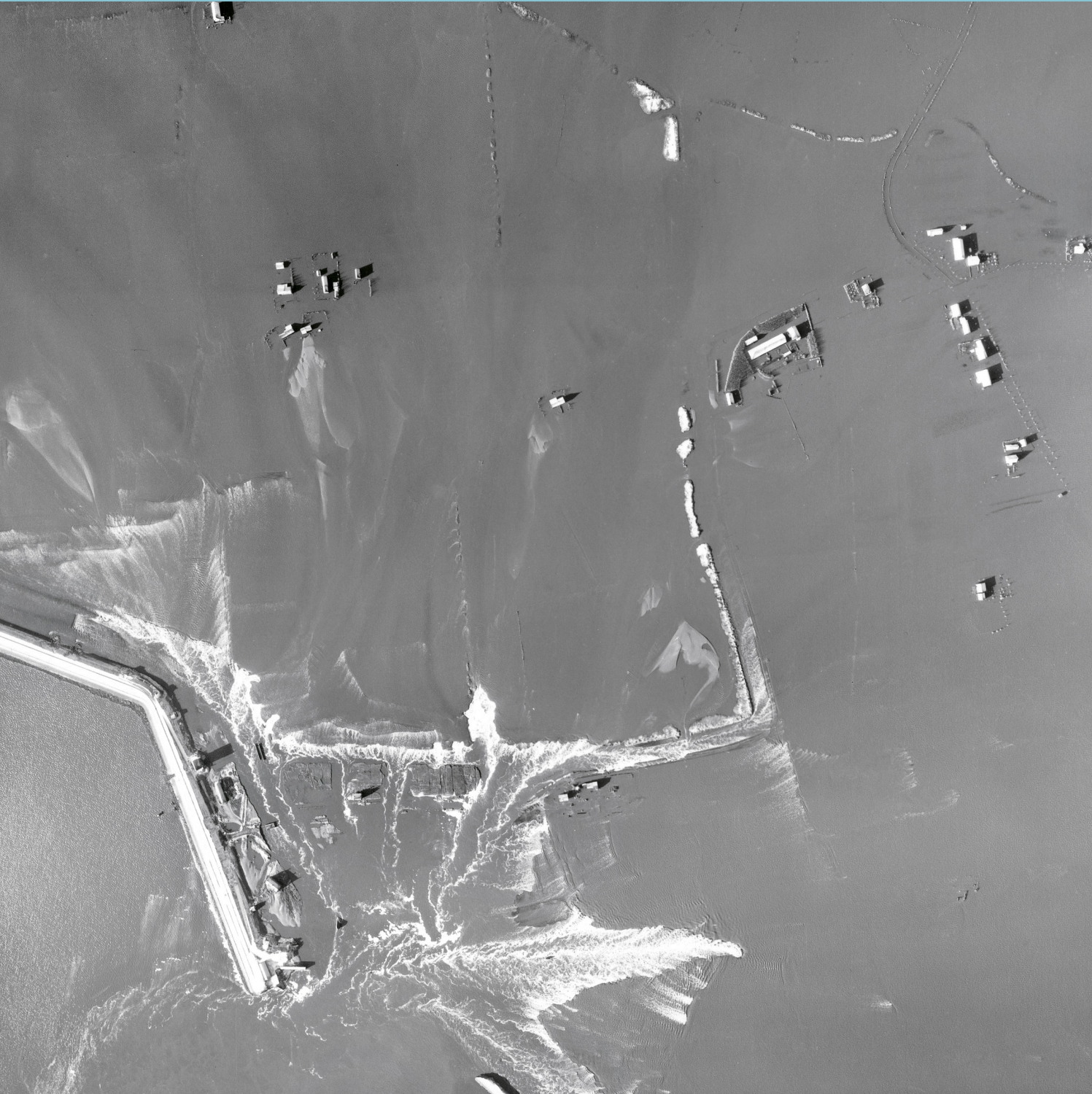
Sinds 2012 wordt de quadtree-subgrid rekenmethode van Casulli en Stelling uit de vorige paragraaf verder ontwikkeld door het 3Di - consortium bestaande uit Stelling Hydraulics, Deltares, Nelen en Schuurmans en TU Delft. Het doel van dit samenwerkingsverband is om de rekenmethode bruikbaar te maken tot een snel instrument dat niet alleen door hydrologen, maar ook door bestuurders gebruikt kan worden. De verwachting is dat ook bestuurders in de toekomst vaker gebruik gaan maken van modellen (Leskens, et al, 2014). Ten tijde van het schrijven van dit rapport (2016) is 3Di nog steeds volop in ontwikkeling. In de afgelopen jaren is gewerkt aan het kunnen toevoegen van 1D elementen aan een 2D berekening, zoals voor watergangen en riolering. Er vindt hierbij uitwisseling plaats tussen de 1D- en 2D-elementen in de continuïteitsvergelijking.

Bij een landelijk overstromingsmodel ter ondersteuning van de crisispartners staat de rekensnelheid voorop. Het ligt dan ook voor de hand om het model voor deze studie met 3Di te bouwen. Met de huidige versie van 3Di zijn tot nu toe alleen kleine modellen gemaakt en nog geen model met een oppervlak zo groot als Nederland. De uitdaging bij het maken van een landelijk model is om voldoende detail te behouden (kruispuntniveau) en tegelijkertijd de gewenste rekensnelheid te halen (maximaal in 20 minuten een overstroming van 24 uur uitrekenen).



figuur 3.4: Rekenel met 1 waterstand en variërende waterdieptes. Het doorstroomprofiel wordt bepaald door de hoogte van de subgridcellen aan de rand van de rekenel (gearceerde vlak).

4. ELEMENTEN VAN EEN OVERSTROMINGSMODEL



4.1 Algemeen

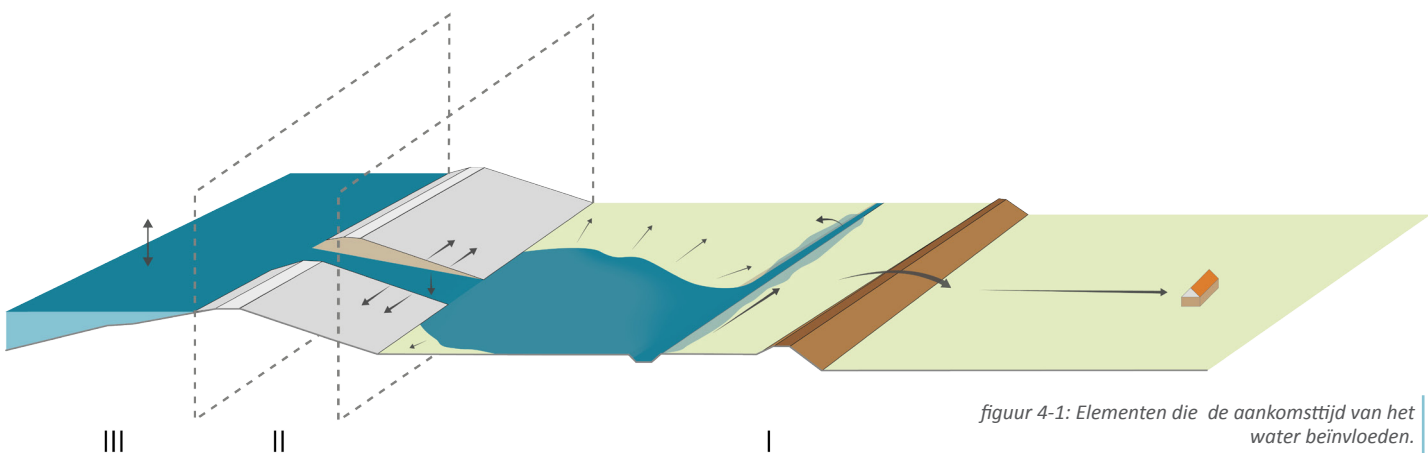
Het verloop van een overstroming wordt sterk bepaald door de buitenwaterstand, de karakteristieken (locatie, tijdstip en groei) van de dijkdoorbraak en landschapselementen die het naar binnen kolkende water tegen komt; dijken, watergangen, (spoor)weglichamen, mate van begroeiing, hoogte en oriëntatie van bebouwing etc. Daarom is het belangrijk om naast het snel en zorgvuldig oplossen van de ondiep-water-vergelijkingen bij het bouwen van een model die elementen te schematiseren die de overstroming beïnvloeden.

Tot welk detailniveau de elementen geschematiseerd moeten worden wanneer een model voor een heel land gemaakt wordt, hangt af van de gewenste output van het model (Cea en Rodriguez, 2016; Abily, et al., 2016). Het is verleidelijk om 'aan de veilige kant' zoveel mogelijk mee te nemen, maar als dit elementen zijn die minder of niet belangrijk zijn kost het verzamelen van deze gegevens energie en het doorrekenen van een scenario extra rekentijd. Voor een landelijk overstromingsmodel, dat tijdens een calamiteit op kruispuntniveau het verloop van een overstroming kan berekenen, is het belangrijk vooral elementen mee te nemen die de aankomsttijd van het water beïnvloeden.

In dit hoofdstuk worden deze elementen beschreven en getest op de schaal van een proefpolder. Het doel is om de invloed van het wel of niet meenemen van deze elementen op de aankomsttijd van het water te toetsen. De invloed van de volgende elementen worden elk afzonderlijk getest:

- I. Landschapselementen;
- II. Dijkdoorbraak;
- III. Buitenwaterstand.

Om dit te kunnen doen wordt één element gevarieerd, terwijl de andere twee constant worden gehouden.



figuur 4-1: Elementen die de aankomsttijd van het water beïnvloeden.

4.2 Opzet proefpolder

De proefpolder is een eenvoudig rechthoekig gebied van zes kilometer lang en vier kilometer breed. Het maaiveld in de polder is horizontaal en vlak. Daarnaast is het een geïsoleerd systeem waar het water enkel via een bres aan de westzijde in of uit kan. Het water buiten de polder bestaat uit een oneindige voorraad water met een constante waterstand, waardoor de buitenwaterstand geen restrictie vormt voor het vollopen van de polder. In de polder staat maar één gebouw; op vijf kilometer vanaf de bres staat een 'boerderij'. Deze locatie is het meetpunt waar de aankomsttijd en stijgsnelheid van het water worden gemeten. Door deze eenvoudige opzet is het effect van het toevoegen van een element of het variëren van een parameter direct merkbaar c.q. eenvoudig te vergelijken.

4.3 Verspreiding van water over het landschap

Procesbeschrijving water over het landschap

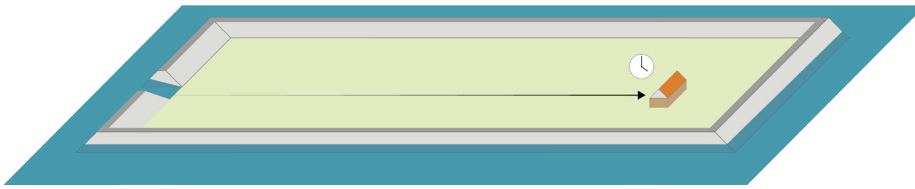
Onder 'verspreiding over het landschap', wordt het uitwaaiëren van het water door het landschap vanaf de dijkdoorbraaklocatie verstaan. In en nabij de bres zijn de stroomsnelheden hoog, maar doordat het water zich radiaal verdeeld worden de stroomsnelheden snel kleiner. Meestal lopen bij een overstroming dan ook vooral de gebouwen nabij de bres schade op, doordat het naar binnenstromende water door de snelheid veel kracht heeft. Schade bij gebouwen verder weg is meestal het gevolg van de wind die tegen de muren slaat, waar het metselwerk niet tegen bestand is (Hoes, 2011).

De aankomsttijd van het water bij de boerderij in onze proefpolder wordt bepaald door de stroomsnelheid van het water, welke weer afhangt van de begroeiing, watergangen in het gebied en eventueel secundaire keringen. Hiervan wordt het effect op de aankomsttijd in deze paragraaf onderzocht.

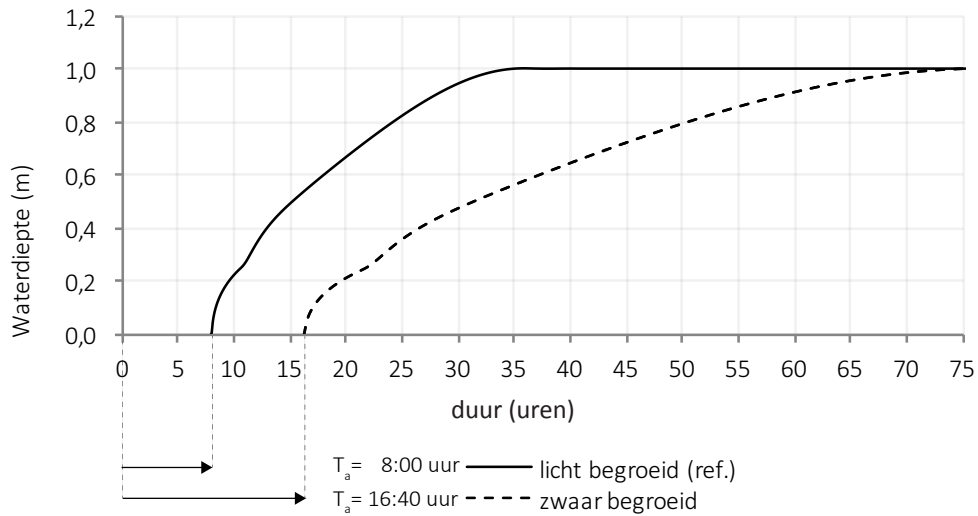
Testberekening 1 begroeiing

In de eerste test met de proefpolder wordt gevarieerd met de begroeiing in de polder. De mate van begroeiing is in de ondiep-water-vergelijkingen (paragraaf 3.2) terug te vinden in de 5e term van de wet van behoud van impuls, middels de bodemwrijving. Door veel vegetatie wordt het lastiger voor het water om zich over het landschap te verspreiden. Voor zware begroeiing is een Manning-waarde van $0.058 [s/m^{2/3}]$ en voor lichte begroeiing een waarde van $0.035 [s/m^{2/3}]$ aangehouden (Chow, 1959). In figuur 4-3 is te zien dat het water bij lichte begroeiing er 8 uur over doet om 5 kilometer af te leggen, wat ongeveer 600 meter per uur is. Bij het zwaar begroeid duurt dit 16:40 uur, wat ongeveer 300 meter per uur is. De waterstand stijgt bij beide scenario's totdat de waterstand in de polder gelijk is aan de buitenwaterstand (1 meter), waardoor er geen water meer door de bres stroomt. Bij lichte begroeiing wordt dit punt na ongeveer 22 uur bereikt en bij bos ongeveer na 60 uur.

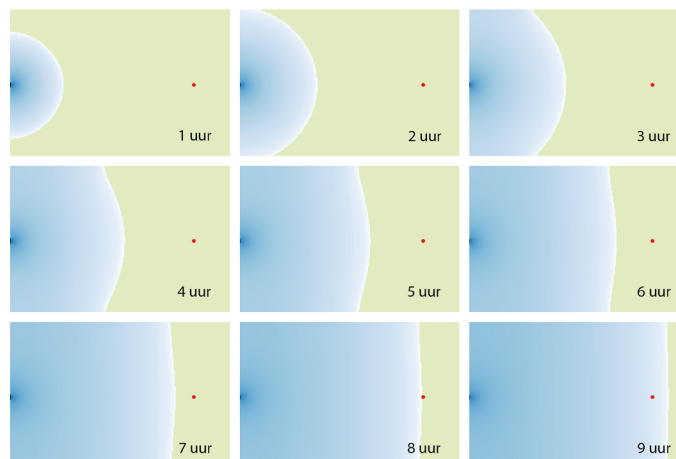
In figuur 4-5 staat een kaart van Nederland met de mate van begroeiing. Hierop is te zien dat Nederland voornamelijk uit lichte begroeiing bestaat en veel minder uit zware begroeiing. Een overschatting van de begroeiing zou dus kunnen leiden tot een overschatting van de beschikbare evacuatie tijd.



figuur 4-2: De proefpolder



figuur 4-3: Aankomsttijd en stijgsnelheid van het water bij de 'boerderij' in de proefpolder met lichte begroeiing en zware begroeiing. De kleine discontinuïteit in de snelheid waarmee het water stijgt op 3 uur nadat het de boerderij heeft bereikt treedt op doordat golf het einde van de polder heeft bereikt en het water vanaf dat moment nagenoeg niet meer stroomt en alleen nog stijgt.



figuur 4.4: Verspreiding van het water op verschillende tijdstippen in de proefpolder bij lichte begroeiing.



figuur 4-5: Landgebruik is overwegend gras of landbouw (o.b.n lgn6 (Alterra, 2007/2008))

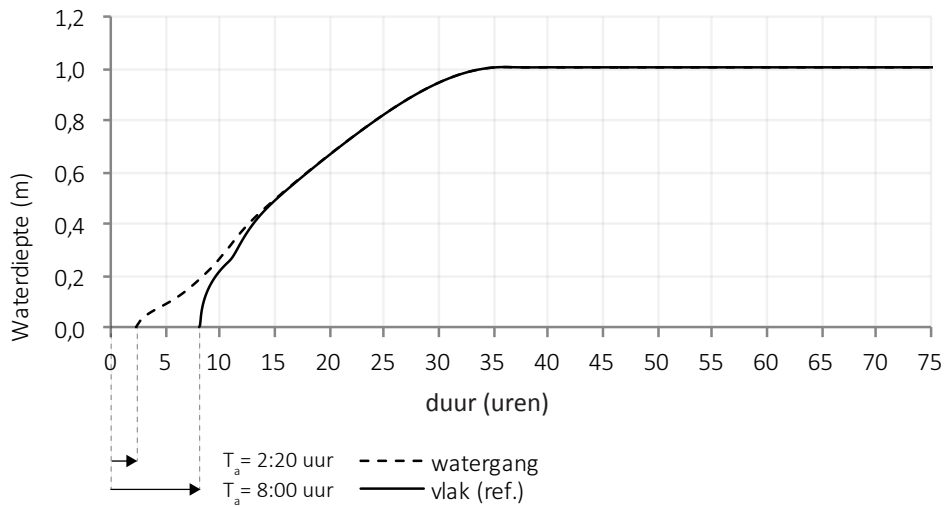
Testberekening 2 watergangen

In de tweede test met de proefpolder is de invloed van watergangen tijdens een overstrooming onderzocht. Hiervoor is in de proefpolder een watergang geschematiseerd van 50 meter breed en 2 meter diep. Wanneer een zich over het landschap voortplantende golf het oppervlaktewater bereikt, vervalt de relatieve bodemweerstandterm en stroomt het water als een lange golf over het water met een snelheid: $c = \sqrt{gd} = \sqrt{(9.81 \cdot 2)} = 4.4 \text{ m/s} = 16 \text{ km/uur}$.

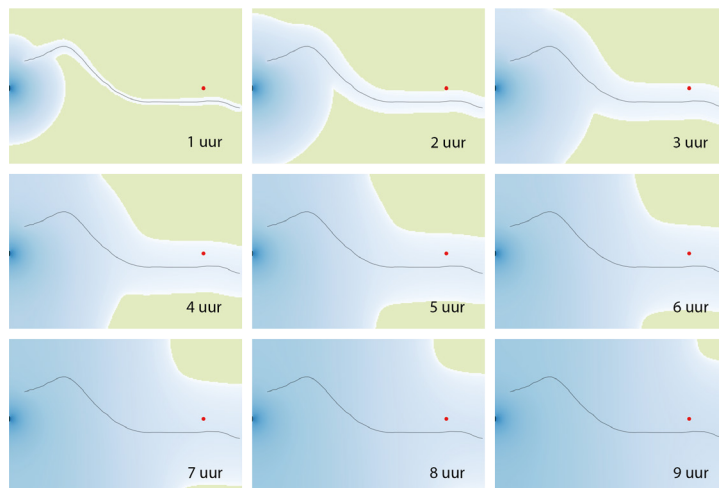
Dit is aanzienlijk sneller dan de in de vorige test reeds bepaalde 600 meter per uur over land. Een netwerk van watergangen in het landschap is dus van invloed op de aankomsttijd. In figuur 4-6 is te zien hoe een enkele watergang de aankomsttijd op de boerderij verandert (van 8 uur naar 2 uur en 20 minuten). figuur 4-7 laat het overstroomingspatroon zien, wanneer zich een watergang in de polder bevindt. Het water verspreidt zich snel door de

watergang naar achteren en inundeert vanuit de watergang het naastgelegen land.

In figuur 4-8 is een kaart van Nederland met al het oppervlakte water breder dan 6 meter opgenomen. Verwaarlozing van de invloed van dit water heeft dus consequenties op het realistisch berekenen van de aankomsttijd van het water bij een overstroming. Een netwerk met de grotere watergangen - met de juiste afmetingen voor de dwarsprofielen - dient dus in een model voor heel Nederland te worden opgenomen.



figuur 4-6: Aankomsttijd en stijgsnelheid van het water bij de 'boerderij' in de proefpolder met en zonder watergang dwars door de polder.



figuur 4-7: Verspreiding van water door de polder met watergang. Het water verspreidt zich vanuit de watergang door de polder.



figuur 4-8: Watergangen in Nederland breder dan 6 meter(top10 vector, kadaster)

Testberekening 3 secundaire keringen

In de derde test met de proefpolder is de invloed is van keringen/weglichamen in het landschap tijdens een overstroming onderzocht. Uiteraard is de functie van waterkeringen het (tijdelijk) keren van water. Zij zorgen voor het voorkomen van of vertragen het volstromen van de proefpolder.

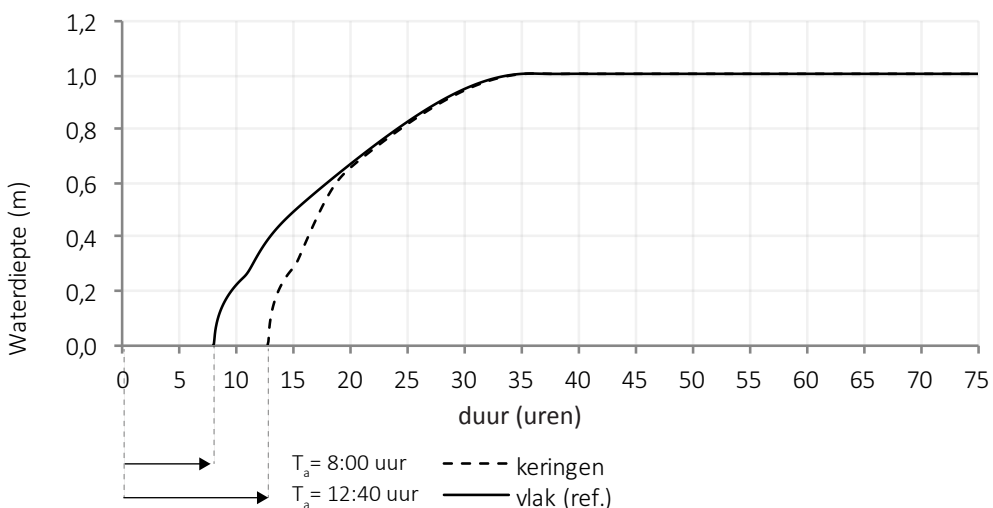
Wanneer de buitenwaterstand hoger is dan de bovenkant van de kering stroomt op een gegeven moment het water over de kering heen. Dit is geschematiseerd in de proefpolder door een tweede en derde binnendijk in het landschap (zie figuur 4-9). Eerst loopt het eerste deel vol, tot de hoogte van de kering. Daarna het tweede, gevolgd door de derde. De boerderij staat in het derde compartiment. figuur 4-10 toont de waterstand op de boerderij, waar te zien is dat de keringen zorgen voor vertraging, maar áls het water dan komt, stijgt de waterstand wel sneller. Uiteraard is de aankomsttijd (net als bij de watergang uit de vorige paragraaf) afhankelijk van de exacte hoogte en afstand van de secundaire kering ten opzichte van de bres en de boerderij.

Conclusie

De berekeningen met proefpolder geven een indicatie van de invloed van de begroeiing, aanwezigheid van watergangen en secundaire keringen op de aankomsttijd van het water. Uiteraard is in de praktijk de aankomsttijd afhankelijk van de ligging van het gebied dat daadwerkelijk overstroomd. Desalniettemin laat deze testberekening grote verschillen in aankomsttijden en stijgsnelheid zien en is het daarom belangrijk dat eerdergenoemde elementen altijd onderdeel zijn van een overstromingsmodel.



figuur 4-9: Zij-aanzicht polder met secundaire keringen



figuur 4-10: Aankomsttijd en stijgsnelheid van het water met twee secundaire keringen in het landschap. Hoewel niet geschikt voor het volledig tegenhouden van de overstroming, houden zij deze wel enige uren op.

4.4 Dijkdoorbraken

Procesbeschrijving bresgroei

Een overstroming vindt plaats wanneer een of meerdere dijken bezwijken. Voor dit bezwijken bestaan meerdere faalmechanismen, zoals overtopping, overslag en piping. Onderzoek naar faalmechanismen is een belangrijk waterbouwkundig onderwerp voor de dimensionering en toetsing van keringen (TAW, 2001; Michelazzo et al, 2016; Roth en Ludy, 2016), maar voor de overstroming zelf niet relevant. Wel is een overstroming vaak de aanleiding voor onderzoek naar de faalmechanismen:

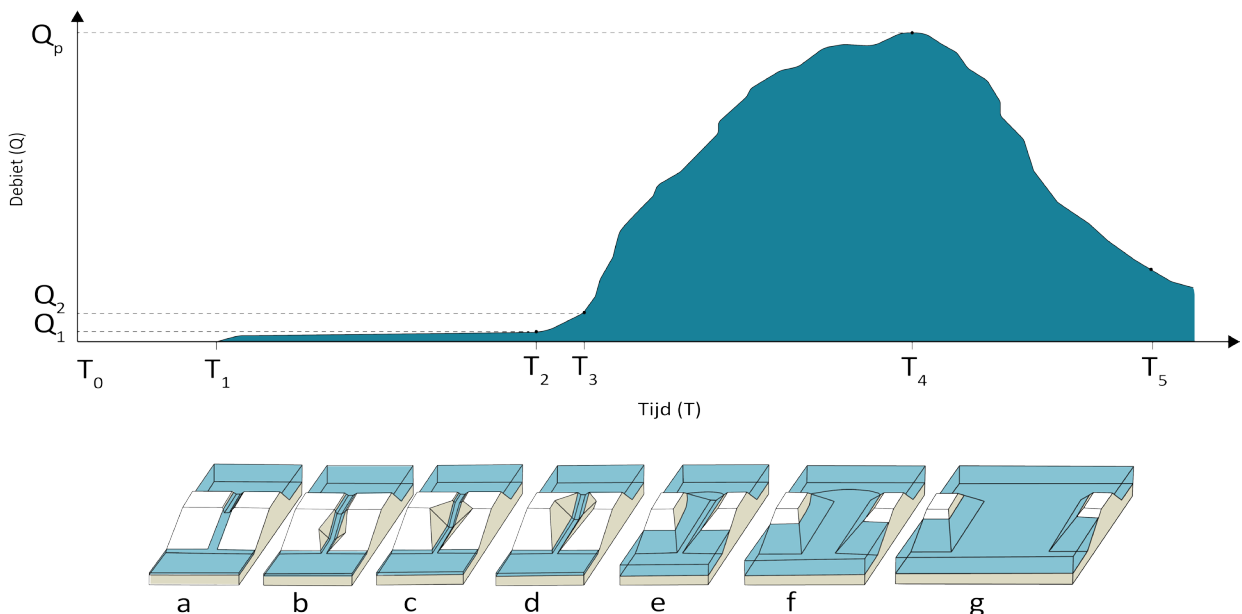
- Zo is na de watersnoodramp van 1953 ontdekt dat veel dijken waren bezweken door overslag in combinatie met een te steil binnentalud. Waardoor de met water verzadigde grasmat van de dijk afschoof en het dijklichaam bloot kwam te liggen (Rijkswaterstaat, 1961);
- De boezemkadebreuk in Oostzaan in 1960 was de aanleiding voor een groot systematisch onderzoek door de Technische Adviescommissie Waterkeringen (TAW) naar de stabiliteit en hoogte van alle boezemkades in Nederland (TAW, 1993);
- De doorbraak bij Wilnis in 2003 heeft het besef doen groeien dat uitgedroogde veenkades te licht kunnen worden en in zijn geheel horizontaal kunnen afschuiven (STOWA, 2004).

Ongeacht het faalmechanisme begint een overstroming pas echt als de initiële fase van een doorbraak een feit is. Met betrekking tot dijkdoorbraken zijn voor dit onderzoek de belangrijke vragen: waar vinden doorbraken plaats, hoe laat vinden die plaats t.o.v. het getij, in welke volgorde t.o.v. andere bressen en hoe snel groeit de bres. Dit zijn aspecten die bepalen hoeveel en hoe snel het water naar binnen stroomt, hoe het zich over het land verspreid en wanneer het water op een willekeurig kruispunt aankomt.

Het tijdstip en de locatie van een dijkdoorbraak zijn nauwelijks van te voren te voorspellen en de groei van de bres is een ingewikkeld proces en afhankelijk van de binnen- en buitenwaterstand, de hydraulische belasting, en het materiaal en toestand van de kering. Een inventarisatie van artikelen over bresgroei laat zien dat bresgroei niet eenduidig is, maar wel te omschrijven aan de hand van verschillende bresgroeifases. (Morris, 2009; Hanson et al., 2005; Walder, et al., 2015, Zhu en Vrijling, 2006; Viseer, 1998; Temple, 2005). Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen cohesieve grond zoals klei (Temple, 2005) en niet-cohesieve materiaal (Visser, 1998). Het belangrijkste verschil tussen deze twee materialen is dat de bresontwikkeling van niet-cohesieve grond via geleidelijke erosie gaat en bij cohesieve grond de erosie meer stapsgewijs in brokken verloopt (Morris, 2009). De praktijk is dat een dijk niet puur bestaat uit homogeen cohesief of niet-cohesief materiaal, maar uit een combinatie van materialen - kern van zand, kleibekleding, grasmat, stortsteen, geo-textiel - wat dit al lastige proces nog ingewikkelder maakt (zie ook bijlage III).

Voor het verloop van de overstroming is het voornamelijk van belang hoeveel water door de bres stroomt. Dit kan worden geïllustreerd aan de hand van het verloop van het debiet door de bres zoals in figuur 4-11 (Morris, 2009). De fasering komt overeen met bresgroeifases zoals deze omschreven zijn voor een zanddijk (Visser, 1997). De vijf fases zijn weergegeven in figuur 4-11 en worden al volgt omschreven:

1. **Eerste erosie aan de teen van het binnentalud:** Bresgroei begint met een klein stroompje water langs het binnentalud. De stroomsnelheid over het talud neemt bij het naar beneden stromen toe. Tegelijk neemt ook de transportcapaciteit van het water voor het opnemen en afvoeren van bodemmateriaal toe. Als gevolg hiervan wordt de helling steiler tot een evenwichtstoestand (maximale helling) wordt bereikt. Deze maximale helling hangt af van de grondsoort (zie figuur a t/m b);
2. **Erosie terug door de dijk:** In fase twee graaft de steile helling zich een weg terug door de dijk: van het binnentalud in de richting van het buitentalud. Zolang de kruin nog enigszins intact is neemt het debiet nauwelijks toe. Hoe lang dit proces duurt, hangt af van de breedte van de dijk, de bekleding van het buitentalud en het materiaal waarvan de dijk gemaakt is. (figuur b t/m d);
3. **Kruin verdwijnt:** In de derde fase neemt het debiet snel toe doordat het laatste stuk kruin verdwijnt. Het gat is groter aan de buitenwaterkant. De stroomsnelheid hangt op dit moment af van het verschil in buiten- en binnenwaterstand (d t/m e);
4. **Verbreiding van de bres:** Vanaf fase vier groeit de bres aanzienlijk sneller, doordat in fase drie de stroomsnelheid is toegenomen. Aan weerszijden van de bres kalft continu dijk materiaal af en wordt meegenomen door het snelstromende water. De dijk is geheel verdwenen op de plek van de bres. Bij een constante buitenwaterstand en stroomsnelheid groeit de bres lineair in de tijd (e t/m f);
5. **Van kritische stroming naar sub-kritisch:** Door het naar binnenstromende water stijgt de waterstand in de polder. Op een zeker moment is de binnenwaterstand zo hoog dat de stroming verandert van kritisch naar sub-kritisch. Bij een binnenwaterstand gelijk aan buitenwaterstand stopt de stroming door het gat (f t/m g).



figuur 4-11: Verloop debiet door bres (Morris, 2009) en bresgroeifases (Visser, 1997)

Voor het modelleren van bresgroei is een mathematische beschrijving nodig. In tot nu toe gepubliceerd onderzoek heeft elke onderzoeker zijn eigen formulering, die past bij de praktijkvoorbeelden die hij of zij kent en het doel van zijn of haar studie (Morris, 2009; Tsakiris en Spiliotis, 2013; Hanson et al., 2005, Morris et al., 2013). De verschillende onderzoekers hebben wel gemeenschappelijk dat zij als basis de lange overlaatformule gebruiken. Hierbij zijn de breedte B en kruinhoogte z geen constante, maar functies die afhangen van bijvoorbeeld de stroomsnelheid, schuifspanning of tijd.

$$\text{Als } (h_2 - z) \geq \frac{2}{3} (h_1 - z), \text{ volkomen overlaat: } Q = C_e \cdot C_w \cdot B \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{2}{3} g} \cdot (h_1 - z)^{3/2}$$

$$\text{Als } (h_2 - z) < \frac{2}{3} (h_1 - z), \text{ onvolkomen overlaat: } Q = C_e \cdot C_w \cdot B \cdot (h_1 - z) \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)}$$

Waarbij:

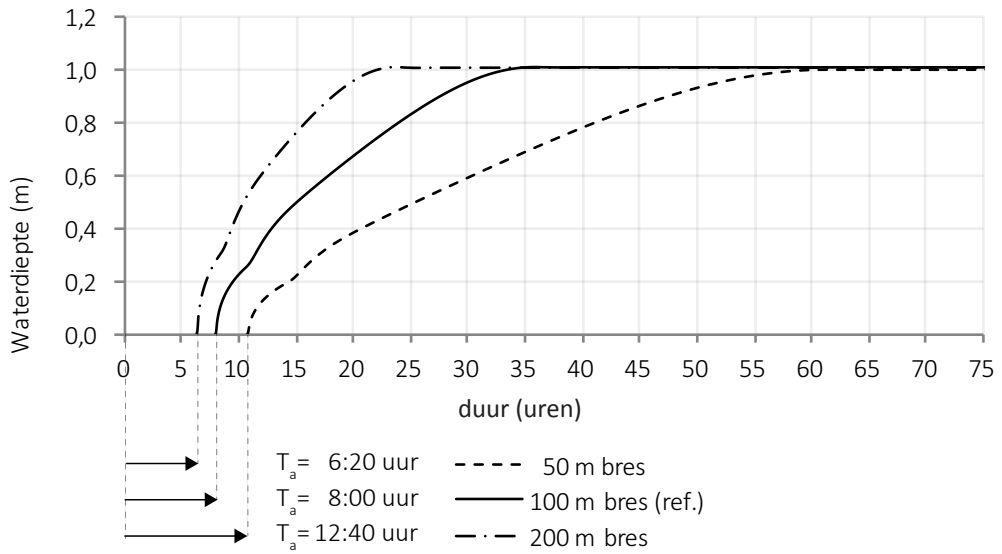
Q	= debiet	(m ³ /s)
C_e	= afvoercoëfficiënt	(-)
C_w	= contractie coëfficiënt	(-)
B	= bresbreedte	(m)
g	= zwaartekrachtversnelling	(m/s ²)
h_1	= bovenstroomse waterstand	(m t.o.v. referentie)
h_2	= benedenstroomse waterstand	(m t.o.v. referentie)
z	= kruinhoogte	(m t.o.v. referentie)

Testberekening 4 bresbreedte

In de vierde test met de proefpolder is de invloed is van verschillende bresbreedtes tijdens een overstroming onderzocht. Achtereenvolgens is een bres van 50, 100 en 200 meter doorgerekend. Een breedte van 100 meter is realistisch voor een overstroming vanuit zee. En komt overeen met de gemiddelde bresbreedte van de Watersnoodramp 1953. Zie bijlage IV voor een samenvatting van alle bressen uit 1953.

figuur 4-12 geeft de waterstand op de boerderij in de proefpolder aan. Uiteraard komt het water eerder aan bij een grotere bres en geeft deze bres een grotere stijgsnelheid. Het is voor een betrouwbaar model dan ook belangrijk dat als ergens een dijk bezwijkt, een goede inschatting gemaakt wordt van hoe snel de bres groeit op basis van de kenmerken van de desbetreffende waterkering en (verwachte) buitenwaterstand op die locatie.

Langs de Nederlandse kust komen een groot aantal waterkeringen voor met verschillende kenmerken. In figuur 4-13 zijn de langs de Noordzeekust gelegen primaire keringen geïnventariseerd: geel zijn de duinen, rood de dijken en zwart de dammen en stormvloedkeringen. De Nederlandse zeedijk is meestal opgebouwd uit een combinatie van zand en klei. In bijlage III staat een dwarsdoorsnede van een typische Nederlandse zeediking (TAW, 1999).



figuur 4-12: Aankomsttijd en stijgsnelheid van het water met drie verschillende bresbreedtes.



figuur 4-13: Verschillende soorten primaire keringen langs de Noordzeekust

4.5 Buitenwaterstand

Procesbeschrijving getijdebeweging

De derde factor waar het verloop van een overstroming en de aankomsttijd van het water vanaf hangt is de buitenwaterstand. De hoogte van het buitenwater bepaalt de snelheid waarmee een bres groeit en het debiet door de bres. De hoogte van de waterstand op zee varieert in tijd en plaats. De beweging van het zeewater is een combinatie van getijdebeweging en windopzet. De getijdebeweging is de verandering van waterstand als gevolg van de aantrekkingskracht van zon en maan. In Nederland is het getij dubbeldaags, wat betekent dat het per omwenteling om de as van de aarde t.o.v. de maan (24 uur en 51 minuten) twee keer hoog en twee keer laag water is. Twee keer per 29.5 dagen (periode van een omwenteling van de maan om de aarde) is het springvloed, doordat de zon, maan en aarde in één lijn staan en de aantrekkingskracht van zon en maan elkaar versterken en daardoor de zeewaterstand extra hoog is.

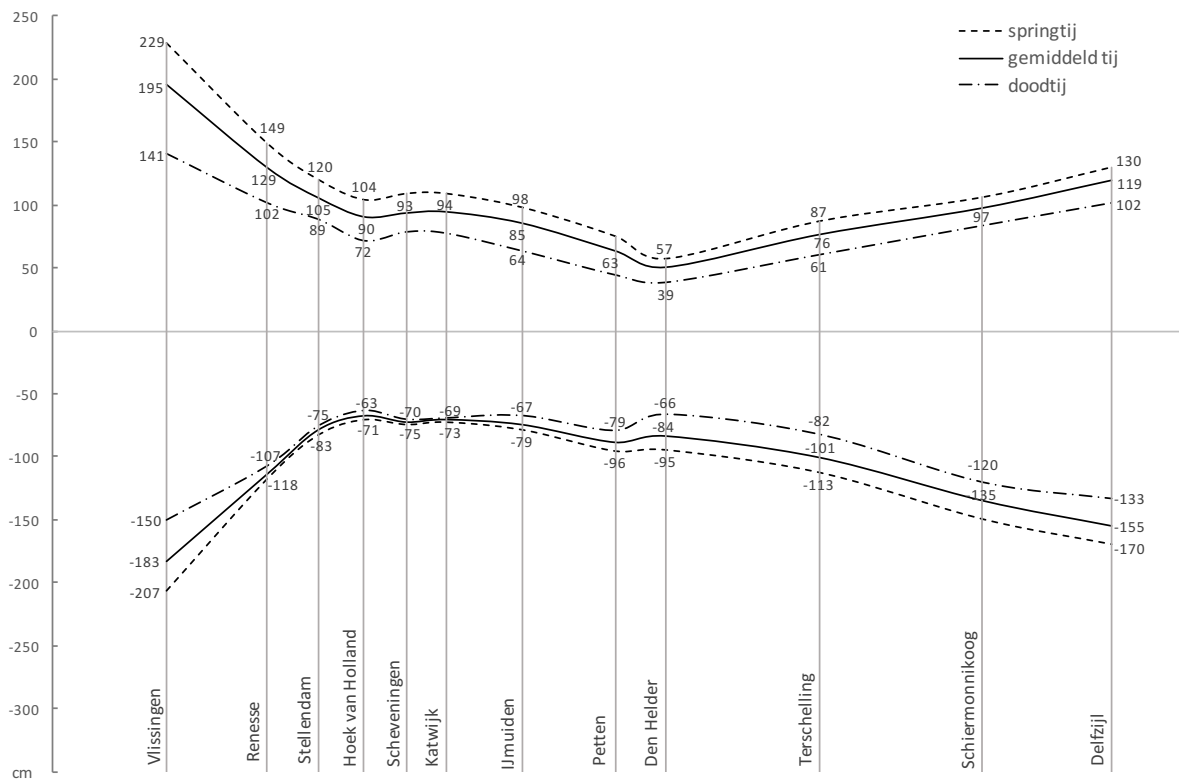
De hoogte en timing van hoog en laag water varieert langs de kust. Vanaf de Noordzee stroomt de getijdeweg, tegen de klok in langs de Engelse kust tot aan het Nauw van Calais, via de Nederlandse kust omhoog richting Denemarken. Hierdoor is het pas twee dagen na volle en nieuwe maan springvloed. Deze draaiing in combinatie met de trechtersvorm maakt dat de amplitude langs de kust in noordelijke richting afneemt en dat het in Delfzijl zo'n 10 uur later hoogwater is dan in Vlissingen (Zie ook tabel 4-1).

Procesbeschrijving windopzet

Naast de getijdebeweging heeft de wind ook invloed op de zeewaterstand. Wanneer de wind een lange strijklengte heeft - dit is de afstand waarover de wind grip op het water heeft - en de windsnelheid hoog is, stuwt de wind het water op en verhoogt daarmee de waterstand. Dit heet de windopzet. Door de vorm van de Noordzee is de strijklengte bij westenwind en noordwestenwind het langst. Bij krachtige lang aanhoudende wind uit deze richtingen is de windopzet het grootst. In figuur 4-15 is voor noordwestenwind en westenwind de windsnelheid en windopzet van de periode 2009-2015 van het station Haringvliet 10 (voor

Plaats	Tijdstip hoogwater (1-9-2016)
Vlissingen	02:46
Hoek van Holland	03:25
Scheveningen	03:41
IJmuiden	04:26
Petten	04:56
Den Helder	08:55
Terschelling	09:36
Harlingen	10:30
Lauwersoog	11:26
Delfzijl	13:00

Tabel 4-1: Verschil in tijdstip van hoog water langs de Nederlandse kust op 1 september 2016

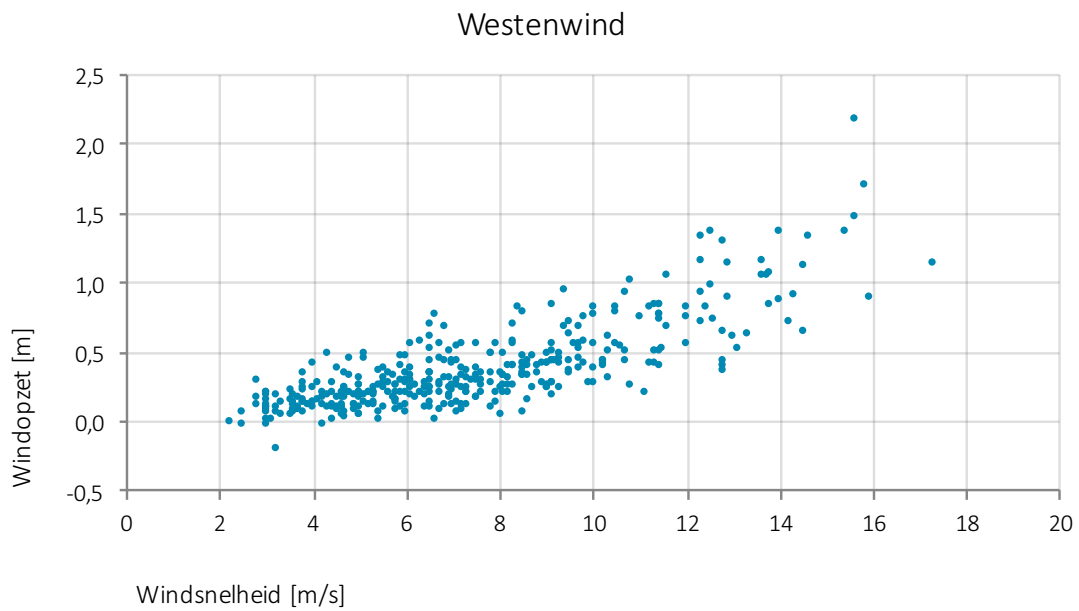
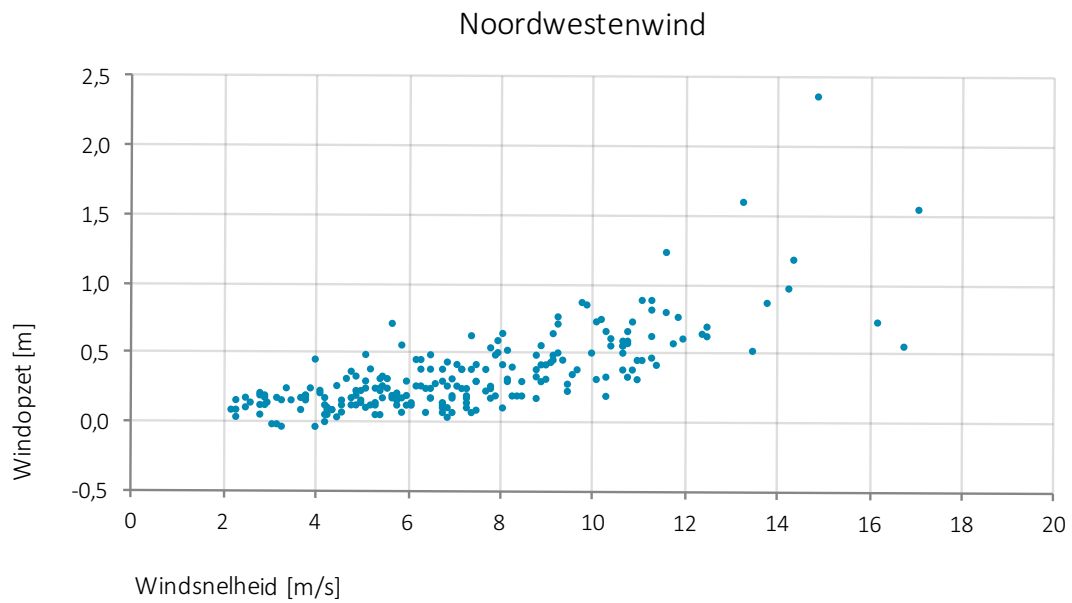


figuur 4-14: Amplitude op verschillende locaties langs de kust (Nortier, 1991)

de Zeeuwse kust) tegen elkaar uitgezet^[5]. Bij 15 m/s (windkracht 7 Beaufort) is een opzet van 1 meter niet ongewoon. Incidenteel, wanneer de wind gedurende langere tijd uit één richting waaide, is een opzet van meer dan 2 meter waargenomen. In bijlage V is voor alle windrichtingen de windsnelheid uitgezet tegen de windopzet van dit station. Daarnaast staat in de bijlage het astronomisch getij en de gemeten waterstand van het stormseizoen 2014-2015, wat een indruk geeft van de fluctuaties in de waterstanden ten opzichte van het astronomisch getij.

Het exacte moment waarop het getij en de windopzet uiteindelijk samenvallen zijn cruciaal voor de uiteindelijke waterstand. Wanneer de windopzet door een storm op zee samenvalt met springvloed, spreken we van een stormvloed. De overstroming in 1953 was het gevolg van een stormvloed, met langs de Nederlandse kust een maximale windopzet variërend van 2.79 meter bij Vlissingen tot 3.52 meter ter hoogte van Scheveningen (Rijkswaterstaat, 1961). In figuur 4-14 is te zien dat het verschil in hoogwater bij springtij en gemiddeld tij varieert tussen 0.1 tot 0.3 meter. Bij extreme waterstanden als gevolg van een stormvloed is dus de windopzet dominant.

5 Databronnen: het astronomisch getij komt van getij.rws.nl, de gemeten waterstanden: [live.waterbase](http://live.waterbase.nl) (Rijkswaterstaat) en de windrichtingen en snelheden van het KNMI (<https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/daggegevens>).

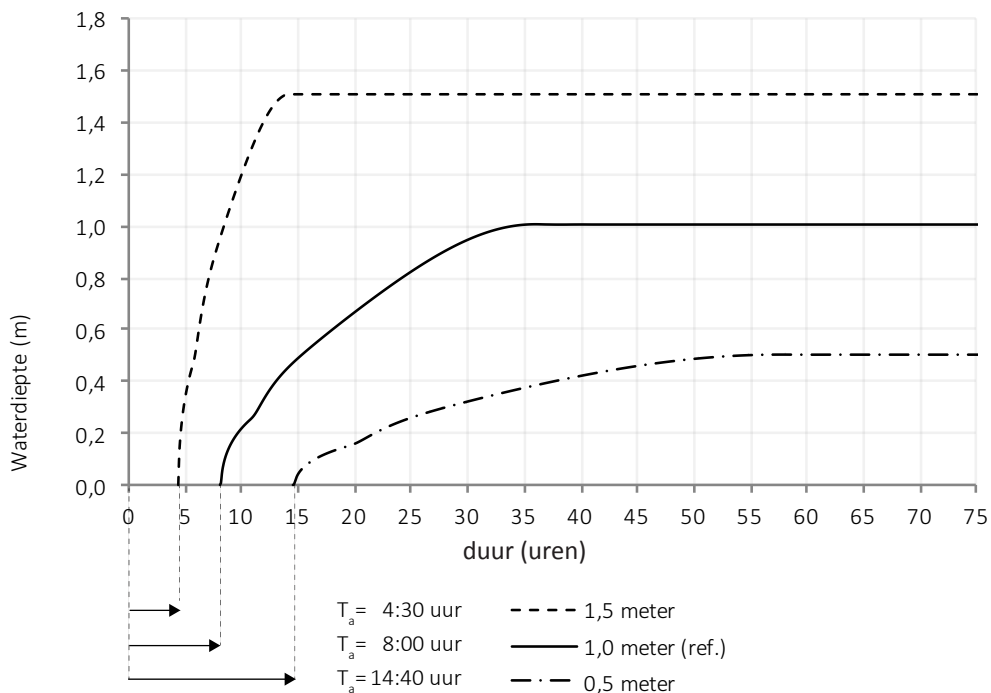


figuur 4-15: Windopzet bij Noordwesten en Westenwind en verschillende windsnelheden

Testberekening 5 hoogte van de buitenwaterstand

In de vijfde test met de proefpolder is de invloed van verschillende buitenwaterstanden op de aankomsttijd op de boerderij uitgerekend. In figuur 4-16 is de aankomsttijd en het waterstandverloop weergegeven. Hierbij is te zien dat een hoge buitenwaterstand een snellere aankomsttijd geeft.

De testberekening laat zien dat de buitenwaterstand zorgvuldig meegenomen moet worden voor een betrouwbare simulatie. Voor een groot aantal locaties langs de Nederlandse kust worden de waterstanden 48 uur vooruit voorspelt door Rijkswaterstaat. Deze voorspellingen houden rekening met wind en getij. Voor het overstromingsmodel van Nederland is het dan ook niet nodig om de gehele dynamiek van de Noordzee op te nemen, maar is het voldoende om de door Rijkswaterstaat voorspelde waterstanden als randvoorwaarden mee te nemen. Deze voorspelde waterstanden kunnen geïnterpoleerd worden langs de gehele kust, zodat een dijkdoorbraak op een willekeurige locatie met de juiste buitenstand berekend wordt. In bijlage VI is uitgebreider uitgewerkt hoe Rijkswaterstaat de waterstanden voorspelt en valideert met de meetlocaties op de Noordzee.



figuur 4-16: Aankomsttijd en stijgsnelheid bij twee verschillende buitenwaterstanden

5. LANDELIJK OVERSTROMINGSMODEL



5.1 Algemeen

Het doel van dit afstudeeronderzoek is het ontwikkelen van een landelijk overstromingsmodel waarmee kan worden gesimuleerd hoe Nederland vanuit de Noordzee overstroomt wanneer meerdere dijken breken. In dit hoofdstuk is uitgewerkt hoe dit landelijk model - met de kennis uit de vorige hoofdstukken - in 3Di is geschematiseerd. De gebouwde schematisatie is een eerste versie, waar vooral getracht is een overstroming met meerdere bressen langs de kust tussen Vlissingen en Delfzijl in 15 minuten uit te rekenen. Deze eerste versie is vooral bedoeld om een indruk te geven van de toekomstige mogelijkheden van een landelijk overstromingsmodel in 3Di.

Voor de in hoofdstuk vier genoemde factoren die de aankomsttijd beïnvloeden (landschapelementen, dijkdoorbraak en buitenwaterstand) is nu een detailniveau gekozen waarvoor het mogelijk is om met open source data, de huidige 3Di versie en de beschikbare tijd een schematisatie is te bouwen. Om het model daadwerkelijk in de praktijk te gaan gebruiken, zal het moeten worden uitgebreid, waarvoor het wenselijk is om voor sommige onderdelen meer niet-open-source data van de waterschappen te gebruiken, als ook 3Di verder uit te breiden.

5.2 Modelschematisatie

Het model is opgebouwd uit een digitaal hoogtemodel, een rekenrooster, initiële condities en randvoorwaarden. Dit zijn de basiselementen voor een 2D overstromingsberekening met 3Di (zie omschrijving Hoofdstuk 3). Het model beslaat heel Nederland en is geschikt om een willekeurige overstroming vanuit de Noordzee, Waddenzee, IJsselmeer of Markermeer te simuleren.

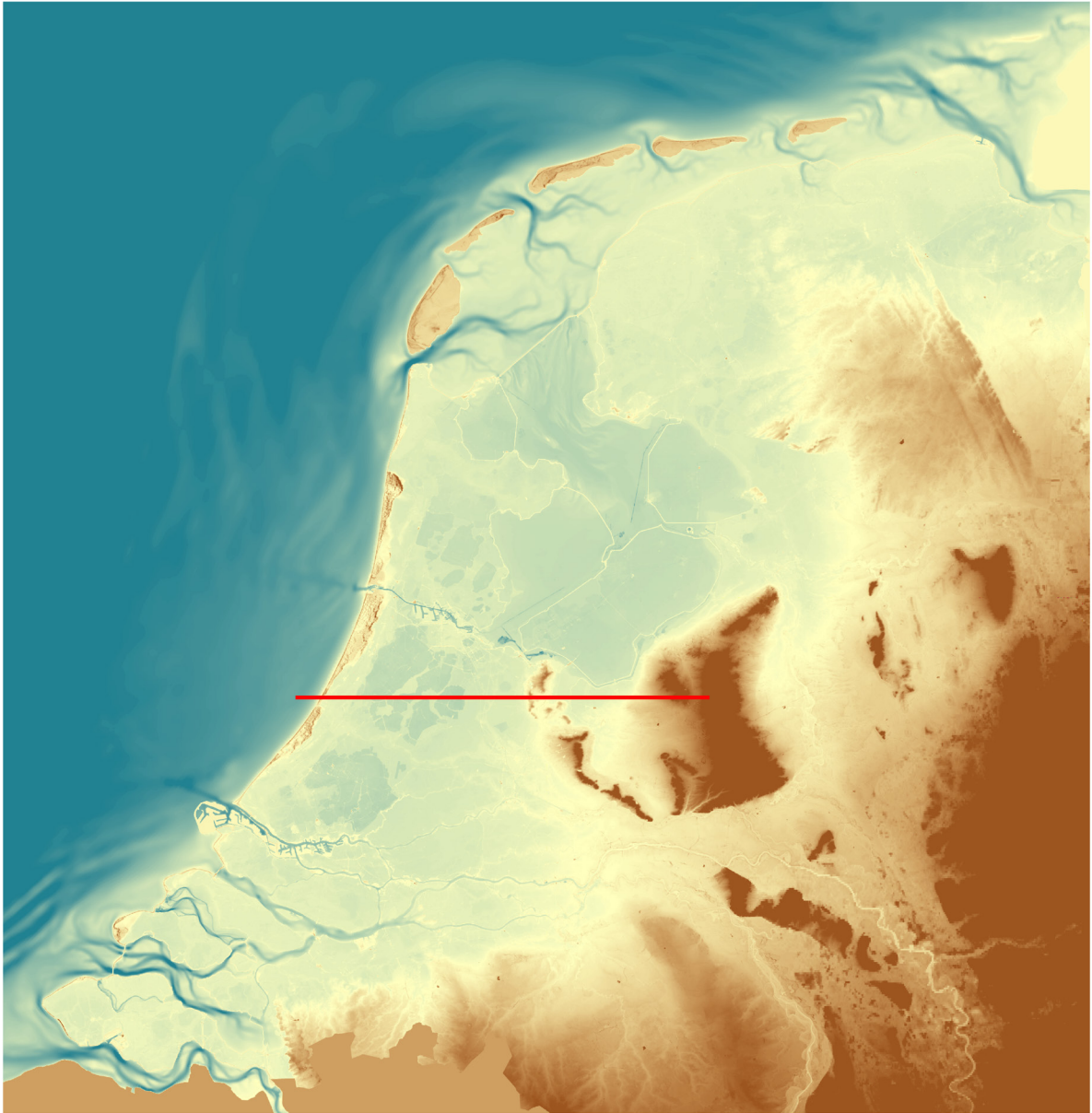
Digitaal hoogtemodel

Het digitale hoogtemodel vormt het subgrid waarop de overstroming wordt berekend (Stelling 2012). In het hoogtemodel zijn de hoogte van het maaiveld, de bodemprofielen van kustwateren, binnenmeren en de primaire waterkeringen opgenomen. Een dergelijke digitale hoogtekaart was niet voorhanden en is speciaal voor deze studie samengesteld door bestaande data te combineren, zoals hieronder beschreven. Gezamenlijk vormen zij een hoogteraster met 118 miljoen rastercellen op een resolutie van 25x25 meter. Ffiguur 5-1 toont het complete raster en een dwarsdoorsnede van de Noordzee naar de Veluwe. De duinen, droogmakerijen en de Utrechtse Heuvelrug zijn duidelijk herkenbaar.

Het digitale hoogtemodel is als volgt opgebouwd:

a. Maaiveldhoogte uit de AHN2

De hoogte van het maaiveld is afgeleid uit de Algemene Hoogtekaart Nederland (AHN2). In opdracht van Rijkswaterstaat en de waterschappen zijn deze data tussen 2007 en 2012 met LiDAR - Light Detection and Ranging- vanuit de lucht voor heel Nederland ingewonnen (Rijkswaterstaat, 2013). De originele dataset bestaat uit 6 tot 20 punten per m². Met deze data zijn verschillende hoogtekaarten gemaakt met een resolutie van 0.5x0.5 meter. Ffiguur 5-2 laat voor een stukje polder uit Zeeland het detailniveau zien waarop hoogteverschillen zichtbaar zijn. Zelfs oude stroomgeulen in een ogenschijnlijk vlak weiland zijn herkenbaar.



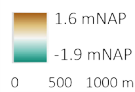
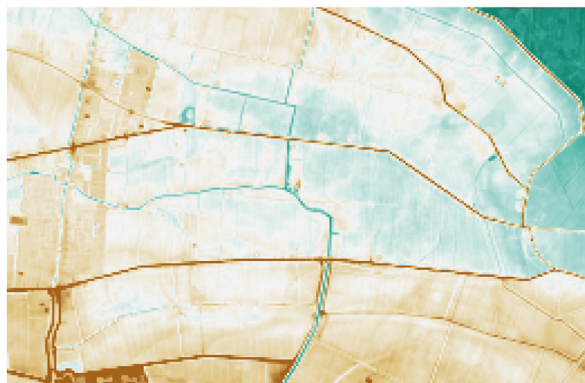
figuur 5-1: Het digitale hoogtemodel welke is samengesteld voor deze studie.

Voor heel Nederland bestaat de AHN2 hoogtekaart, met een resolutie van 0.5x0.5 meter, uit ongeveer 170 miljard cellen. Dit is zelfs voor een 3Di-model te groot en voor de crisispartners gaat dit verder dan het gewenste detailniveau. Voor deze studie is de AHN geaggregeerd naar 25x25 meter op basis van de gemiddelde hoogte van de onderliggende cellen. figuur 5-2-rechtsonder geeft voor hetzelfde gebied de hoogtekaart, maar dan nu met de nieuwe resolutie van 25x25 meter. In bijlage VIII staan de verschillen ook weergegeven in een dwarsprofiel en is een vergelijking gemaakt tussen de aggregatie op basis van de mediaan en het gemiddelde.

Van de AHN zijn twee basis raster kaarten beschikbaar: een hoogtemodel en terreinmodel. Het verschil zit hem in auto's, bomen en huizen die geen onderdeel zijn van het terreinmodel, maar wel van het hoogtemodel. Voor een overstromingsmodel zijn auto's,



figuur 5-2: Uitsnede (2700 ha) uit de Hoeksche Waard in Zuid-Holland. Linksboven de luchtfoto (Google Earth), linksonder de AHN2 op 0.5x0.5 meter en rechtsonder de AHN2 op 25x25meter. De hoogteverschillen lopen van 1.6 meter NAP naar -1.9 meter NAP.

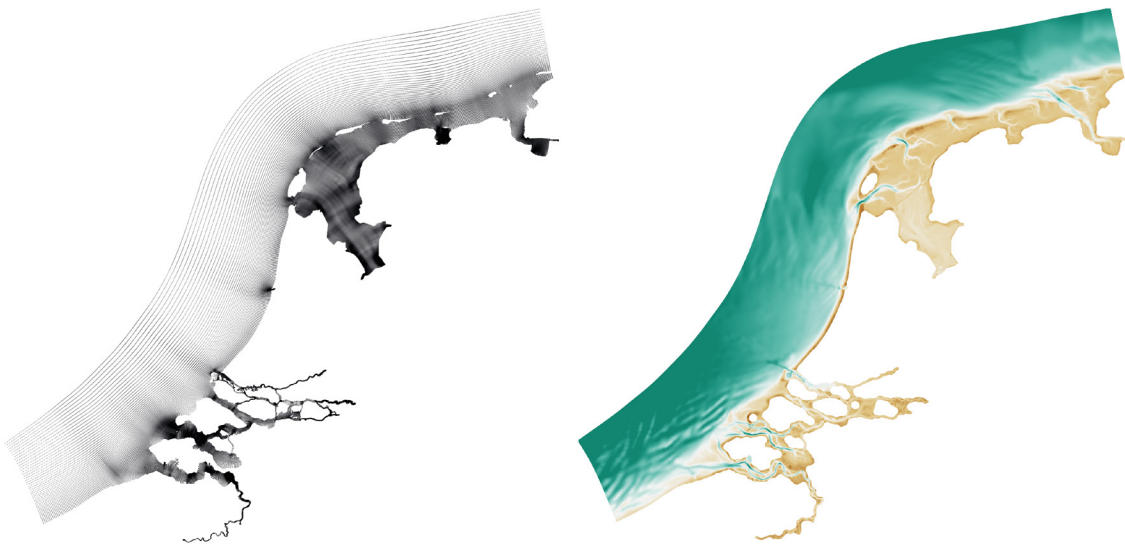


bomen en huizen niet handig en daarom is het terreinmodel gebruikt. Anders zou namelijk een rijtje bomen als een dijk in het landschap liggen. In bijlage VII is uitgewerkt hoe de AHN met deze elementen omgaat.

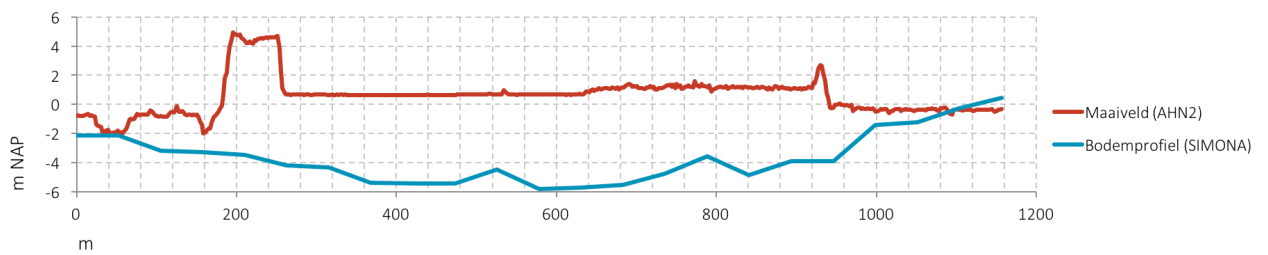
b. Bathymetrie van de kustwateren

De bathymetrie van de kustwateren maakt ook deel uit van het digitale hoogtemodel, zodat waterstanden en stroomsnelheden in deze wateren berekend worden. Door de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat worden bodemprofielen ingemeten, die onder andere gebruikt worden voor de scheepvaart en hydraulische modellen. In de landelijke schematisatie van deze scriptie zijn voor de kuststrook de x,y,z -punten gebruikt uit het SIMONA-kuststrook-fijn model (Rijkswaterstaat, 1999), die vervolgens via Kriging (Oliver, 1990) zijn geïnterpoleerd tot een bodemhoogteraster. Dit raster is verder aangevuld met bodemhoogtedata van enkele afgesloten onderdelen van de Zeeuwse delta en het IJsselmeergebied (in raster vorm, ook verkregen van de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat).

De bodem van de grote rivieren zit niet in de AHN. Aangezien de waterdiepte in rivieren wel effect heeft op de aankomsttijd van de overstroming (zoals omschreven in paragraaf 4.3), zijn de bodemhoogtes van het westelijke deel van de rivieren ook onderdeel gemaakt van het digitale hoogtemodel van deze studie. Ter plaatse van de rivier is het bodemprofiel uit het SIMONA-kustmodel gebruikt en daarbuiten het maaiveld uit de AHN2. Onderstaand figuur 5-4 toont ter illustratie een deel van de Oude Maas (vlak voor Dordrecht), waarbij een dwarsdoorsnede is getrokken door de rivier. In de grafiek is te zien dat de rivierbodem in het digitale hoogtemodel op deze manier van ongeveer 1 NAP naar -5mNAP gaat.



figuur 5-3: Links de 142.000 punten x,y,z -punten uit het SIMONA kustmodel. Rechts de geïnterpoleerde punten naar een hoogteraster. (bron: Rijkswaterstaat)

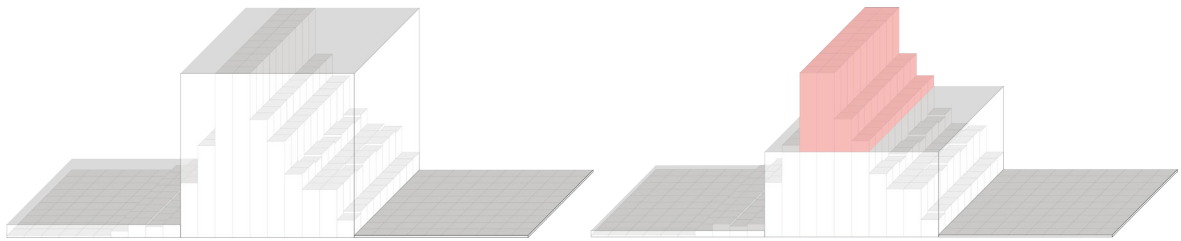


figuur 5-4: De rode lijn is het maaiveld zoals deze in de AHN2 zit. De blauwe lijn is het bodemprofiel uit de geïnterpoleerde x,y,z-punten (SIMONA kustmodel).

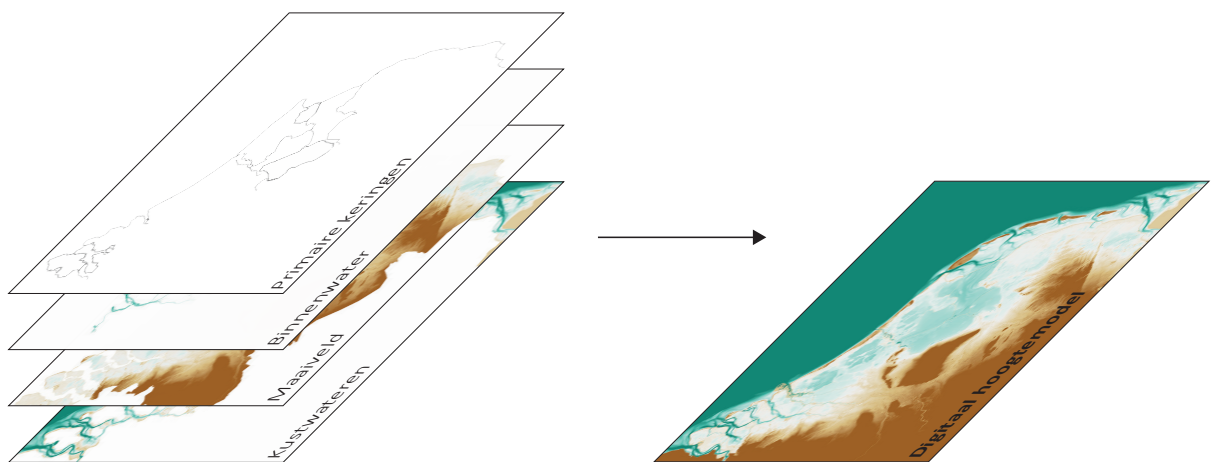
c. Primaire waterkeringen

Alle landschappelijke verhogingen groter dan 0.5x0.5 meter zijn terug te vinden in de AHN2, dus ook de primaire waterkeringen. Echter, door de aggregatie op basis van het gemiddelde naar 25x25 meter worden zullen smalle delen afgevlakt of een lagere waterkerende hoogte krijgen dan in de praktijk. Voor deze studie is het belangrijk dat in ieder geval de primaire keringen langs de kust(wateren) de werkelijke kruinhoogte hebben. Daarom is op de locaties van de primaire keringen de AHN2 geaggregeerd op basis van het maximum, zodat de 25x25 meter cel de kerende werking behoud (zie figuur 5-5).

De bovengenoemde 3 verschillende rasterelementen (maaiveld, kustwateren, primaire keringen) zijn samengevoegd tot één digitaal hoogtemodel. Dit is via een script geautomatiseerd, zodat het eenvoudig is om in een later stadium alsnog te kiezen voor een andere verfijning of aggregatiemethode. Hiermee ligt de huidige keuze van de ruimtelijke resolutie van 25x25 meter in het model dus niet vast. Naast de hier beschreven elementen is in bijlage VIII ook uitgewerkt hoe is omgegaan met de Waddeneilanden, stormvloedkeringen, het overige binnenwater en de grens met Duitsland en België.



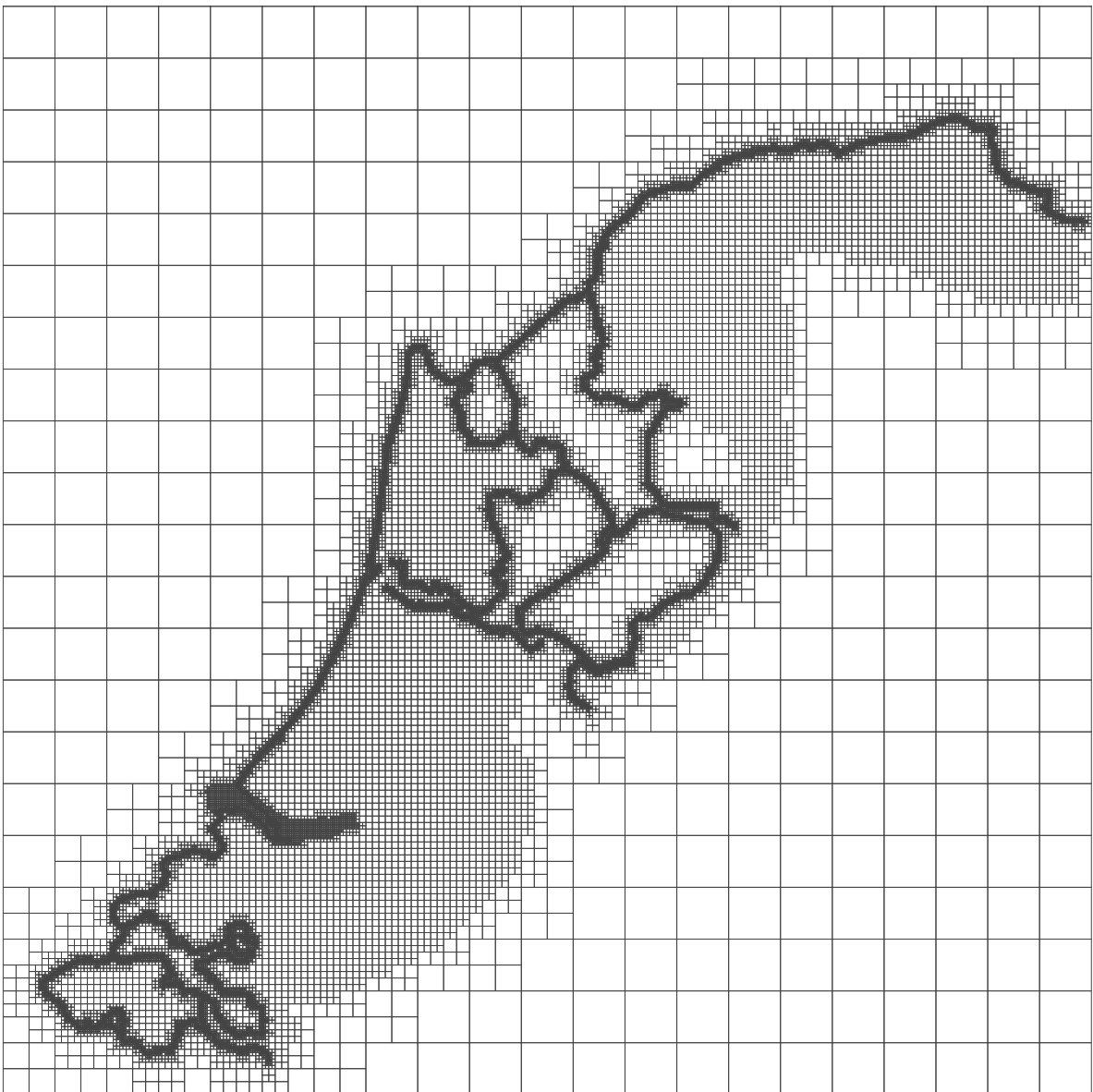
figuur 5-5: Geschematiseerde weergave van de verschillen tussen aggregatie van een dijklichaam op basis van maximum (links) en gemiddeld (rechts). De rode cellen vallen weg en daarmee een deel van de kerende werking.



figuur 5-6: Opbouw digitale hoogtemodel

Rekenrooster

Met het rekenrooster worden de waterstanden berekend. Dit rekenrooster ligt boven het hiervoor beschreven subgrid. Voor het model is een rekenrooster ontwikkeld met in totaal 84 duizend rekencellen. Op plekken waar veel variatie in stroming wordt verwacht is het rekenrooster fijner en de andere delen zijn grover. In laag Nederland varieert de rekenafstand van 100 meter naar maximaal 1600 meter, op de Noordzee en in hoog Nederland is de rekenafstand 12 km. Onder laag Nederland wordt verstaan alle dijkkringbieden met het maaiveld onder +5mNAP. Ffiguur 5-7 toont het ontwikkelde rekenrooster. Ter plaatse van de primaire keringen langs de kust, het IJsselmeer, het Markermeer en de Zeeuwse wateren is het rekenrooster verfijnd tot een rekencelgrootte van 100 meter.



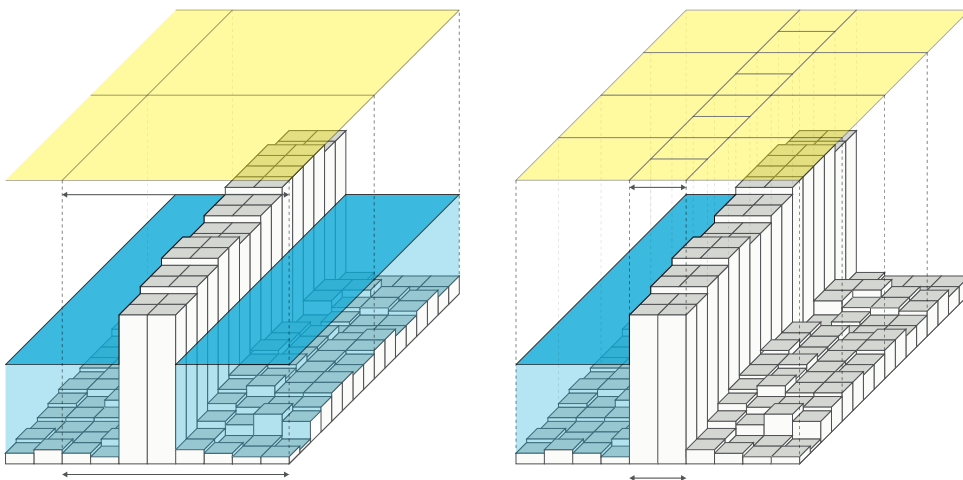
figuur 5-7: Rekenrooster

Deze kleinere rekencellen zijn nodig, omdat in de nabijheid van de bres de stroming van water snel varieert. Daarnaast kan bij een rekencel breder dan de primaire kering, water onbedoeld 'over' de dijk stromen, omdat er per rekencel maar één waterstand wordt uitgerekend, zie figuur 5-8. Wanneer water dan van links aan komt stromen en deze cel bereikt, wordt de waterstand overal gelijk berekend en dus ook aan de rechterkant van de dijk, ongeacht de hoogte van de kering. Dit is een nadeel van de quadtree-subgrid techniek. Binnen 3Di zijn verschillende methodes ontwikkeld om zonder fijne rekencellen deze onbedoelde stroming te voorkomen. Voor het landelijke model uit deze scriptie is dit voor de primaire waterkeringen opgelost door voor alle primaire keringen de rekencellen te verfijnen naar 100x100 meter en is het onderliggend subgrid van die cellen ook aangepast. De breedte van elke kering is exact 100 meter gemaakt, zodat altijd in ieder geval de gehele rekencel 'dicht staat' (zie figuur 5-8). De kruinhoogte is hierbij, zoals eerder beschreven, de maximale hoogte van een 25x25 resolutie uit de AHN. In werkelijkheid zijn dit dus vier cellen van 25x25 van gelijke hoogte, die samen 100x100 vormen.

Net als de resolutie voor het subgrid kan de resolutie van het rekenrooster eenvoudig worden aangepast. In deze studie is gekozen voor het bovenstaande, maar dit ligt niet vast. De nu gemaakte keuze is een compromis tussen detail en performance van het model, gegeven de voor dit onderzoek beschikbare computerrekenkracht.

Initiële condities en randvoorwaarden

Voor het oplossen van de ondiep-water-vergelijkingen zijn initiële condities en randvoorwaarden nodig. De initiële condities zijn de waterstanden op tijdstip $t=0$, waarmee het model in iedere cel een berekening begint. Voor de kustwateren kan hiermee in het model de actuele waterstand voorafgaand aan de overstroming worden ingesteld. Op het land is de initiële conditie nul, aangezien hier geen water is. De randvoorwaarden zijn de hydraulische toestanden aan de randen van het model. Hier kan het water variërend in de tijd het modeldomein in of uit stromen, of tegen worden gehouden. In 3Di is de standaard randvoorwaarde een gesloten rand, dus wanneer men niets opgeeft, kan er geen water in- of uitstromen en functioneert het systeem als een gesloten bak. Om een overstroming vanuit de Noordzee te kunnen simuleren - zonder dat de Noordzee leegloopt gedurende



figuur 5-8: De rekenafstand is gelijk aan de breedte van de dijk (rechts), zodat het water niet 'over' de dijk stroomt (links).

een overstroming - is het nodig om op de Noordzee een getijdebeweging op te drukken. Hiervoor zijn de Noordzee-meetpunten van Rijkswaterstaat gebruikt, waarvoor de actuele en driedaagse verwachting van de waterstand voorspeld wordt.

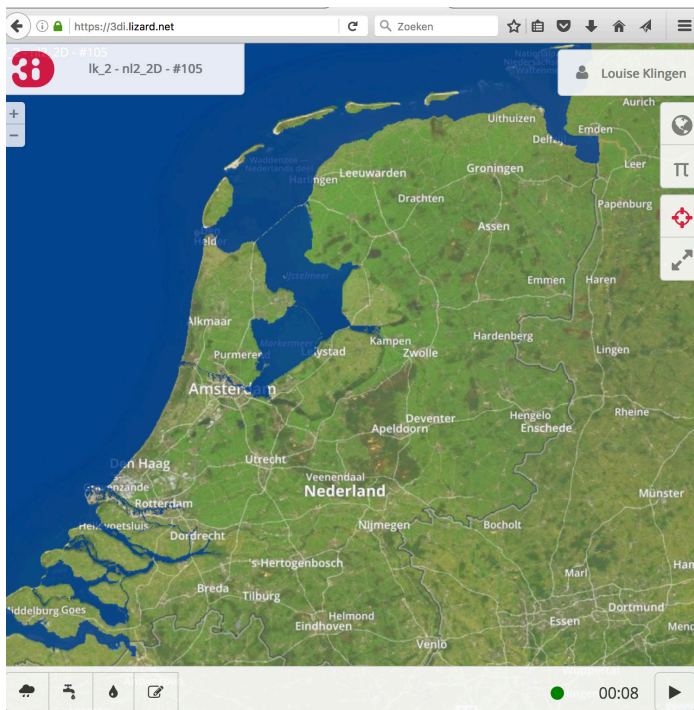
Rekentijdstap

De rekentijdstap bepaalt met welk tijdsinterval de ondiep-water-vergelijkingen worden opgelost en geeft samen met het rekenrooster numerieke restricties. Water kan namelijk niet binnen één rekentijdstap een cel voorbijstromen. Bij een tijdstap van 15 seconden mag het water ongeveer met 6 meter per seconden stromen ($100/15=6$). In de modelinstellingen kan een globale rekentijdstap worden ingesteld voor de gehele berekening. Wanneer door een tijdelijke snelle stroming in de bres een kleinere rekentijdstap nodig is, wordt deze tijdelijk automatisch verlaagd (het zogenaamde knippen van de rekentijdstap). In de huidige schematisatie is de globale rekentijdstap 100 seconden.

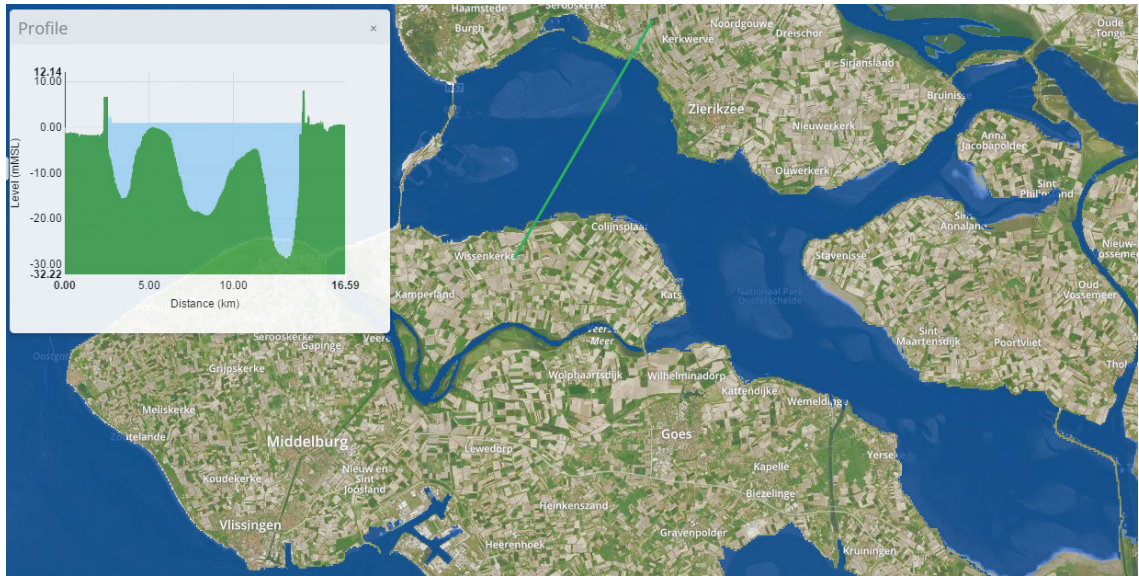
5.3 Het gebruik van de huidige schematisatie

Om niet beperkt te worden door de reken capaciteit van een desktopcomputer rekent de 3Di-schematisatie op een serverpark en is de schematisatie overal en altijd online te benaderen. Wanneer op de 3Di-site wordt ingelogd en het Nederlandse overstromingsmodel wordt gestart, start er op dat moment een rekencomputer op een serverpark in Amsterdam. Deze voert de berekening uit en visualiseert de resultaten via een webbrowser.

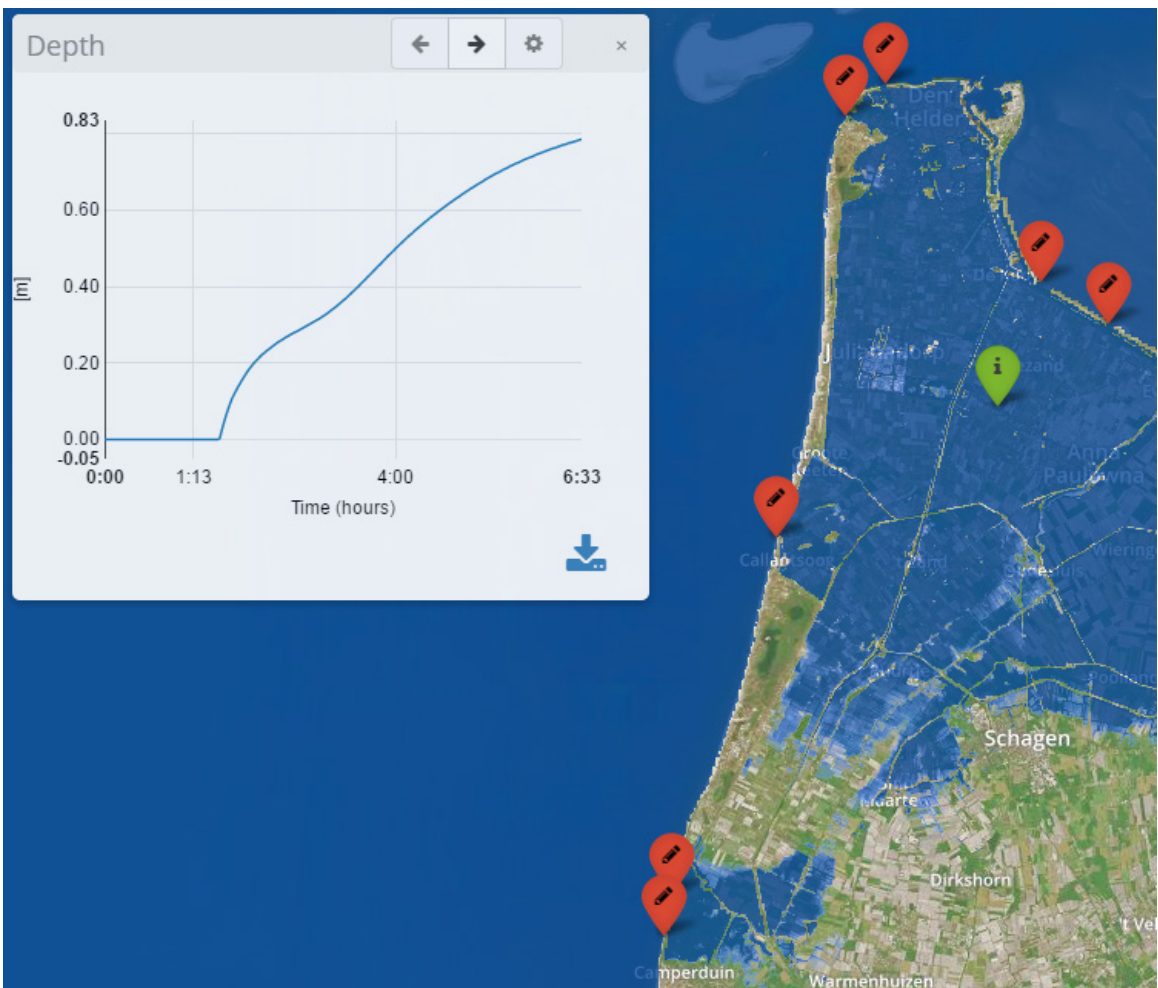
Met de nu gemaakte schematisatie kan voor het simuleren van een doorbraak langs de kust een stuk van de hoogtekkaart worden verlaagd. De afmetingen kunnen weliswaar gekozen worden, maar liggen daarna vast per doorbraak. In de huidige versie van 3Di is het nog niet



figuur 5-9: Interface 3Di.lizard.net



figuur 5-10: Bodemprofiel Oosterschelde



figuur 5-11: waterstandsverloop op meetlocatie (groene 'i').

mogelijk om een doorbraak inclusief begroei te simuleren voor doorbraken vanaf zee⁶.

Tijdens de berekening kunnen extra doorbraken gemaakt worden, waarbij het aantal ongelimiteerd is. Rechtsonder wordt de tijd bijgehouden. Het model rekent in 15 minuten tijd een overstromingsduur van 24 uur door.

Wanneer op een locatie op de kaart wordt geklikt, verschijnt de aankomsttijd en het waterstandsverloop van dat punt (zie figuur 5-11).

5.4 Verdere ontwikkeling van de schematisatie

Het ontwikkelde model rekent en geeft een goede indruk van de mogelijkheden. Om in de toekomst het model in de praktijk te kunnen gebruiken tijdens een calamiteit, moeten in ieder geval de volgende elementen nog verder uitgewerkt worden:

- **Getijdebeweging**

De randvoorwaarden van de getijdebeweging zijn alleen op de meetpunten van Rijkswaterstaat opgedrukt en het getij verspreidt zich van daaruit over de Noordzee. Of dit nergens tot een over- of onderschatting van de waterstand leidt – tot en met locaties ver buiten deze meetpunten – is niet onderzocht.

- **Bresgroei**

In de huidige schematisatie kan een bres alleen worden gecreëerd door het lokaal verlagen van de digitale hoogtekkaart. Hierdoor is de breedte van de bres direct vastgelegd en kan de breedte en diepte niet op basis van de schuifspanning groeien. Met de huidige mogelijkheden voor bresgroei in 3Di is het nog niet mogelijk om voor doorbraken vanuit zee bresgroei te simuleren.

- **Secundaire keringen en watergangen**

Ook zijn in het model nog geen secundaire keringen en watergangen opgenomen. De secundaire keringen zitten wel deels in de hoogtekkaart, maar door de aggregatie naar 25x25 op basis van het gemiddelde én doordat de rekencellen in het binnenland groter zijn dan de breedte van de secundaire keringen, zullen zij geen kerende werking hebben.

- **Operationeel watersysteem**

Het Nederlandse watersysteem wordt gekenmerkt door kunstwerken; zoals pompen, gemalen, stuwen duikers en stormvloedkeringen. Zij zijn in de huidige versie niet meegenomen. Om de effecten van deze kunstwerken te modelleren, moeten zij ook geschematiseerd worden.

- **Overstroming vanuit de rivieren**

Het model is nu alleen geschikt gemaakt voor overstroming vanuit de Noordzee, Waddenzee, IJsselmeer en Markermeer, maar ook de waterkeringen langs de rivieren hebben een kans op falen. In de huidige schematisatie is het niet mogelijk een rivieroverstroming te simuleren. Dit is wel gewenst bij een landelijk calamiteitenmodel.

6 Sinds begin 2016 is het in 3Di wel mogelijk om bresgroei te simuleren voor een boezemkadebreuk. Hierbij stroomt water van een 1D-netwerk naar het 2D raster. Omdat al het water daar in 1 rekencel belandt, is het nog niet mogelijk doorbraken te simuleren met (extreme) hoeveelheden water, zoals bij een doorbraak vanuit zee. Een module die dit kan moet nog ontwikkeld worden in 3Di.

6. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN



Bij een dreigende overstroming van bovenregionale schaal is het Landelijke Draaiboek Hoogwater en Overstromingen van toepassing. Hierin zijn de verantwoordelijkheden en onderlinge informatie-uitwisseling van de crisispartners vastgelegd. De Landelijke Coördinatiecommissie Overstromingsdreiging (LCO) coördineert en stelt de andere partners op de hoogte van de actuele en verwachte toestand van de overstroming. De Rijkswaterstaat-regio's en waterschappen voeren de watersysteemmaatregelen uit en de veiligheidsregio's zijn verantwoordelijk voor de evacuatie van de bevolking.

Wanneer een overstroming op plaatsvindt, als gevolg van het breken van meerdere dijken, weten burgers noch crisispartners wat de aankomsttijd van het water is. De LCO kan met de huidige middelen de andere crisispartners alleen bedienen met een mogelijk eindbeeld van de overstroming en kan geen verloop in de tijd geven. Dit komt doordat zij enkel beschikken over van tevoren uitgerekende overstromingsscenario's, die zij combineren wanneer er sprake is van een grote overstroming met meerdere doorbraken. Aangezien een overstroming een dynamisch proces is, zal de actuele situatie hier altijd van afwijken en kunnen zij de scenario's alleen gebruiken om een statisch eindbeeld te geven van het mogelijk te overstroomende gebied. Echter, zowel de effectiviteit van watersysteemmaatregelen als de evacuatie zijn gebaat bij beter inzicht in de aankomsttijden van het water.

Met een landelijk overstromingsmodel wat snel het verloop van de daadwerkelijke overstroming kan berekenen, kan de LCO de andere crisispartners bedienen met aankomsttijden van het water voor alle locaties in het land. Zo weten de veiligheidsregio's of zij bijvoorbeeld nog 2 uur of 2 dagen hebben om burgers in te lichten en/of te evacueren van locatie x. Daarnaast weten waterbeheerders of, en zo ja wanneer, het water hun gebied bereikt en kunnen zij maatregelen prioriteren op basis van de beschikbare tijd.

In dit onderzoek is met het hydraulische instrument 3Di een landelijk 2D overstromingsmodel geschematiseerd, waarmee gesimuleerd kan worden hoe het water Nederland binnenstroomt wanneer op meerdere locaties langs de kust dijken breken. Voorafgaand en tijdens de berekening kunnen op willekeurige locaties langs de Noordzeekust, Waddenzee, IJsselmeer of Markenmeer dijken worden gebroken en eventueel weer worden gedicht. Hiermee kan ook het cascade effect tussen dijkringen gesimuleerd worden.

Het model visualiseert tijdens de berekening de stroming van het water over het land op een luchtfoto op een resolutie van 25x25 meter. Door op een gewenste locatie op de kaart te klikken verschijnt direct een grafiek van de waterstand en aankomsttijd van het water op dat punt. Meerdere gebruikers kunnen tijdens de simulatie meekijken en de resultaten inzien en exporteren. Het model rekent zo snel, dat het in 15 minuten een overstromingsduur van 24 uur doorrekent.

Het ontwikkelde landelijke overstromingsmodel is enkel een eerste versie en nog niet geschikt om in te zetten tijdens een grote overstroming. Elementen die het nog niet bevat en wel een rol spelen bij een grote overstroming zijn:

- Overstroming vanuit rivieren;
- Interactie met stormvloedkeringen;
- Koppeling naar waterstandmetingen en voorspellingen;
- Bresgroei;
- Verificatie met metingen en/of andere overstromingsmodellen;
- Details in het landschap die de stroming beïnvloeden, zoals secundaire keringen en watergangen.

Om inzichtelijk te maken welke factoren van invloed zijn op de aankomsttijd, zijn naast de landelijke schematisatie, de overstromingsprocessen beschreven en berekend voor een proefpolder. Hiervoor is een opdeling gemaakt in drie overstromingsprocessen: verspreiding over land, dijkdoorbraken en buitenwaterstand. Alle drie de processen hebben invloed op elkaar en zijn afhankelijk van plaats en tijd.

1. Verspreiding over het land wordt gedomineerd door de hoogtekaart, maar ook beïnvloed door landschapselementen. Zo zorgen watergangen voor verkorting van de aankomsttijd en keringen en begroeiing voor vertraging. Keringen en watergangen zijn in grote mate aanwezig in het Nederlandse landschap.

2. De groei van een bres is een ingewikkeld proces, waarvoor nog geen eenduidige mathematische beschrijving bestaat. In het algemeen wordt de ontwikkeling van de bres omschreven aan de hand van vijf fases, die qua afwisseling en snelheid afhangen van: hydraulische belasting, bodemopbouw en toestand van de kering, verschil tussen binnen en buitenwaterstand en de erosie-coëfficiënt. Door de locatie-specifieke parameters en de afhankelijkheid van de andere overstromingsprocessen, is de bresgroei zeer variabel en moeilijk te voorspellen. De proefpolder laat zien dat een bredere bres een snellere aankomsttijd geeft. De bresgroei zal dus ook invloed hebben op de aankomsttijd.

3. De buitenwaterstand is ook bepalend voor de aankomsttijd, via de hydraulische belasting voor de bresontwikkeling, maar ook met het instromend debiet. Een hogere buitenwaterstand versnelt de aankomsttijd. De hoogte van de waterstand op zee is een combinatie van getijdebeweging en windopzet. De getijdebeweging varieert langs de kust in amplitude en timing en de windopzet wordt voornamelijk bepaald door de windrichting en snelheid. Wanneer springtij samenvalt met een hoge windopzet is er sprake van een stormvloed en kan de waterstand tot enkele meters hoger zijn dan normaal.

De beschrijving van de processen en berekeningen met de proefpolder geven enkel een beeld van de complexe interactie en invloed op de aankomsttijden. Om de gevoeligheid van de verschillende elementen en parameters te bepalen moet meer gevarieerd worden in onder andere: variërende buitenwaterstand, breslocaties en timing, bresgroei, landschapselementen en numerieke oplossingsmethodes.

In ieder geval moeten bij het realistisch simuleren van een overstroming, waarbij de aankomsttijd de gewenste output is, alle drie de processen volwaardig gemodelleerd worden, waarbij de verwachtingen en actuele toestand van doorbraaklocaties en buitenwaterstanden eenvoudig moeten zijn aan te passen. Van tevoren uitgereken scenario's, op basis van vooraf bepaalde doorbraaklocaties en buitenwaterstanden, kunnen daarom nooit de aankomsttijd van een actuele overstroming goed voorspellen.

Het ontwikkelde landelijke model laat zien dat het met de huidige software mogelijk is om een overstroming op dergelijke schaal, met een bruikbare resolutie en snelheid, te simuleren. Het hydraulische instrument 3Di is nog volop in ontwikkeling. Wanneer deze ontwikkeling wordt aangesloten bij de eisen en wensen voor het verbeteren van dit landelijk overstromingsmodel, is er de mogelijkheid voor de LCO om het model in te zetten tijdens een bovenregionale overstroming. Hiervoor zal de schematisatie moeten worden uitgebreid om nadere uitwerkingen te realiseren.

De ondersteuning die de LCO kan bieden aan de crisispartners is uiteraard niet alleen afhankelijk van de beschikbaarheid van een model. Ook de onderlinge samenwerking, de gebruikersschil, het delen van de informatie, etc., zijn van belang. Ook is kennis van aankomsttijden van het water niet een-op-een te vertalen naar efficiëntere maatregelen bij waterbeheerders en veiligheidsregio's. Hiervoor is het van belang dat verdere modelontwikkeling hand in hand gaat met uitbreiding van de samenwerking en informatie-uitwisseling tussen de crisispartners.

EXECUTIVE ENGLISH SUMMARY

Introduction and overview

Exact and timely prior knowledge about how an actual flood propagates over land, for example knowing when water reaches a junction, is useful for emergency services and water authorities. Such knowledge would allow them to take targeted measures of appropriate scope. Up to now, such knowledge cannot be offered. With conventional flood models being slow, until now only static maps showing results of pre-calculated theoretical scenarios, are being prepared to provide flooding insight. Therefore, the subject of this thesis is a flood model of the Netherlands, that needs 15 minutes to calculate the development of any flood within the next 24 hours.

The added value for the crisis partners of such a countrywide flood model when fighting a flood is a first topic discussed in this thesis. Next, the processes that a flood model minimally needs to include to compute a realistic course of a flood, are discussed. Finally, the 3Di software was used to build a first version of a countrywide model, with which the flow of every breach for any location along the coast can be calculated.

The relevance of a countrywide flood model

The Netherlands includes a large flood prone area, due to the low elevation compared to mean high tide and elevated rivers flowing through a deltaic area. In order to protect the country against flooding, a large system of flood defences has been constructed in the past centuries. These constructions are designed to withstand a certain accepted risk level; for higher levels, a flood is 'allowed' to occur. The urbanised area of South-Holland (or actually embankment ring 14) for example has a safety standard of 1:10 000 per year. These safety standards or part of the Dutch Water Law. Even with the small chance on a sudden flood, it can happen any time that the country is confronted with a heavy storm surge above the design level of the embankments. Such storm surges can cause a large amount of levee breaches and a catastrophic flood disaster as a result.

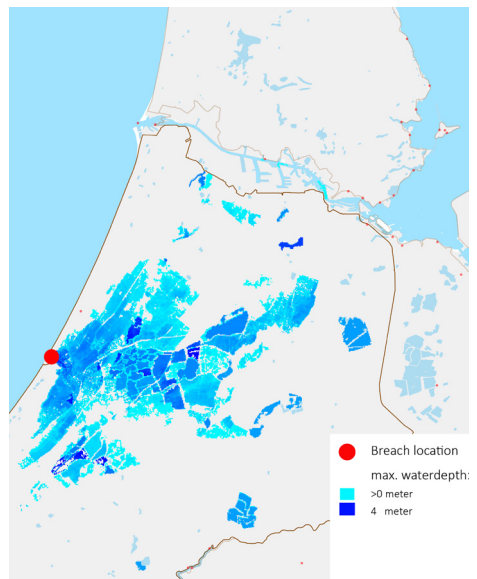
Next to working on protection against flooding, the water authorities are also working on dealing with and preparation for floods. The National Committee on Coordinating Floods Threats (Landelijke Coördinatiecommissie Overstromingsdreiging; LCO) has the responsibility to inform all relevant crisis partners about the current and expected situation of a flood threat. The most important crisis partners are the water authorities and the emergency services. The water authorities include twenty-three water boards and seven regional offices of Rijkswaterstaat (the executive agency of the Ministry of Infrastructure

and the Environment). The water boards maintain 80 percent of the primary levee's, all the regional levees and the regional water system. Rijkswaterstaat maintains the larger water system of national importance (e.g. coastal area, IJsselmeer, Markermeer and big rivers and canals) and the remaining 20 percent of the primary levees. The water authorities are responsible for a safe water system and a minimal impact in case of a flood. The emergency services are responsible for the evacuation of population and cattle. It is important for the agencies to gain insight in how flood development over time in order to take efficient measures. For this reason, during (the threat of) a flood, the LCO makes a prediction of the current situation and the expected possible flood.

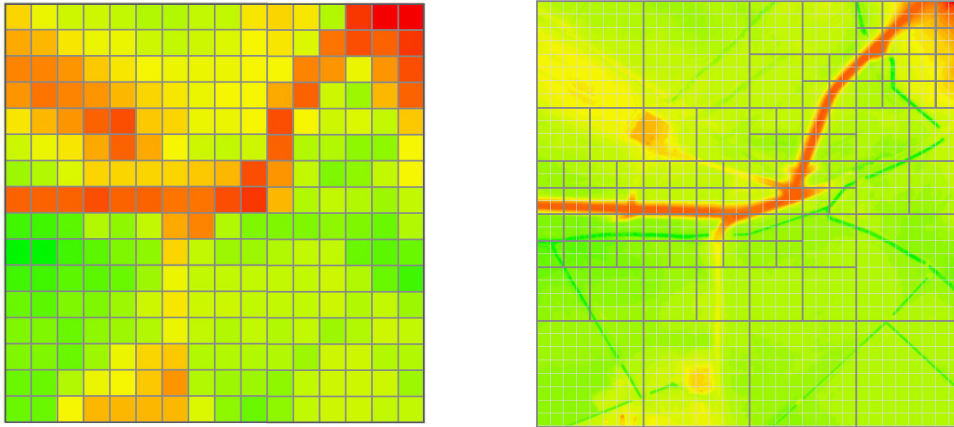
The prediction is updated frequently and made by adding the results of (combined) flood scenarios from a database. For all primary levees, pre-calculated results are available on what maximum water levels would be with levee failure on a certain location (the red dots in Figure 1 and 2). In case of a flood with multiple breaches, the flood extent of the different single breaches are combined. However, in reality these different floods would affect each other. Combining different pre-calculated flood extents does not tell anything about the actual development of the flood. Moreover, in case of large scale floods, the LCO can only give an indication of the final area under threat and the time of arrival in different areas. If the crisis partners would have a flood model which could calculate the time of arrival of a flood in the area under threat based on the actual situation, time dependent crisis measures could be better targeted. This would save people's and cattle's lives and belongings and also allow deploying means to reduce a flood or impact of a flood on these locations with highest needs.



figuur 1: breach locations floodscenario's



figuur 2: maximum waterdepth, breach location Katwijk (embankement ring 14)



figuur 3: left homogenous calculation grid, right a subgrid-quadtree grid.

How to model a flood in minutes instead of hours?

Modelling a flood means calculating the flow of water. The Navier-Stokes Equations describe the flow of a fluid in its full three dimensions, but for floods, overland flow can be described with the less complicated Shallow Water Equations (SWE) also called the Saint-Venant Equations – with as its most important assumption a depth-averaged velocity: water does not flow in vertical direction, only in the horizontal plane. The SWE consist of two balance equations, for mass and momentum. This set of partial differential equations can only be solved numerically, which brings a need to discretise in time and space. Solving the SWE is laborious and searching efficient ways to compute shallow water flows without losing accuracy is an important research topic.

In 2010, Casulli and Stelling published a new way of calculating overland flow: the subgrid-quadtree method. The difference with previous methods is that this method does not calculate the SWE on every grid cell. The Cartesian calculation grid is detached from the digital elevation model, allowing improving the computational speed considerably. On flat areas – with little variation in elevation – water levels will not differ much, so the water level is calculated for larger raster cells. In areas with more variation in elevation, a finer calculation grid is used. This approach reduces the amount of calculation cells in flat areas like the Netherlands (See figure 3) and improves the calculation time much.

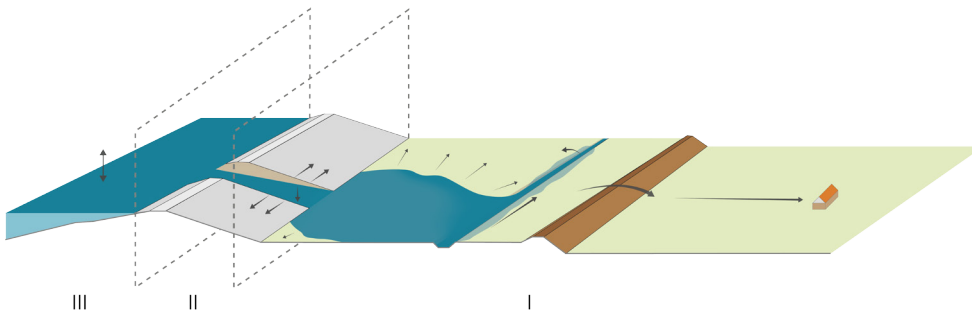
Elements that determine the course of a flood

Next to the Shallow Water Equations, one should know which elements influence the course of a flood in order to compute the arrival time of flood water. In this thesis, a test was implemented in the model to experiment with the effects of the following elements on the arrival time (figure 4):

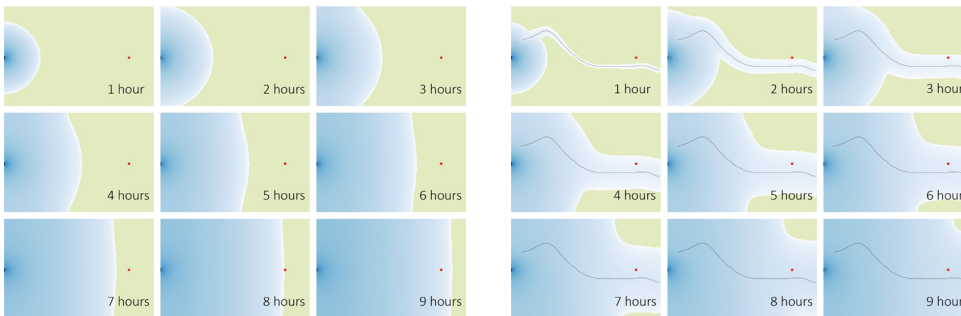
- I. Landscape components;
- II. Levee breaches processes;
- III. Sea water level.

The test was performed with a schematisation of a small polder of 6 kilometres in length, 4

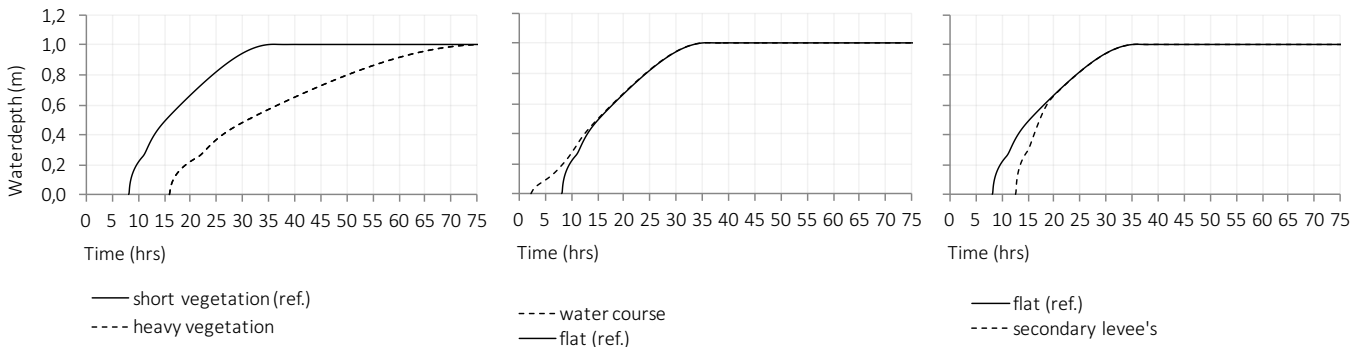
kilometres in width and a measurement point at 5 kilometres from a levee breach. The first tests were done by varying the size of vegetation and adding a watercourse and secondary (inner) levees. Figure 5 illustrates the distribution of flood water, with on the left a flat polder and on the right a polder with the presence of a water course. Heavy vegetation in the test polder delays the time of arrival and flood rise velocity considerably compared to short grass (figure 6-a). The presence of a water course does the opposite, as flood water propagates much faster on water compared to land. The area that will be flooded will receive flood water from a water course hours ahead of overland flow (figure 6-b). Secondary levees or other elevated line elements (e.g. roads) behave in between: the flood water arrives later at the measurement point, but the rise velocity is increased considerably (figure 6-c).



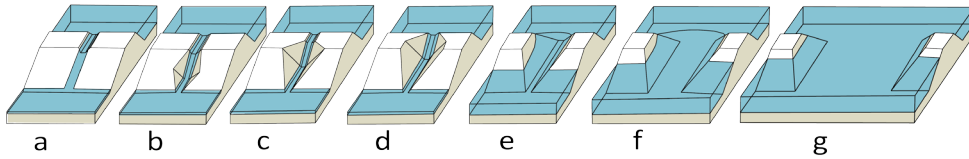
figuur 4: factor of influence on the time of arrival



figuur 5: distribution of flood water, left a flat polder, right a with the presence of a water course



figuur 6: time of arrival and waterdepth a) vegetation b) water course c) secondary levee's.



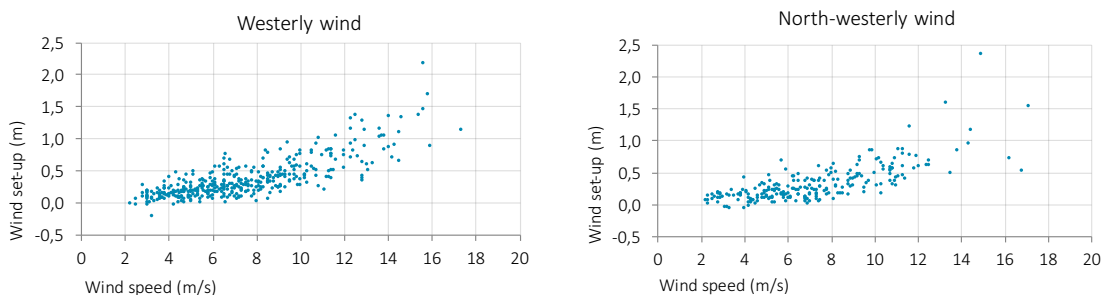
figuur 7: breach growth stages

With a second series of tests, the influence of the size of the levee breach was examined. Breach growth is a difficult process and hard to predict. Hence, there is not yet a single uniform way to describe and calculate breach growth in numerical models. Usually, different stages of breach growth are recognized (figure 7), starting with some erosion in a gully along the inner slope (a-b) followed by erosion causing a decrease of the crest width without a serious increase of the discharge (c-d). As soon as the crest level starts to decrease as well, the flow velocity increases, causing the width of the breach to increase (e-g).

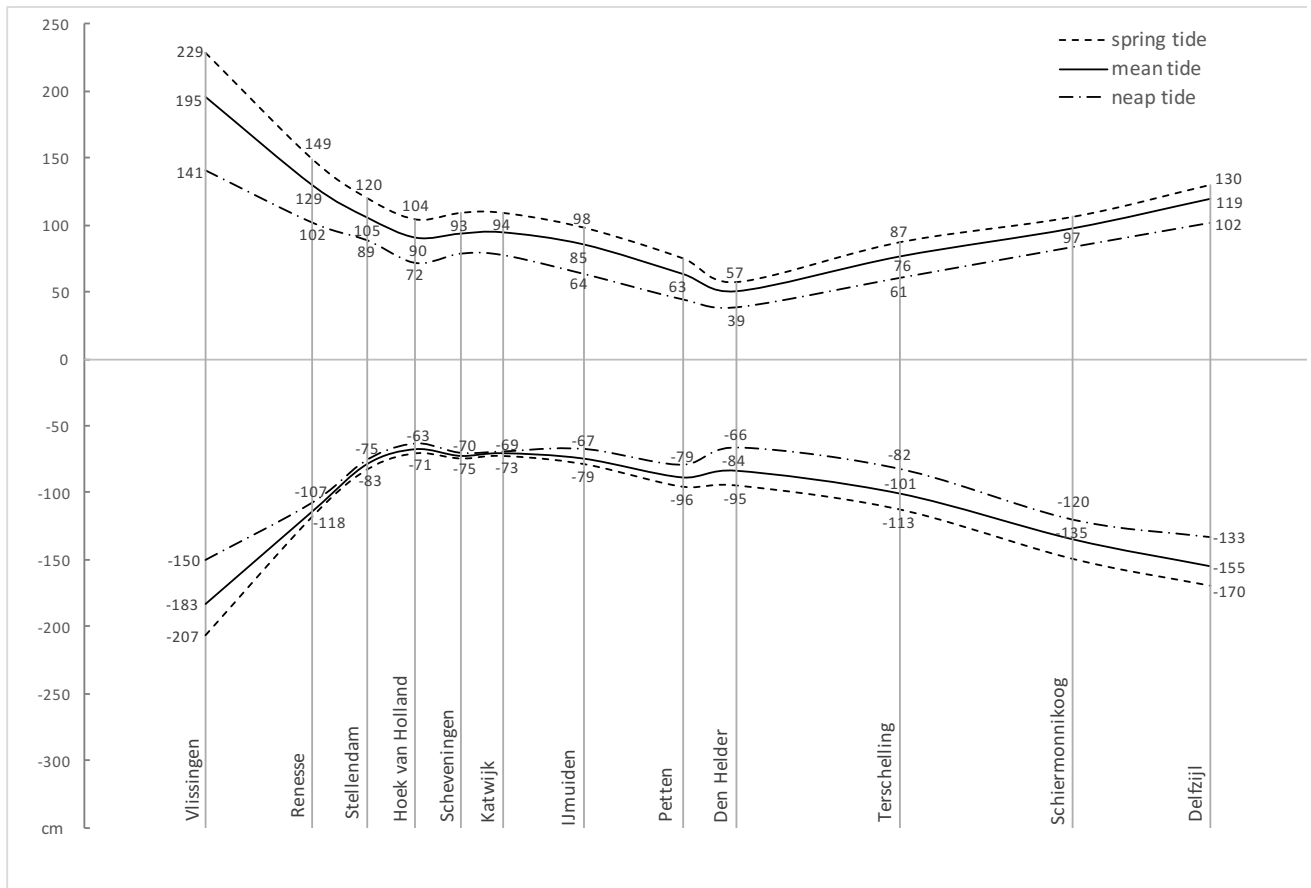
A prediction of the breach growth velocity is difficult to make, as rates of erosion depend on the water level, presence of riprap, core material of the embankment like (boulder) clay or sand, the dimensions of the embankment, the slope of the inner ramp, etc. Figure 10 shows the influence of the arrival time of the flood water for different breach sizes: 50, 100 and 200 meter. These breach values correspond well with the range of breach widths during the big flood in the Netherlands in 1953.

The third factor that influences the time of arrival considerably is the outside water level. The North Sea water levels vary in time through tide and wind. The tidal amplitude along the Dutch coast varies between 2.5 and 0.5 meter (figure 9). The time lag in high tide between Vlissingen in the South and Delfzijl in the north reaches about 10 hours. The height and time of high tide can be well predicted years in advance, as these depend mainly on the position of the moon and earth compared to the sun, which both follow known fixed ellipsoidal patterns. The great unknown, but more important factor, is the wind set-up. Figure 8 shows this wind set-up as a function of the wind speed for westerly and north-westerly winds, as these directions give the largest set-up, due to the shape of the North Sea and the large fetch by wind from these two directions. Figure 11 shows the effect of external water level differences on the arrival time in the test polder.

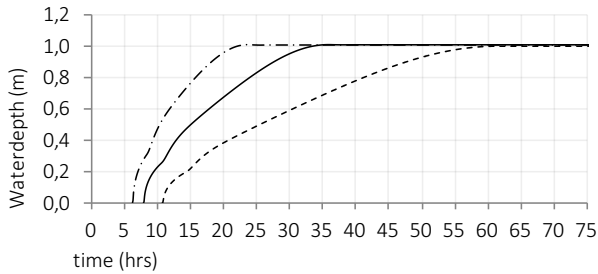
Since landscape components, breach growth and sea water level vary in time and space, they influence each other and are partly unpredictable. A model which calculates a real-time flood should contain all these components in their actual state. Only then a proper computation on the time of flood arrival can be made.



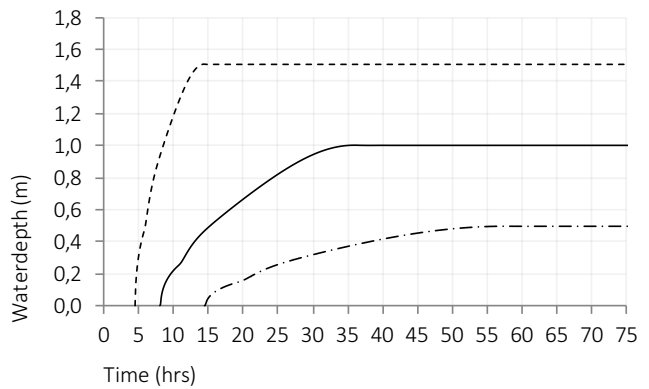
figuur 8: Wind set-up as a function of wind speed.



figuur 9: water level amplitude along the Dutch coast



- 50 m breach
- 100 m breach (ref.)
- 200 m breach



- 1,5 meter
- 1,0 meter (ref.)
- 0,5 meter

figuur 10: time of arrival and waterdepth different sizes breaches

figuur 11: time of arrival and waterdepth different water levels

Flood model of the Netherlands

In this study, a first schematisation of the Netherlands is made that computes 24 hours of flooding in 15 minutes, with the aim show the possibilities for a national flood model. A schematisation of the Netherlands and the North Sea in 3Di was made, within which every levee breach can be added and the resulting 2D-flood is computed instantly. The schematisation consists of a digital terrain model, composed especially for this research (figure 10), and a calculation grid. Floods are calculated with the quadtree-sub grid method in 3Di.

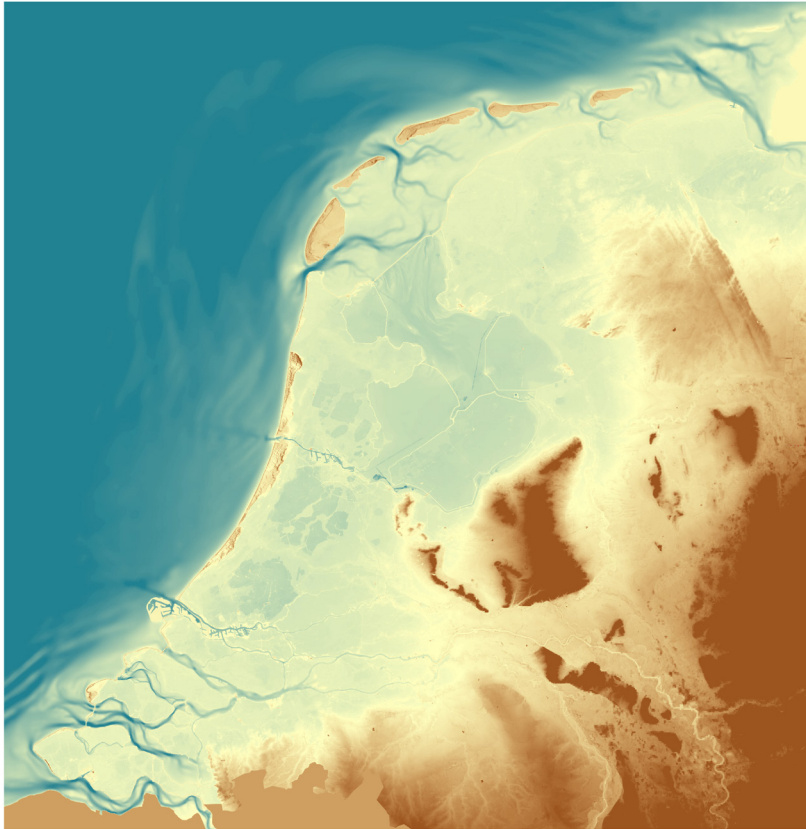
The digital terrain model consist of the following elements:

- Filtered AHN2 data. This is a digital terrain model of the Netherlands at a resolution of 0.5 x0.5 meter. This raster is aggregated to a resolution of 25x25 meter;
- Bathymetry of the North Sea, coastal zones, large lakes and downstream part of the big rivers. To be able to simulate water in 2D, existing measurements by Rijkswaterstaat of the bottom elevations of sea, lakes and rivers are interpolated to the same 25x25meter and used to replace the water surface in the AHN2;
- All elevations at the location of primary levees were added so that they keep their water retaining function resulting from their actual elevation.

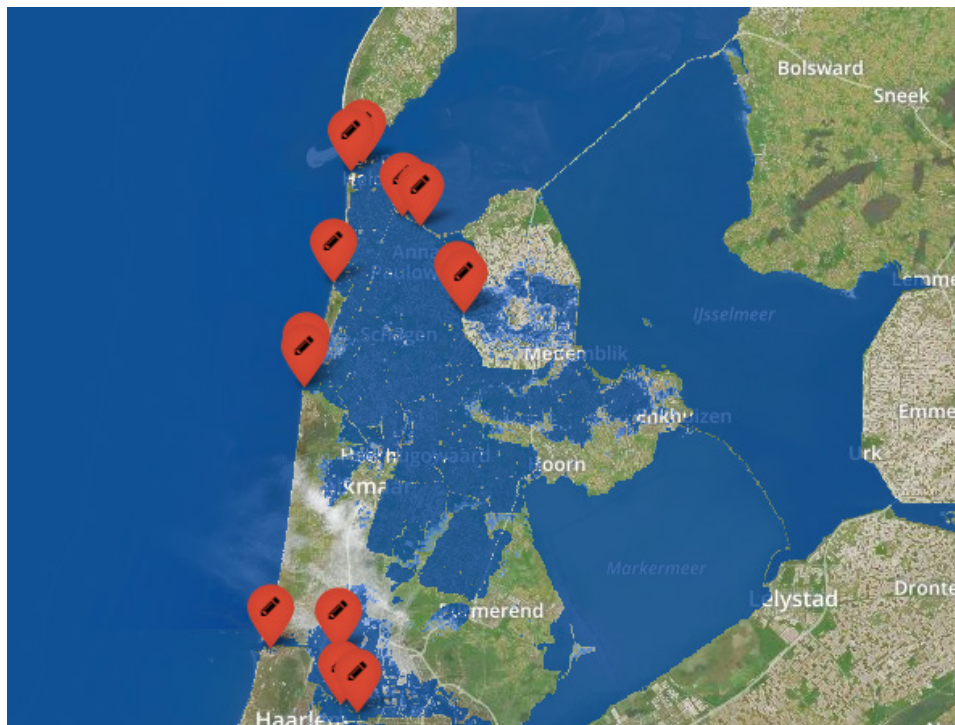
Note that all the important primary embankments along the coast have a smaller resolution compared to flood prone areas more inland. This is necessary to increase the computational accuracy close to the levee breaches.

The model can be used to compute every arbitrary flood in an online environment via the website 3di.lizard.net (figure 11). To calculate a flood, one or multiple levee breaches can be made by lowering the elevation. The current 3Di model is just an initial model. A well elaborated breach growth module is not yet part of 3Di. Next to breach growth, other components need to be investigated and/or developed to improve the schematisation and its predictions: tidal movement, secondary levees and water courses, operational system and flooding from rivers.

The developed model shows it is possible to simulate a large scale flood on a useful resolution and time scale; further model development would be worthwhile. The present model can calculate a 24 hours flood in 15 minutes and would support the crisis partners with a superior insight in the upcoming flood and help them with taking decisions about measures. Naturally, efficient measures do not only depend on a good model simulation. Also co-operation, sharing information, a user interface etc. are of importance. Therefore, further model development should be in close co-operation with crisis partners.



figuur 10: digital elevation model



figuur 11: use interface at 3di.lizard.net

LITERATUURLIJST EN FOTOVERANTWOORDING

Literatuurlijst

- Abily, M., N. Bertrand, O. Delestre, P. Gourbesville, en C.M. Duluc. 2016. „Spatial Global Sensitivity Analysis of High Resolution classified topographic data use in 2D urban flood modelling.” *Environmental Modelling And Software* 77: 183-195.
- Casulli, V. 2009. „A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics.” *International Journal For Numerical Methods In Fluids* 60 (4): 391-408.
- Casulli, V., en G.S. Stelling. 2011. „Semi-implicit subgrid modelling of three-dimensional free surface flows.” *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 67 (4): 441-449.
- Cea, M., en M. Rodriguez. 2016. „Two-Dimensional Coupled Distributed Hydrologic–Hydraulic Model Simulation on Watershed.” *Pure and Applied Geophysics* 173 (3): 909-922.
- Chatterjee, C., S. Förster, en A Bronstert. 2008. „Comparison of hydrodynamic models of different complexities to model floods with emergency storage areas.” *Hydrological Processes* 22 (24): 4695-4709.
- Chow, V. T. 1959. *Open-Channel Hydraulics*. Vol. 5-7, in *Open-Channel Hydraulics*, door Ven te Chow, 108-114. New York: McGraw-Hill civil engineering series.
- Domeneghetti, A. 2016. „On the use of SRTM and altimetry data for flood modeling in data-sparse regions.” *Water Resources Research* 52 (4): 2901-2918.
- Hage, K. 2015. „Atlas van de Watersnoodramp.” 134-135.
- Hanson, G.J., D.M. Temple, S.L. Hunt, en R. D. Tejral. 2011. „Development and Characterization of Soil Material Parameters for Embankment Breach.” *Applied Engineering In Agriculture* 27 (4): 587-595.
- Hanson, G.J., K.R. Cook, en S.L. Hunt. 2005. „Physical modelling of overtopping erosion and breach formation of cohesive embankments.” *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 48 (55): 1783-1794.
- Hervouet, J.-M., en L. Van Haren. 1996. „Recent advances in numerical methods for fluid flows.” In *Floodplain Processes*, door M.G., Walling, D.E. and Bates, P.D. (Eds) Anderson, 183-214. Chichester: John Wiley and Sons.
- Hoes, O.A.C. 2011. „Inundatie van de Wieringermeer in april 1945, Reconstructie van de dijkdoorbraak en overstroming.” *Tijdschrift van waterstaatgeschiedenis*, 62-74.
- Juez, C., A. Lacasta, J. Murillo, en P. García-Navarro. 2016. „An efficient GPU implementation for a faster simulation of unsteady bed-load transport.” *Journal Of Hydraulic Research* 54 (3): 275-288.
- Klingen, L.M., O.A.C. Hoes, en W., & Strijker, J. Schuurmans. 2011. „Historisch onderzoek Wieringermeer met moderne technieken.” *H20*, 14-17.
- Leskens, J. G., M. Brugnach, A. Y. Hoekstra, en W. Schuurmans. 2014. „Why are decisions in flood disaster management so poorly supported by information from flood models?” *Environmental Modelling And Software* 53: 53-61.

- Liang, Q., X. Xia, en J. Hou. 2016. „Catchment-scale High-resolution Flash Flood Simulation Using the GPU-based Technology.” *Procedia Engineering* 154: 975-981.
- Michelazzo, G., E. Paris, en L. Solari. 2016. „On the vulnerability of river levees induced by seepage.” *Journal Of Flood Risk Management*.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat. 2009. „Nationaal Waterplan.”
- Morris, M. 2009. „Breach Initiation and Growth: Physical Processes. Analysis of impact project breach field tests.” HR Wallingford.
- Morris, M. 2009. *Breaching Processes: A state of the art review*. HR Wallingford, Floodsite.
- Morris, M. 2009. „Modelling Breach Initiation and Growth.” *HR Wallingford*.
- Morris, M.W., M.A.A.M. Hassan, T.L. Wahl, R. D. Tejral, G.J. Hanson, en D.M. Temple. 2012. *Evaluation and development of physically-based embankment breach models*. Vol. 49, in *Comprehensive Flood Risk Management*. London: Taylor and Francis group.
- Nortier, I.W., en P. De Koning. 1991. „Toegepaste vloeistofmechanica - hydraulica voor watebouwkundigen.” 429. educaboek.
- Oliver, M. A. 1990. „Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems.” *International Journal of Geographic Information Systems* 4 313-332. <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm>.
- Planbureau voor de Leefomgeving. 2009. *Correctie formulering over overstromingsrisico Nederland in IPCC-rapport*. <http://www.pbl.nl/dossiers/klimaatverandering/content/correctie-formulering-over-overstromomgsrisico>.
- Ramirez, J. A., M. Lichter, T. J. Coulthard, en C. Skinner. 2016. „Hyper-resolution mapping of regional storm surge and tide flooding: comparison of static and dynamic models.” *Natural Hazards : Journal Of The International Society For The Prevention And Mitigation Of Natural Hazards* 82 (1): 571-590.
- Rijkswaterstaat Data-ICT-Dienst. 2013. „Kwaliteitsdocument Actueel Hoogtebestand Nederland.” Delft.
- Rijkswaterstaat. sd. *Dataportaal van de Nederlandse overheid*. <https://data.overheid.nl/data/dataset?tags=LiDAR>.
- . 2016. *LIWO*. <http://professional.basisinformatie-overstromingen.nl/liwo/>.
- Rijkswaterstaat. 1999. „Modelbeschrijving Kuststrook-fijn model, simona-kuststrook- jn-1999-v4.” Lelystad.
- Rijkswaterstaat Projectbureau VNK. 2014. „De veiligheid van Nederland in kaart.”
- Rijkswaterstaat. 2011. „Samenhangende operationele systemen van Rijkswaterstaat.”
- Rijkswaterstaat. 1961. „Verslag over de stormvloed 1953.”
- Roth, L. H., en J. Ludy. 2016. „California's Delta, Levees and Risk.” *Civil Engineering* 86 (9): 70.
- Savage, J. T. S., P. Bates, J. Freer, J. Neal, en G. Aronica. 2016. „When does spatial resolution become spurious in probabilistic flood inundation predictions.” *Hydrological Processes* 30 (13): 2014-2032.
- Slager, K. 2009. „De ramp, Een reconstructie van de watersnood 1953.” In *Een reconstructie van de watersnood 1953*, 135, 333. Olympus.
- Stelling, G. S., en S. P. A. Duinmeijer. 2003. „A staggered conservative scheme for every Froude number in rapidly varied shallow water flows.” *International Journal For Numerical Methods In Fluids* 12 (43): 1329-1354.
- Stelling, G.S. 2012. „Quadtree flood simulations with sub-grid digital elevation models.” *Water Management (The Institution Of Civil Engineers)* 10 (165): 567-580.
- Stichting 3Di. 2016. *3Di Reference Manual*. 3Di.

- STOWA. 2004. „Droogte onderzoek veenkaden: middellange termijn.” Utrecht.
- Stuurgroep Management Watercrises en Overstromingen (SMWO) . 2015. *Landelijk Draaiboek Hoogwater en Overstromingen*. Den Haag: WMCN.
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW). 1999. „Leidraad Zee- en Meerdijken.” Den Haag, 51.
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW). 2001. „Technisch Rapport Waterkerende constructies.”
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW). 1993. „Technische Rapport voor het toetsen van boezemkaden.” Delft.
- Temple. 2005. „Simplified breach analysis model for homogeneous embankment.” Salt Lake City.
- Tsakiris, G., en M. Spiliotis. 2013. „Dam- Breach Hydrograph Modelling: An Innovative Semi- Analytical Approach.” *Water Resources Management* 27 (6): 1751-1762.
- Vacondio, R., F. Aureli, A. Ferrari, P. Mignosa, en A Dal Palù. 2016. „Simulation of the January 2014 flood on the Secchia River using a fast and high-resolution 2D parallel shallow-water numerical scheme.” *Natural Hazards : Journal Of The International Society For The Prevention And Mitigation Of Natural Hazards* 80 (1): 103-125.
- Visser, P. J. 1998. „Breach growth in sand-dikes.” Faculty of Civil Engineering and Geosciences, , Delft University of Technology, Delft.
- Walder, J. S., R. M. Iverson, J. W. Godt, M. Logan, en S. A. Solovitz. 2015. „Controls on the breach geometry and flood hydrograph during overtopping of noncohesive earthen dams.” *Water Resources Research* 51 (8): 6701-6724.
- Zhu, Y., en J. K. Vrijling. 2006. „Breach growth in clay-dikes.” Delft University of Technology, Delft.
- Zijlema. 2012. *Computational Modelling of Flow and Transport*. collegedictaat, TU Delft, Delft: TU Delft.

Fotoverantwoording

- pagina 8: luchtfoto KLM Aerocarto i.o.v Rijkswaterstaat, in Zeeuws Archief
- pagina 10: Watersnoodmuseum
- pagina 20: panoramafoto van Militaire Luchtvaart Dienst, in Zeeuws Archief
- pagina 26: luchtfoto KLM Aerocarto i.o.v Rijkswaterstaat, in archief Watersnoodmuseum
- pagina 42: panoramafoto van Militaire Luchtvaart Dienst, in archief Kadastermuseum
- pagina 54: Kadastermuseum
- pagina 84: Rijkswaterstaat

I. LANDELIJK WATERBEELD

Bron: ontvangen van de LCO, persoonlijke communicatie

5 december 2013 (14.00 uur) | Nummer 2013-03

Landelijk Waterbeeld

In verband met het verwachte hoogwater Noordzeekust en IJsselmeergebied op 5 en 6 december is de LCO opgeschaald naar niveau 2: Landelijke Dreiging binnen de waterkolom.

Weerbeeld

- Stormdepressie trekt vandaag, donderdag 5 december 2013, van west naar oost over de Noordzee
- Hoogtepunt van de wind in de middag en avond, eerst uit westelijke richting, later noordwest
- Midden op de Noordzee 10 tot 11 Bft, mogelijk kortstondig 12 Bft
- Nederlandse kust en IJsselmeer 9-10 Bft, in het noordelijk waddengebied mogelijk kortstondig 11 Bft
- In de nacht naar vrijdag en vrijdag overdag neemt de NW-wind slechts langzaam in kracht af

Het KNMI heeft een weeralarm (code rood) afgegeven voor Noord-Holland, IJsselmeergebied, Waddengebied, Friesland en Groningen. Voor Zuid-Holland, Flevoland en Drenthe geldt een code oranje (waarschuwing extreem weer). Voor de overige regio's geldt een code geel (waarschuwing).

Noordzeekust en benedenrivierengebied

In combinatie met springtij geeft dit weerbeeld vanaf de avond van 5 december verhoogde waterstanden langs de Nederlandse kust. De hoogste waterstanden treden naar verwachting op in het Zuidwesten en uiterste noordoosten van Nederland.

De hoogste waterstanden voor Den Helder en Harlingen worden bereikt op 5 december om respectievelijk rond 22:00 en 23:00 uur. Den Helder bereikt naar verwachting een peil van NAP+ 2,30m en Harlingen NAP+ 3,30m. Voor Harlingen is dit gelijk aan het regionaal alarmeringspeil (NAP+ 3,30m) dat één keer per 5 jaar voorkomt. De verwachte waterstand bij Den Helder ligt onder het regionaal alarmpeil.

Voor Delfzijl wordt om 01:30 op vrijdag 6 december een hoogwater van NAP+ 4,30m verwacht. Dit is een uitzonderlijke situatie die één keer per 10 tot 50 jaar voorkomt. Vanwege het onstuimige weer zijn tijdens overtrekkende buien extreme windstoten mogelijk die nog voor een extra waterstandverhoging van enkele decimeters kunnen zorgen. Hier is echter slechts enkele uren van te voren meer zekerheid over te geven.

Rond 03:30 uur vrijdagochtend wordt een waterstand van NAP +3,80m bij Vlissingen verwacht. Dit is boven het regionaal alarmeringspeil. Een dergelijke waterstand komt circa eens per 10 jaar voor. De Oosterschelde kering sluit rond 23:15 uur.

De Hollandse IJsselkering wordt tussen 21:00 en 22:00 uur gesloten.

Op dit moment wordt een sluiting van de Maeslant- en Hartelkering niet verwacht. De hoge waterstand kan wel overlast veroorzaken. Hierbij kan gedacht worden aan afgesloten wegen en ondergelopen kelders in buitendijkse gebieden in het benedenrivierengebied (langs de Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas en in Zeeland) en langs de kust. Ook bij Dordrecht kunnen de kades van het historische centrum gaan onderlopen.

Lokaal is wateroverlast mogelijk door het sluiten van stormvloedkeringen en het vollopen van de achtergelegen boezems.

IJsselmeergebied

Voor het IJsselmeer is dat verwachte verhoogde waterstanden bij Kampen aanzienlijk zijn verlaagd ten opzichte van gisterochtend 4 december. De windverwachting is iets lager en de windrichting is iets westelijker, hetgeen lagere verwachte waterstanden bij Kampen tot gevolg heeft. Op basis van de windverwachting zal de Ramspolkering mogelijk gesloten worden.

Maatregelen

De Haringvlietsluizen gaan op 5 december extra open (spuien) zolang het water aan de Noordzeekant lager is dan op het Haringvliet. Dit wordt gedaan om de waterstanden op het Haringvliet en achterliggende wateren zoveel mogelijk te verlagen zodat er ruimte ontstaat voor waterbergen van rivierafvoer tijdens hoogwater op zee. De verwachting is dat er 2 tot 3 dagen na de storm extra gespuid zal worden, daarna is de gewenste waterstand in de delta weer aanwezig.

Bij buitendijkse gebieden kan schade ontstaan door zowel waterstand als door golven. Net als in november 2006 in de Wadden is het moeilijk hier lokaal een voorspelling over te doen. Door de windstoten tijdens buien kan de waterstand lokaal decimeters hoger liggen dan de voorspelde waarden.

De waterschappen zijn alle gealarmeerd. Verscheidene waterschappen zijn opgeschaald naar fase 1 of 2 of overleggen daarover. Een aantal waterschappen stelt beperkte dijkbewaking in en neemt andere passende maatregelen zoals het sluiten van coupures en informeren van bewoners van buitendijkse gebieden.

Regionale diensten van Rijkswaterstaat nemen adequate maatregelen. Sluiting in IJmuiden van de Noordersluis wordt niet verwacht. De Zuidersluis en Middensluis van IJmuiden gaan naar verwachting wel dicht evenals de sluisen van Terneuzen.

Communicatie

Het door Rijkswaterstaat verstuurd persbericht van 4 december heeft flink wat opvolging gekregen in de media. Vrijwel alle media berichten over de storm, de verwachte gevolgen en de maatregelen die getroffen worden. Vooral de verwachte sluiting van de Oosterscheldekering levert veel media-aandacht op. Ook is er veel aandacht voor verkeershinder die de storm zal opleveren op de weg in combinatie met pakjesavond. De berichtgeving is veelal feitelijk van aard. Ook is er veel vraag naar feitelijke informatie: "Wanneer gaat welke kering precies dicht". Rijkswaterstaat doet woordvoering voor radio, tv en schrijvende media. Ook op de website Rijkswaterstaat.nl is een dossier over de storm ingericht. Op Social Media is er ook veel aandacht voor de zogenaamde 'Sinterklaasstorm'. Ook in omliggende landen (Engeland, Duitsland, België) is er veel (media-)aandacht voor de storm.

Internationaal

Vanuit Engeland is door de Engelse Rijkswaterstaat (Environment Agency) een verzoek gedaan om tijdens de storm de informatielijnen open te houden. Op dit moment wordt nader uitgezocht wat de vraag en behoefte is. De Engelse Rijkswaterstaat verwacht overstromingen aan de oostkust van Engeland van donderdag op vrijdag. De ergste in 30 jaar. Ze zijn goed voorbereid en lichten de mensen in de bedreigde gebieden en de media al geruime tijd in over de dreiging.

In Duitsland worden ook zeer hoge waterstanden verwacht en zeer zware storm: deze hebben ze de naam orkaanlaag Xaver gegeven. De storm is zwaarder dan die van

afgelopen oktober die toen voor zeer veel schade heeft gezorgd in Noord-Duitsland. In Noord-Duitsland (Niedersachsen en de westkust van Sleeswijk-Holstein) zijn de scholen vandaag gesloten.

EU heeft gevraagd om een totaalbeeld van de situatie. Er wordt een Engelstalig waterbeeld opgemaakt.

Volgend waterbeeld volgt op 6 december.

Contact

Dit bericht voor waterbeheerders is opgesteld door de Landelijke Coördinatiecommissie Overstromingsdreiging (LCO), onderdeel van het Watermanagementcentrum Nederland, onder verantwoordelijkheid van de Landelijk Watermanager.

Voor meer informatie over dit bericht neemt u contact op met de Waterkamer.

E-mail: waterkamer@rws.nl

Telefoon: 0320 - 298888

Internet: www.rijkswaterstaat.nl/waterkamer

Dit is een uitgave van

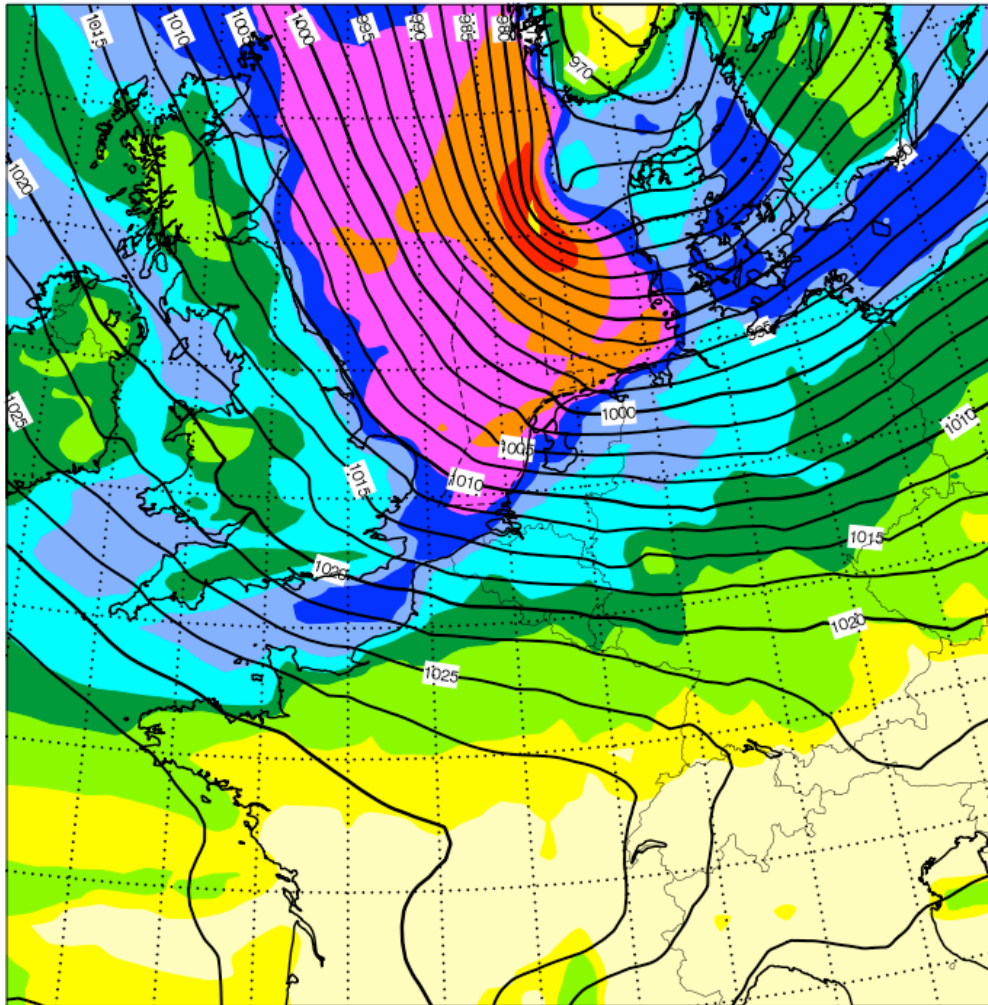
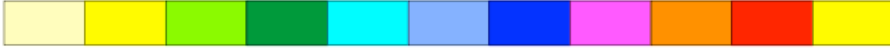
Rijkswaterstaat en de Unie van Waterschappen.
Met medewerking van het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI).

Kijk voor meer informatie op www.rijkswaterstaat.nl
of bel 0800-8002 (ma t/m zo 06.00-22.30 uur, gratis)

Windveld donderdag 5 december 2013 15:00 lokale tijd

HIR_D22 t+8 PMSL_U10 an: 2013120506, fc: Do 5-12 2013, 14UTC

0 7 11 17 22 28 34 41 48 56 64 200



(Paars= 8 Bft, Roze=9 Bft, Oranje=10 Bft, Rood=11 Bft, Wit=12 Bft)

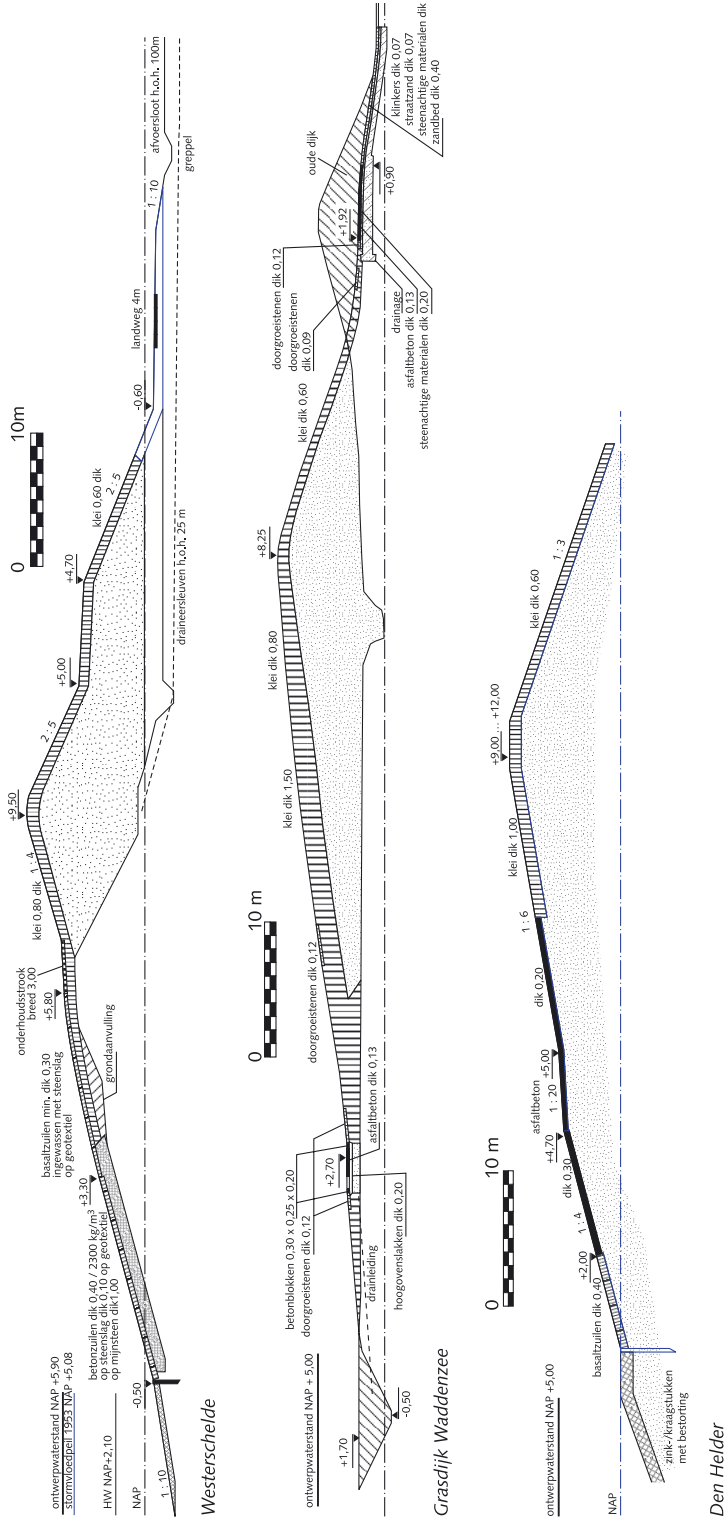
II. HET NUT VAN SNELLE MODELRESULTATEN VOOR DE CRISISPARTNERS

Vragen waarbij het model inzicht kan verschaffen:

- Tot welke tijdstip kunnen we door de coupure blijven rijden en vóór wanneer moet ie dicht?
- Welke binnendijk is straks wel en welke niet hoog genoeg?
- Waar moeten er hoeveel zandzakken op en een geotextiel om het binnentalud te beschermen?
- Wanneer inundeert welke weg (of tunnel) en is ie daarna echt onbruikbaar of is het enkel voorzichtig rijden?
- Hoe groot is uiteindelijk het geïnundeerde gebied?
- Hoeveel erger wordt het als op plek x de dijk ook nog doorgaat?
- In welke volgorde inundeert het gebied? Waar zijn de dichtstbijzijnde droge plekken?
- Wat is het effect van het inzetten van een eventueel aanwezige calamiteitenberging?
- Is grote schade elders te voorkomen door ook nog bewust enkele extensieve polders te inunderen?
- In welke richting kan de bevolking uit het geïnundeerde gebied geëvacueerd worden?
- Wanneer treedt bij welke bres de kentering op?
- Moeten de gemalen in het gebied op volle bak aan of uit?
- Is het zinnig om de BWO-keringen juist dicht te doen of open te laten?

(BWO keringen zijn keringen die ooit zijn aangelegd in het kader van de wet voor Bescherming Waterstaatswerken in Oorlogstijd. Deze wet is in 1991 afgeschaft, maar de keringen zijn nog bruikbaar.)

III. DWARSPROFIEL VAN EEN DIJK



Bron: Technisch Adviescommissie voor de Watekeringen, Leidraad Zee- en Meerdijken, 1999, pag. 51

IV. DIJKDOORBRAKEN VAN DE WATERSNOODRAMP 1953

De watersnoodramp van 1953 is qua omvang en impact de grootste natuurramp in Nederland van de vorige eeuw. Voor het overstromingsmodel van Nederland is het interessant om te achterhalen tot welke breedte deze bressen groeiden. Voor deze bijlage zijn uit 'Het verslag over de stormvloed 1953' van Rijkswaterstaat uit 1961 en de 'atlas van de watersnood 1953' van Koos Hage uit 2015 alle breedtes geïnventariseerd.

Gedurende de rampnacht van 1 februari zijn bij de eerste en tweede vloed op zo'n 377 locaties dijken doorgebroken; 89 groeiden uit tot stroomgaten, 124 zware doorbraken en 173 waren doorgebroken binnendijken. Daarnaast raakte circa 160 kilometer dijk beschadigd. Stroomgaten zijn doorbraken, waarbij door erosie een kuil ontstaat op de plek van de doorbraak. Bij een zware doorbraak is op de plek van de doorbraak de dijk door erosie geheel verdwenen. Bij een lichte doorbraak is er nog een gedeelte van de dijk intact, hierdoor stroomt er bij eb bijvoorbeeld geen water door de doorbraak. Binnendijken zijn dijken tussen polders gelegen binnen de primaire keringen. De binnendijken compartimenteren een eiland in bijvoorbeeld tientallen kleine bakjes. Gemiddeld was van de 89 stroomgaten de bres 90 meter breed, van de 124 zware doorbraken was de bres 110 meter breed en van de 173 binnendijken 80 meter.

Hieronder per eiland de aantallen bressen, gemiddelde bresbreedte en het aantal slachtoffers.

Schouwen Duiveland:

- 25 stroomgaten en 14 zware doorbraken;
- gemiddeld uiteindelijke bresbreedte 50 meter;
- Daarnaast braken er op 20 locaties binnendijken;
- Totaal 537 slachtoffers, vooral in Nieuwerkerk, Ouderkerk en Oosterland.

Goeree Overflakkee:

- 8 stroomgaten en 19 zware doorbraken;
- gemiddeld uiteindelijke bresbreedte 115 meter;
- Daarnaast braken er op 75 locaties binnendijken;
- Totaal 493 slachtoffers, vooral in Oude-Tonge, Nieuwe-Tonge en Stellendam.

Tholen:

- 7 stroomgaten en 2 zware doorbraken;
- gemiddeld uiteindelijke bresbreedte 130 meter;
- Daarnaast braken er op 5 locaties binnendijken;
- Totaal 157 slachtoffers, voornamelijk Stavenisse.

Noord-Beveland:

- 2 stroomgaten en 5 zware doorbraken;
- gemiddeld uiteindelijke bresbreedte 230 meter;
- Daarnaast braken er op 7 locaties binnendijken;
- Totaal 49 slachtoffers in Kortgene.

Zuid-Beveland:

- 9 stroomgaten en 8 zware doorbraken;
- gemiddeld uiteindelijke bresbreedte 170 meter;
- Daarnaast braken er op 7 locaties binnendijken;
- Totaal 97 slachtoffers, vooral in Kruiningen.

Walcheren

- 1 stroomgat en 4 zware doorbraken;
- gemiddeld uiteindelijke bresbreedte 90 meter;
- Totaal 6 slachtoffers.

Zeeuws-Vlaanderen

- 4 stroomgaten en 3 zware doorbraken;
- gemiddeld uiteindelijke bresbreedte 65 meter;
- Daarnaast braken er op 4 locaties binnendijken;
- Totaal 11 slachtoffers.

Noord-Brabant:

- 10 stroomgaten en 25 zware doorbraken;
- gemiddeld uiteindelijke bresbreedte 105 meter;
- Daarnaast braken er op 32 locaties binnendijken;
- Totaal 243 slachtoffers, vooral in Fijnaart, Halsteren, Nieuw-Vossemeer.

Voorne-Putten:

- 1 stroomgat en 9 zware doorbraken;
- gemiddeld uiteindelijke bresbreedte 85 meter;
- Daarnaast braken er op 3 locaties binnendijken;
- Totaal 28 slachtoffers.

Hoekse Waard:

- 18 zware doorbraken
- gemiddeld uiteindelijke bresbreedte 115 meter;
- Daarnaast braken er op 13 locaties binnendijken;
- Totaal 137 slachtoffers, vooral in Numansdorp, Strijen en 's-Gravendeel.

Land van Heusden en Altena:

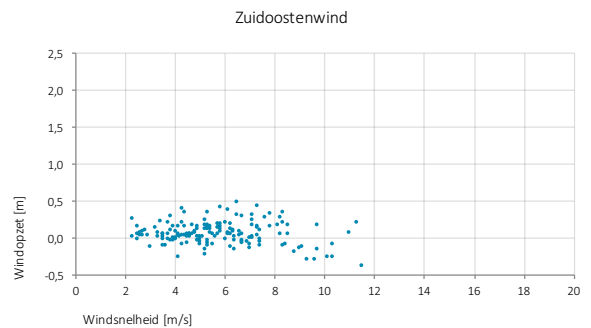
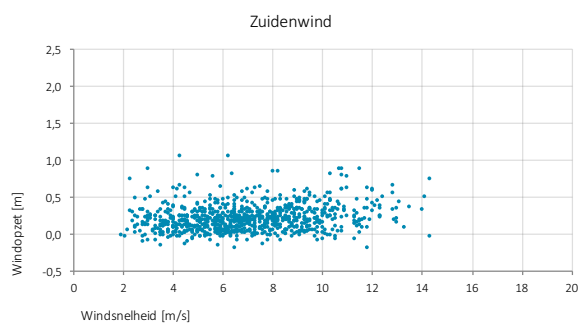
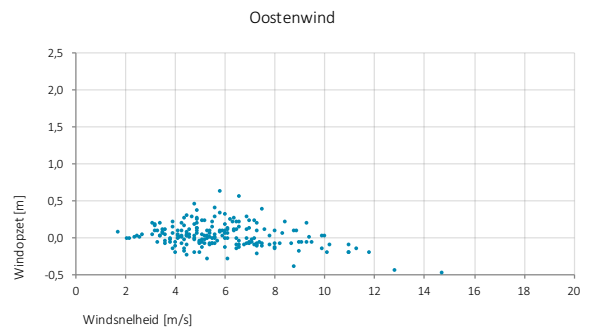
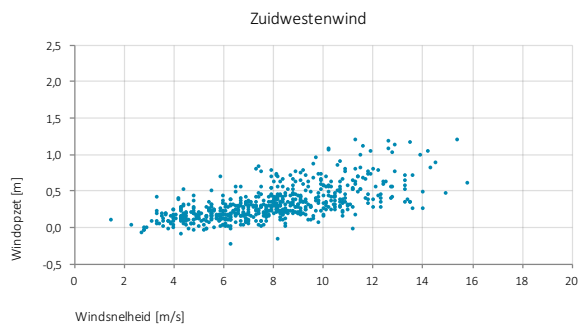
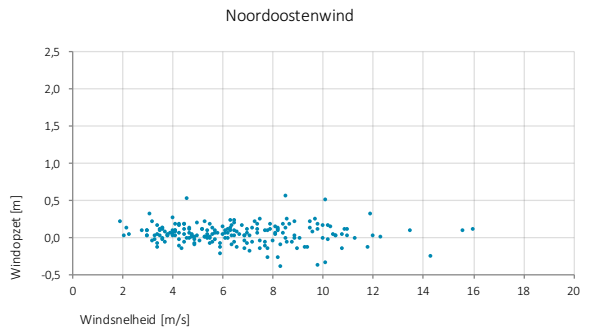
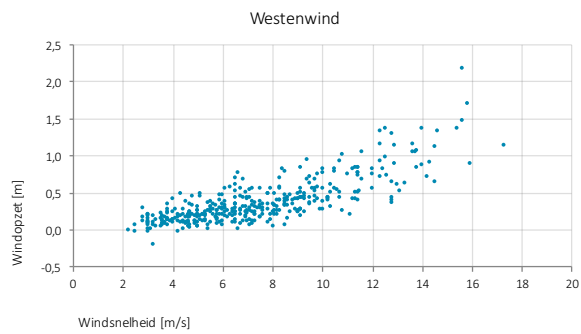
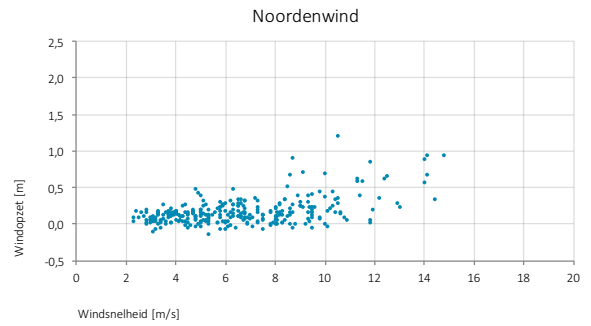
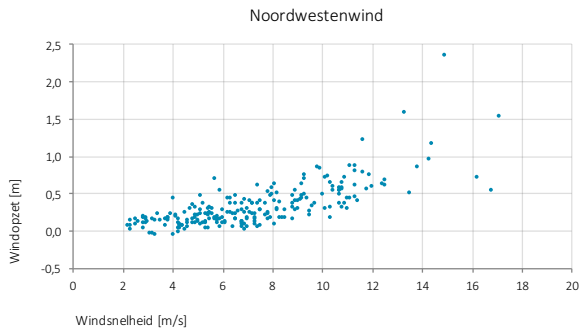
- 4 stroomgaten en 9 zware doorbraken;
- gemiddeld uiteindelijke bresbreedte 65 meter;
- Daarnaast braken er op 5 locaties binnendijken;
- Totaal 6 slachtoffers.

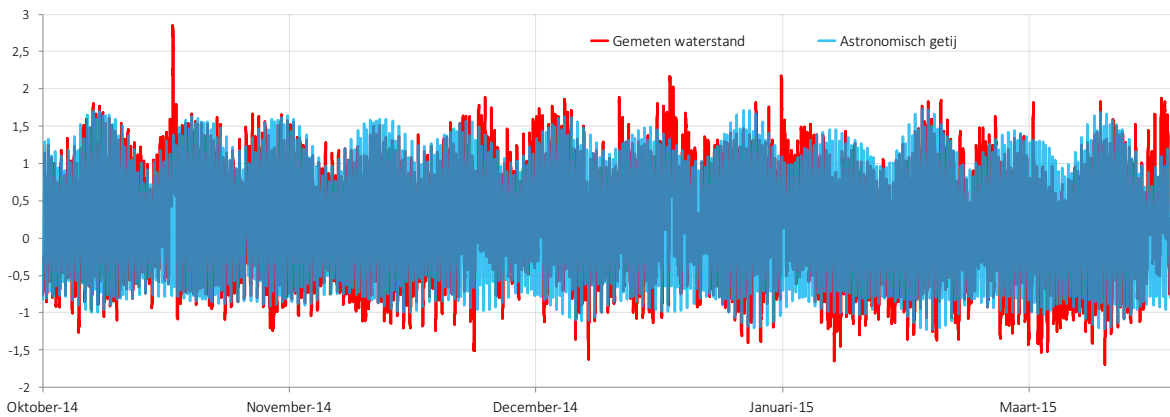
Overigen:

- 9 stroomgaten en 11 zware doorbraken;
- gemiddeld uiteindelijke bresbreedte 100 meter;
- Daarnaast braken er op nog 2 locaties binnendijken;
- Totaal nog 31 slachtoffers plus 6 op Texel.

V. WINDOPZET EN WINDRICHTINGEN

Meetlocatie Haringvliet 10 voor de Zeeuwse kust.





Het astronomisch getij en de gemeten waterstand op meetlocatie Haringvliet 10 voor de Zeeuwse kust tijdens het stormseizoen 2014-2015.

VI. VOORSPELLINGEN VAN WATERSTANDEN

Door Rijkswaterstaat worden de waterstanden op de Noordzee voorspeld. Deze voorspellingen zijn nodig voor de scheepvaart, het spuien van water met spuisluizen, zoals in Katwijk, IJmuiden en Den Helder en ook voor het bepalen of er een overstroming dreigt en het eventueel sluiten van stormvloedkeringen in extreme situaties.

Vanuit Rijkswaterstaat zijn er twee afdelingen die berichtgeving doen over de actuele en verwachte toestand op de Noordzee: het regiokantoor Rijkswaterstaat Zee en Delta maakt vanuit het Hydro Meteo Centrum (HMC) de dagelijkse berichtgeving en de Waterkamer van het Watermanagement Centrum (WMCN) de berichtgeving in extreme situaties. Het team WMCN-kust is verantwoordelijk voor de stormvloedberichten (voorheen de Stormvloed-Waarschuwingsdienst SVSD). Het WMCN-kust team werken hiervoor samen met het KNMI en het Hydro Meteo Centrum. Binnen het WMCN wordt alle informatie van verschillende diensten gebundeld.

De actuele toestand van de Noordzee komt direct vanuit het Landelijk Meetnet Water waarin Rijkswaterstaat 400 meetstations heeft. De meetstations op zee (zie de punten in het figuur) meten iedere tien minuten de waterstand, stroming en golven. Voor het opstellen van de verwachting wordt met behulp van de metingen en meteorologische verwachtingen door hydraulische modellen verwachtingen berekend. Hiervoor wordt het instrumentarium RWsOs-Noordzee gebruikt (Rijkswaterstaat – Samenhangende Operationele Systemen). Dit is een FEWS-systeem ('Flood Early Warning System') van Deltares dat de gegevens inwint, rekenmodellen aanstuurt en de resultaten presenteert aan de gebruiker. Het centrum is dubbel uitgevoerd, zodat bij uitval altijd nog een reserve werkt. RWsOS-Noordzee voert de volgende hoofdtaken uit (Rijkswaterstaat, 2011):

- Inladen meteorologische verwachtingen uit het HIRLAM-model van het KNMI, voor nul tot twee dagen vooruit
- Inladen meteorologische verwachtingen van het Europees Centrum voor weersverwachtingen op de Middellange Termijn (ECMWF) voor een periode van drie tot acht dagen vooruit
- Waterstands- en stromingsberekeningen met het Dutch Continental Shelf Model (DCSM)
- Golfberekeningen met het SWAN-model
- Vergelijking resultaten met andere Noordzeemodellen uit de Europese samenwerking (North West Shelf Operational Oceanographic System- NOOS)
- Presenteren en valideren resultaten

Binnen dit FEWS-systeem zijn verschillende modules, waaronder een stormvloedwaarschuwingsmodule, waarmee het WMCN-kust stormvloedberichten opstelt en onder andere de LCO kunnen informeren. Op vijf basismetstations zijn hiervoor grenspeilen vastgesteld die aangeven wanneer welke waarschuwing wordt uitgegeven.

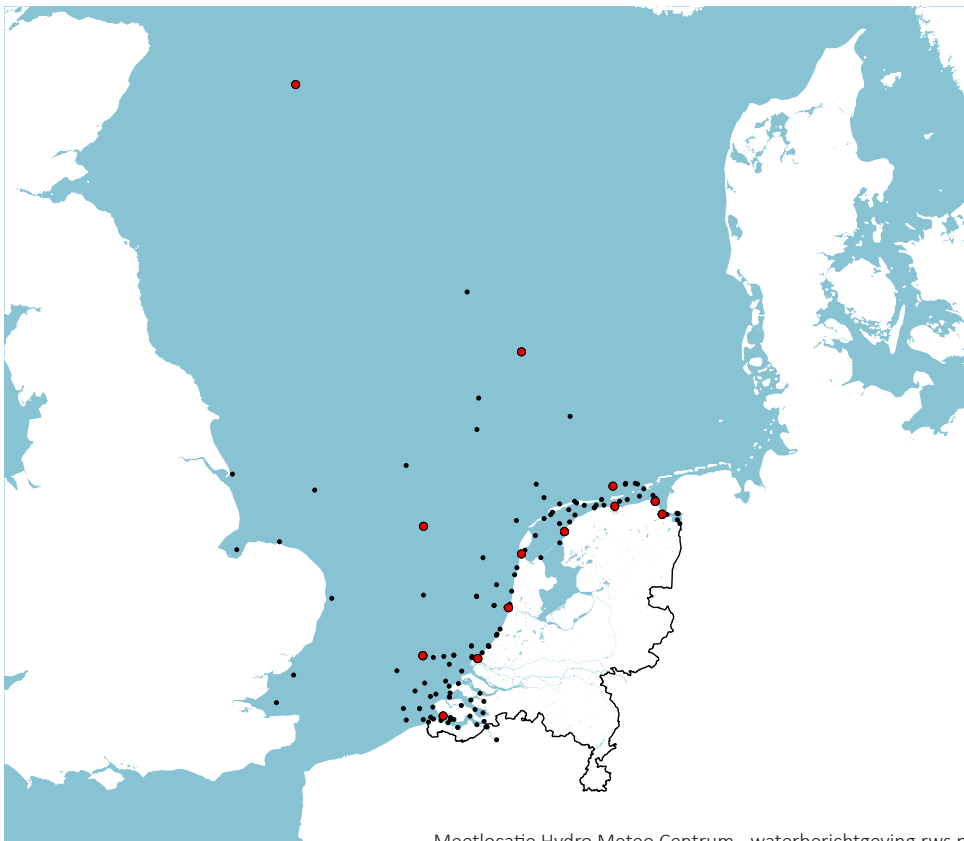
Naast via het FEWS-systeem zelf kunnen dezelfde actuele en verwachte watergegevens benaderd worden via verschillende portals, de belangrijkste twee zijn:

- MATROOS (partners.matroos.rws.nl)
- waterberichtgeving.rws.nl

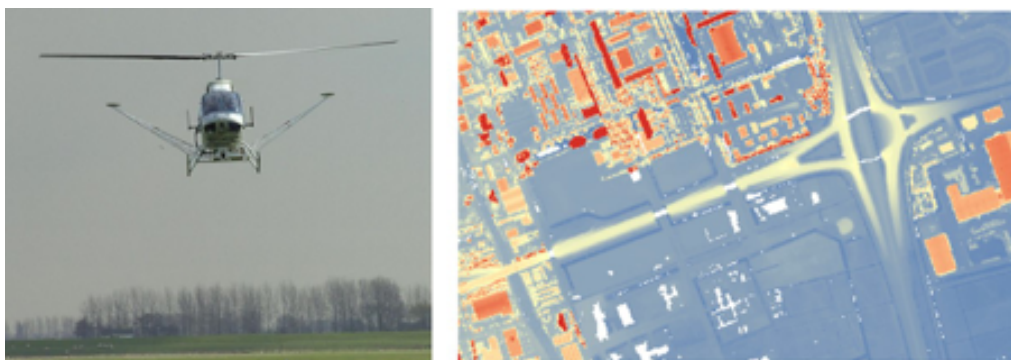
MATROOS is een database ontwikkeld door Rijkswaterstaat waarin alle resultaten vanuit de Europese samenwerking NOOS (North West Shelf Operational Oceanographic System) zijn te raadplegen. Binnen MATROOS zijn meerdere interfaces, waaronder een speciale stormvloedberichtgeving interface (SVSD).

De portal waterberichtgeving.rws.nl is van het Hydro Meteo Centrum van Rijkswaterstaat Zee en Delta. Hier is een tweedaagse verwachting (eindverwachting) voor de meetstations beschikbaar. Deze is gebaseerd op de voorspellingen van het KNMI en een zesdaagse voorspelling op basis van de Europese middellange termijnverwachting. Op waterberichtgeving.rws.nl wordt ook het astronomisch getij en de daaruit volgende windopzet geplot. Daarnaast is er een aparte pagina voor stormvloedwaarschuwing, die ook door het WMCN-kust wordt gebruikt.

Conclusie: Nederland bezit over een uitgebreide structuur voor het bepalen van de actuele en verwachte waterstand op de Noordzee. Voor een overstromingsmodel is het dus mogelijk de actuele en verwachte toestand te gebruiken.



VII. DE AHN EN HUIZEN, BOMEN, AUTO'S



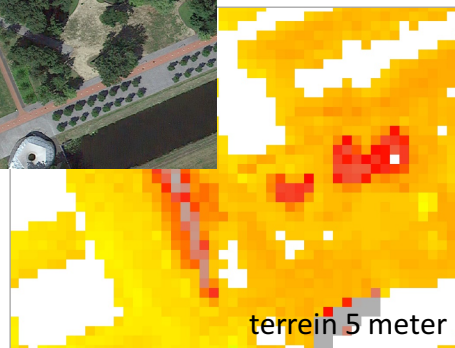
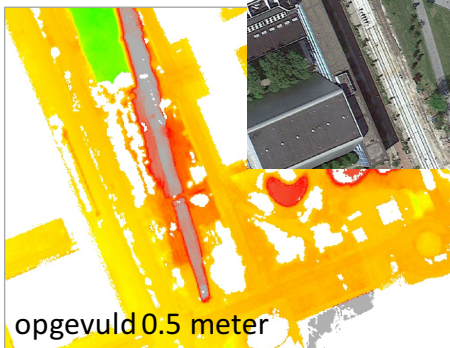
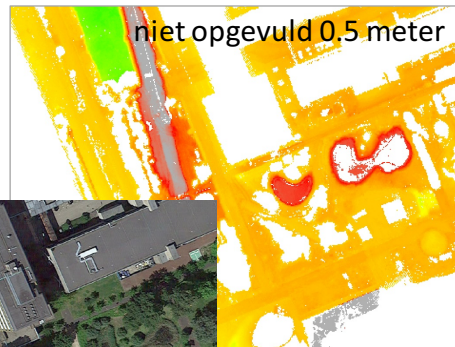
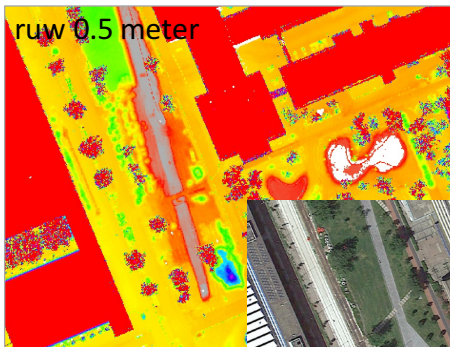
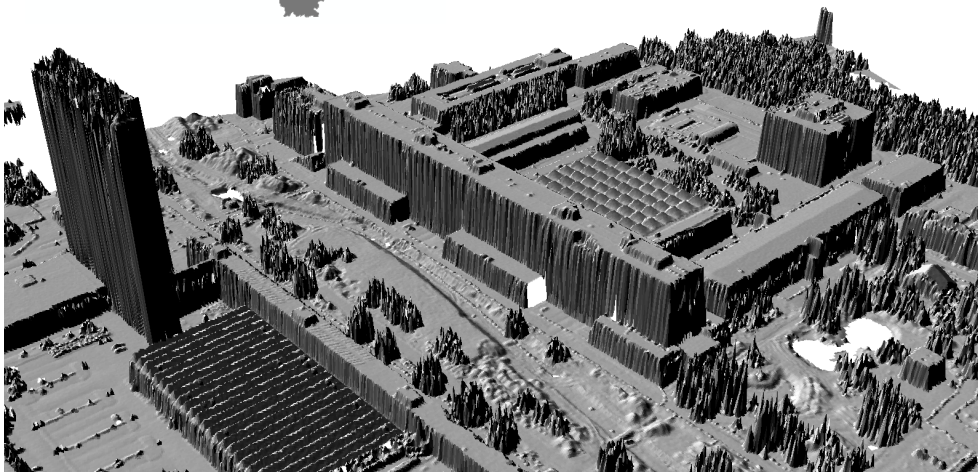
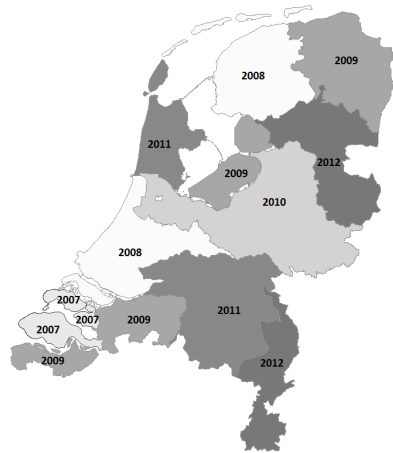
Het Actuele Hoogtebestand Nederland (AHN) is een digitale hoogtekaart die in opdracht van Rijkswaterstaat en de waterschappen om de 5 jaar wordt ingewonnen. Voor het inwinnen wordt met een laseraltimeter onder een helikopter of vliegtuig het landschap gescand. Hierbij wordt de tijdsduur tussen het uitzenden van een puls en de reflectie van deze puls gemeten. De helft van de lichtsnelheid maal deze duur is de afstand. Doordat ook de richting van de puls, de positie van de helikopter en de exacte stand van het platform waarop de apparatuur bevestigd is wordt gemeten, kunnen de coördinaten en de hoogte van het maaiveld op de plek waar de puls gereflecteerd werd worden berekend. Voor het inwinnen wordt op 400 meter hoogte banen gevlogen van 400 meter breed met 100 meter overlap t.o.v. de vorige baan.

De eerste versie: AHN 1

De AHN1 is ingevlogen tussen 1996 en 2003. Het bestand bestond uit 1 punt per 16 m² voor de in de eerste jaren ingevlogen gebieden en 1 punt per m² voor de rond 2003 ingevlogen gebieden. Van dit puntenbestand bestaan twee versies: het complete bestand (hoogtemodel) en een versie waarin alle elementen die geen onderdeel uitmaken van het maaiveld zijn uitgefilterd, zoals bomen, gebouwen, auto's en bruggen (digitaal terrein model). Voor de meeste gebruikers is een puntenbestand met verschillende punt dichtheden niet handig. Door Rijkswaterstaat werd dan ook een rasterbestand met een regelmatig grid gemaakt van 5, 25 en 100 meter. Het 5 meter rasterbestand van de TU-wijk is hierboven rechts weergegeven.

De tweede versie: AHN 2

De AHN2 is tussen 2007 en 2012 ingevlogen. Het bestand bestaat uit 6 tot 20 punten per m². Ook voor dit bestand zijn verschillende bestanden beschikbaar: de complete puntenwolk (incl. bomen gebouwen, auto's etc.), een puntenwolk met enkel maaiveld en verschillende soorten rasters van 0.5 en 5 meter. Van het 0.5 meter raster bestaan drie versies: het ruw raster, het niet opgevulde raster en opgevulde raster. Het verschil tussen ruw en niet opgevuld zijn weer de objecten die geen onderdeel zijn van het maaiveld. Daarnaast nog een 5 meter maaiveld raster. De TU-wijk ligt in kaartblad 37en2. Het ruwe raster is te downloaden van de PDOK website als blad r37en2. Het niet-opgevulde raster als n37en2 en opgevulde raster als i37en2.



De derde versie: AHN 3

De AHN3 wordt van 2014 tot en met 2019 ingevlogen en heeft dezelfde punt dichtheid als de AHN2. Van dit bestand zijn weer een 0.5 en 0.5 meter versie beschikbaar als digitaal terrein model (alleen maaiveld) en digitaal hoogte model (dus inclusief bomen, huizen en auto's). Ook van de AHN3 is de ingewonnen data te downloaden van de PDOK website.

AHN en overstromingsberekeningen

Voor dit afstudeeronderzoek is van de AHN2 het opgevulde rasterbestand van 0.5 meter als vertrekpunt gebruikt. De AHN3 is namelijk nog niet voor heel Nederland beschikbaar. Het ruwe bestand is niet bruikbaar voor overstromingsberekeningen, omdat daar de kruinen van alle bomen als een soort eilanden in het digitale hoogte kaart liggen waar het water dan om heen moet stromen. Het niet-opgevulde en opgevulde bestand geven alleen hoogtepunten van objecten die tot het maaiveld behoren. Het verschil tussen niet-opgevulde en opgevulde rasterbestand is dat voor incidentele losse pixels zonder data een hoogte is geïnterpoleerd uit de hoogtegegevens van de omringde pixels. Gaten met meerdere pixels zonder data zijn niet dicht geïnterpoleerd.

In het opgevulde rasterbestand zijn er op de locaties van de gebouwen, watergangen en auto's geen hoogtegegevens. Voor het gebruik in overstromingsmodellen is wel een dicht geïnterpoleerde rasterbestand met de terreinhoogte nodig. Voor het overstromingsmodel van deze studie is gebruikt gemaakt van het rasterbestand dat door Nelen en Schuurmans als volgt is dicht geïnterpoleerd:

- Binnen de omtrek van de kassen uit de TOP10NL is bepaald of er per kas in die kas meer dan 10 realistische hoogtepunten zijn voor het maaiveld.
 - Als die er zijn: de kas vullen met de mediaan van deze punten;
 - Als er minder dan 10 % punten zijn:
 - › maak een buffer van 1 meter rond de kassen
 - › gebruik de mediaan van deze data als hoogte in de kas.
- Voor gebouwen is om het vloerpeil van een woning te schatten eerst een buffer gemaakt van 1 meter rond de omtrek van elk gebouw volgens het BAG-register. Daarna is de mediaan bepaald van de hoogtedata uit deze buffer en bij deze mediaan is 15 cm opgeteld;
- Voor het oppervlaktewater is de hoogte gevuld met die van het door het waterschap gehanteerde streefpeil;
- Alle overgebleven gaten - met name auto's - zijn dicht geïnterpoleerd met IDW.

Opmerkingen:

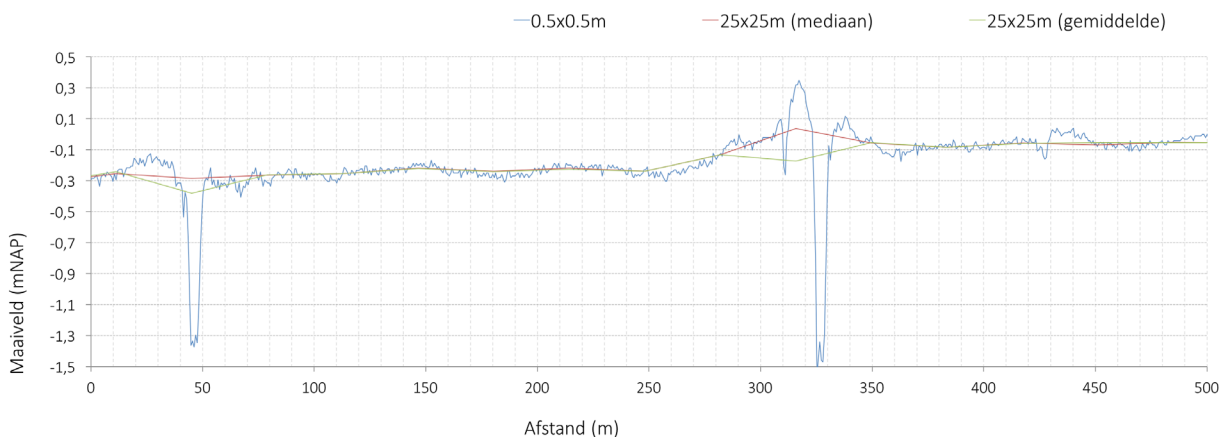
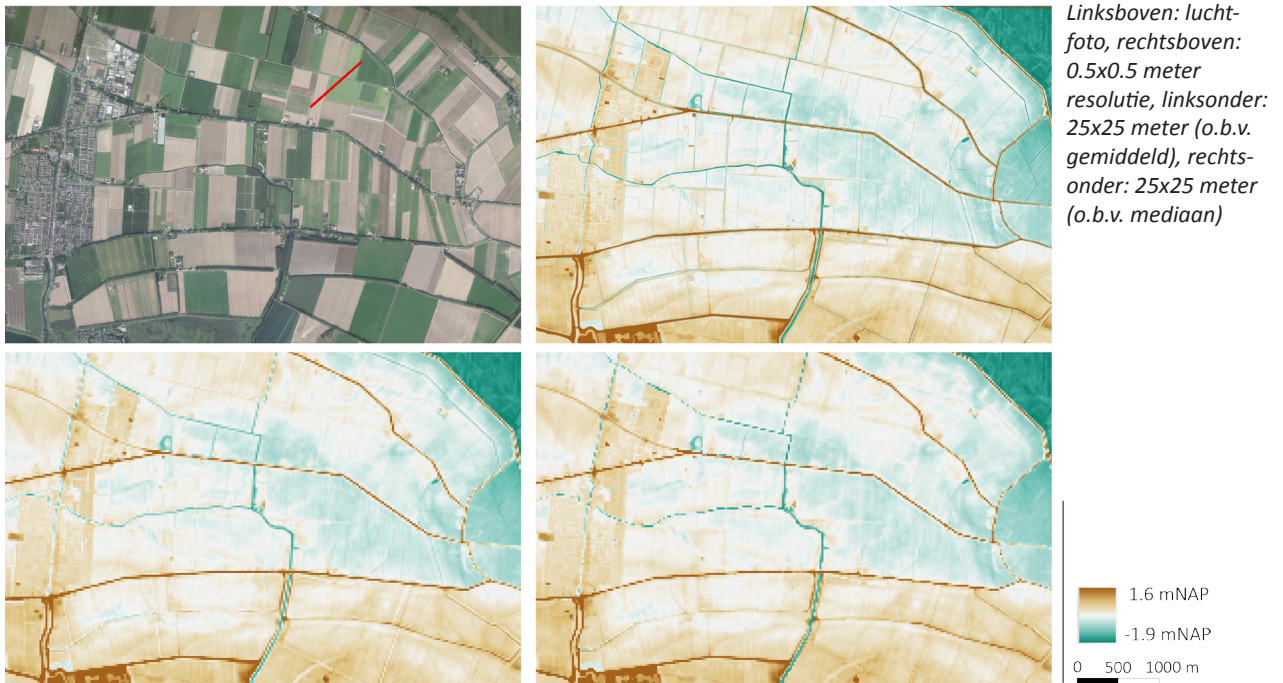
- Bij de kassen zijn soms punten aanwezig van de vloer in de kas, doordat de laserpuls door het dak heen toch een reflectie van het maaiveld heeft waargenomen. Waar mogelijk is van deze punten gebruik gemaakt;
- Door de mediaan te gebruiken (in plaats van het gemiddelde) worden incidentele fouten / outliers niet abusievelijk toch gebruikt om een hoogte te schatten;
- Door gebouwen met de mediaan +15 cm te vullen in plaats van dicht te interpoleren blijft herkenbaar wat de originele gegevens zijn en welke zijn aangevuld.

VIII. MODELDETAILS

AHN2 VAN 0.5X0.5 METER NAAR 25X25 METER

De AHN2 is in het digitale hoogtemodel geaggregeerd van een ruimtelijke resolutie van 0.5x0.5 meter naar 25x25 meter. Onderstaande figuren geven deze aggregatie weer op basis van de gemiddeld waarde (linksonder) en op basis van de mediaan (rechtsonder). Te zien is dat de lijnelementen in het figuur linksonder minder onderbroken worden dan rechtsonder. Om deze lijnelement zo vloeiend mogelijk te houden in het overstromingsmodel is er voor gekozen de AHN te aggregeren op basis van het gemiddelde.

De aggregatie is uitgevoerd met de 'Image reprojection and warping utility' – tool van GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) (<http://www.gdal.org/gdalwarp.html>)



OPBOUW DIGITALE HOOGTEMODEL

De opbouw van het digitale hoogtemodel is grotendeels beschreven in paragraaf 5.2. Hier nogmaals de elementen op een rij, inclusief enkele rasters die in de hoofdtekst niet zijn uitgewerkt.

1. Primaire keringen langs de kustwateren

De primaire keringen zijn de bovenste laag. In paragraaf 5.2 is toegelicht hoe zij zijn geschematiseerd.

2. Waddeneilanden

De Waddeneilanden zijn geen onderdeel van het overstromingsmodel. Om een overstroming op de Waddeneiland te simuleren zou hier een verfijning van het rekenrooster gemaakt moeten worden, volgens de subgrid-quadtree methode. Gekozen is om zoveel mogelijk rekencellen in te zetten voor het vaste land, waar de focus van deze studie ligt.

3. Sluizen, dammen en stormvloedkeringen

In het model is ervan uit gegaan dat bij een landelijke overstromingsdreiging alle sluizen en stormvloedkeringen langs de kust en grote wateren gesloten worden. De volgende keringen zijn dan ook in het hoogtemodel zo ingesteld dat ze 'dicht' staan: Hartelkering, Maeslantkering, Oosterscheldekering, Stichtsebrug, de sluis bij Vlissingen, Haringvlietdam.

4. Bodemprofiel eerste deel rivieren

Bron: geïnterpoleerde x,y,z-punten SIMONA-kustmodel (Rijkswaterstaat)

5. Landsgrenzen

In het model kan alleen water vanuit zee Nederland instromen en niet via België of Duitsland.

6. Maaiveldhoogte (25x25meter)

Bron: AHN2

7. Kustwateren

Bron: geïnterpoleerde x,y,z-punten SIMONA-kustmodel (Rijkswaterstaat); hoogterasters Meetkundige dienst Rijkswaterstaat

Contact:

✉ louiseklingen@gmail.com

[in](https://www.linkedin.com/in/louiseklingen) [linkedin.com/in/louiseklingen](https://www.linkedin.com/in/louiseklingen)

[🐦](https://twitter.com/louiseklingen) [@louiseklingen](https://twitter.com/louiseklingen)

