

# KAART : OVERSTROMINGSGEVAAR

## THEMA : WATER

---

### 1 INLEIDING: BEGRIPSOMSCHRIJVING VAN HET OVERSTROMINGSGEVAAR EN DE WERKMETHODE

Het **overstromingsrisico** wordt aan de hand van twee elementen bepaald:

- het **gevaar**, dat verband houdt met het natuurlijke overstromingsverschijnsel. Is het gevolg van een natuurverschijnsel gekenmerkt door de kans dat een overstroming zich voordoet en de intensiteit ervan;
- en de **kwetsbaarheid** (of **gevolgen**), verbonden met de aanwezigheid van de bevolking of de mate waarin goederen en activiteiten die door de overstroming kunnen worden getroffen, beschadigd of verstoord raken.

De risicocategorie wordt bepaald door het overstromingsgevaar en de gevolgen.

Doel van dit werk is het overstromingsgevaar in kaart te brengen. Het overstromingsgevaar wordt doorgaans gekenmerkt door een intensiteit (de omvang van de overstroming in de zin van waterhoogte, snelheid of duur), en door het optreden ervan in tijd of ruimte. De kans dat een overstroming zich voordoet in de tijd hangt af van uitlokkende factoren zoals neerslag. Het overstromingsgevaar kan zowel kwalitatief (verwaarloosbaar, zwak, sterk) als kwantitatief (terugkeerperiode<sup>1</sup> van 100 jaar, 30 jaar, 10 jaar) berekend worden. Als we voor een willekeurig punt in de ruimte de overstromingsintensiteit en de kans op een overstroming in de tijd willen bepalen, zijn we verplicht behoorlijk complexe hydrologische en hydraulische modellen op te stellen zodat we de statistische neerslaggegevens kunnen verbinden met de overstromingskenmerken die daaruit voortvloeien. Op gewestelijk niveau bestaan deze modellen nog niet (we herinneren eraan dat we uitgaan van het volledige grondgebied en niet enkel van de gebieden langs de rivieren).

De kans dat een overstroming zich voordoet (of optredingskans) in de ruimte, wordt dan weer bepaald door aanlegfactoren of de gevoeligheidsfactoren voor overstromingen. In dit werk baseerden we ons op deze optredingskans in de ruimte, rekening houdend met de aanlegfactoren op het Gewestniveau. Dit is de afstand tot de hydrologische assen (het feit om zich in de hydrologische as of ter hoogte van een as te bevinden), de aard van de bodem (vochtig, sedimentair) en de ondoordringbaarheid van de bodem stroomopwaarts.

De intensiteit van het overstromingsgevaar zal in dit geval niet worden uitgedrukt als terugkeerperiode of waterhoogte (waarvoor ter herinnering hydrologische en hydraulische modellen over het volledige

---

<sup>1</sup> De terugkeerperiode geeft de statistische periode aan tussen twee gebeurtenissen van een natuurverschijnsel met een bepaalde intensiteit. De terugkeerperiode van een verschijnsel wordt gedefinieerd als het omgekeerde van de frequentie waarmee het verschijnsel optreedt: een terugkeerperiode van 10 jaar stemt dus overeen met een frequentie van 1/10 per jaar (over een lange en homogene statistische reeks). Regenval met een korte terugkeerperiode komt dus vaker voor dan regenval met een lange terugkeerperiode.

grondgebied nodig zijn), maar door te verwijzen naar het percentage historische overstromingswaarnemingen voorgekomen voor een gelijkwaardig of lager gevoeligheidsniveau.

Onderhavige nota verstrekt nadere toelichtingen bij de methodologie die toegepast is voor het opstellen van de overstromingsgevaarkaart en de resultaten ervan.



## 2 SAMENVATTING VAN DE METHODOLOGISCHE NOTA

Voor het Brussels Hoofdstedelijk Gewest moeten zowel de overstroming van de waterlopen als van de riolering in aanmerking genomen worden bij de analyse van de overstromingsrisico's. De risicocategorie wordt bepaald door het overstromingsgevaar en de gevolgen. Doel van dit werk is het overstromingsgevaar in kaart te brengen. Ieder perceel van het grondgebied heeft naargelang de ligging in het stroomgebied een specifieke gevoeligheidswaarde voor regenval van verschillende intensiteit en duur. Helemaal boven in het stroomgebied veroorzaken zware onweders een zogenaamde stortvloed. Terwijl in de lager gelegen winterbeddingen van de rivieren het veeleer aanhoudende regenperiodes zijn die uitgestrekte overstromingen veroorzaken doordat waterlopen buiten hun oevers treden.

We gingen over tot een eerste "in extenso" overstromingsrisicoanalyse, m.a.w. we strekten de risicozone (bepaald op basis van de geografische eigenschappen die de overstromingsgevoeligheid van de percelen bepalen) zodanig uit dat we de zones waarvoor we over historische overstromingswaarnemingen beschikken tussen 1997 en 2012, maximaal konden insluiten (meer dan 7450 adrespunten van het Rampenfonds, van gegevens van de brandweer en uit de gegevensbank van VIVAQUA). Het komt erop aan een maximum van historische overstromingswaarnemingen te dekken en daarbij zo sterk mogelijk in te zoomen op het bedreigd gebied, maar gelijktijdig het gebied niet te groot te maken wat afbreuk zou doen aan de relevantie. Die studie die actueel gebaseerd is op een geografische benadering, moet worden verfijnd door een hydrologische en hydraulische studie waarvan de complexiteit met de modelmogelijkheden toeneemt.

De lokalisatie van de historische overstromingswaarnemingen is slechts een op één gegeven gericht dat zich doorgaans in een bewoond gebied bevindt (daar waar het risico op een gevolg kan inwerken). De overstromingsgevaarkaart moet daarentegen een in de ruimte continu gegeven zijn dat de contouren van de overstromingszones, zowel in bewoond als in onbewoond gebied, afbakent. De methode bestaat er dan ook in zich te baseren op een reeks gevoeligheidsfactoren afgeleid van geografische informatie die voor ieder punt van het grondgebied gekend is (het reliëf, de ondoordringbaarheid van de bodem en het bodemtype). Die aanlegfactoren zijn:

- **de overhangfactor:** deze factor duidt initieel aan op welk punt een plaats boven de rivierbodem (of dalweg) uitsteekt en dus aan een overstroming ontsnapt. Het tegengestelde daarvan wordt gebruikt als gevoeligheidsfactor. Deze factor brengt de gebieden onderin de vallei aan het licht die nauwelijks uitsteken ten opzichte van de dalweg en dus gemakkelijk overstromen.
- **de topografische vochtigheidsfactor (TWI):** De TWI is een klassieke index die het effect van de topografie op de hydrologische processen kwantificeert (onder meer bodemverzadiging). Deze index toont de relatief vlakke en omwille van hun ligging in het stroomgebied, de natuurlijk vochtige zones aan.
- **de factor verstedelijkt gebied:** deze factor geeft aan dat naarmate de oppervlakte stroomopwaarts van een perceel meer is verstedelijkt, de hoeveelheid afvloeiend water dat erdoorheen stroomt tijdens een natuurverschijnsel toeneemt. Deze index wijst dus de gebieden stroomafwaarts aan waar de afvloeiing het sterkst is geconcentreerd.
- **de bodemfactor:** een bodem met een kleine korrelgroottefractie laat water minder gemakkelijk insijpelen en geraakt dan ook in de eerste plaats verzadigd; ook sporen van alluviale afzettingen houden wellicht verband met overstromingen uit een ver verleden.

Om het overstromingsgevaar op een genuanceerde wijze te kwantificeren moeten die verschillende aanlegfactoren onderling worden samengevoegd. Die verschillende aanlegfactoren staan niet los van elkaar en uiteraard zullen de meeste dal zones bij de verschillende factoren naar voor komen omdat hun gevoeligheid enkel nog wordt versterkt. Iedere aanlegfactor, met bij aanvang een heel specifieke

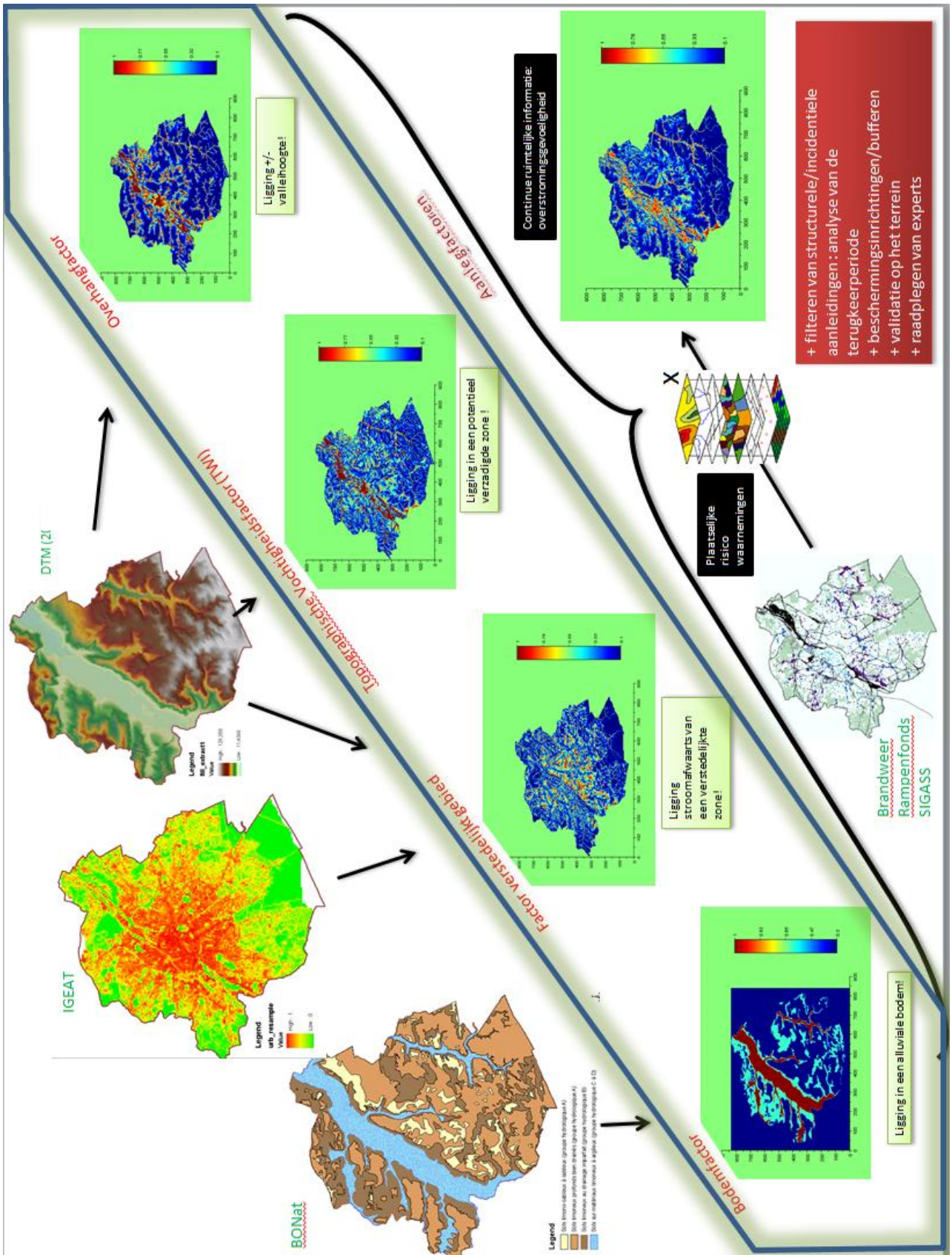


eigen eenheid, wordt gecombineerd met een niet-dimensionele waarde die varieert van 0.1 (gunstig) tot 1 (ongunstig). Dit gebeurt door middel van een lidmaatschapsfunctie samengesteld op basis van de statistische gegevens omtrent de waarneming van overstromingen. Deze niet-dimensionele aanlegfactoren worden vervolgens onderling vermenigvuldigd en zodanig herwerkt dat er een resultaatwaarde ontstaat (de intensiteit van het gevaar of *de overstromingsgevoeligheid*) die ten aanzien van de historische overstromingswaarnemingen kan worden geïnterpreteerd. Als men voor een bepaalde plaats een waarde voor de overstromingsgevoeligheid bekomt gelijk aan 0.8, betekent dit dat het gevoeligheidsniveau (vertegenwoordigd door het product van de niet-dimensionele aanlegfactoren) van 80% van de locaties waarvan is geweten dat ze tussen 1999 en 2009 overstromden (Rampenfonds), even ongunstig was als de situatie van deze betreffende plaats.

De gecombineerde analyse van de overstromingsgevoeligheid en het voorkomen van overstromingen die bij het Rampenfonds werden aangegeven, zetten ons ertoe aan de pixels waar de overstromingsgevoeligheid groter is dan 0,4 als bedreigd gebied te benoemen. Met een tolerantie van één pixel (grootte van 20m) op de lokalisatie van de overstromingen, controleren we aldus 80 % van de waarnemingen waarvan de waarde van het weerkerend karakter groter is dan of gelijk aan 1x in 10 jaar en meer dan 96% van de waarnemingen met een waarde van het weerkerend karakter groter dan of gelijk aan 2x in 10 jaar.

Bovenstaande methode is een globale, maar vereenvoudigde benadering van de werkelijkheid. De contouren van de bedreigde gebieden die met de hiervoor beschreven methode werd afgebakend, werden voor verdere verfijning aan deskundigen op het terrein voorgelegd (gemeenten, de beheerders van de riolen en van het Kanaal). In die fase werden de resultaten van onderhavige methode geëxploiteerd als uitgangspunt voor een werkelijke omschrijving van het bedreigd gebied. Op dat ogenblik werden ook gegevens van het terrein opgenomen die niet voorkomen in de oppervlaktetopografie zoals de aanwezigheid van stormbekkens of van beschermende dijken.





## 3 INLEIDING

### 3.1 Het overstromingsverschijnsel

*Een overstroming is het buiten zijn oevers treden van een doorgaans sterk overstroomde waterloop waarbij omliggend land onder water komt te staan. Vaak wordt deze term ook gebruikt om het "buiten de oevers" treden van kunstwerken zoals waterreservoirs of rioleringen aan te duiden. Ook stroomopwaarts van waterlopen kunnen er overstromingen ontstaan, wanneer bijvoorbeeld er grote hoeveelheden water afvloeien over ondoordringbare bodem. Voor het Brussels Hoofdstedelijk Gewest werd besloten dat bij de analyse van de overstromingsrisico's zowel het buiten de oevers treden van waterlopen als van rioleringen in aanmerking moeten worden genomen. Dat betekent dat het volledige grondgebied wordt bestreken en dat daarbinnen meer nauwkeurige gebieden met significant overstromingsgevaar moeten worden afgebakend.*

### 3.2 De pluviometrie

Voor het Brusselse grondgebied kunnen we twee grote types regenval onderscheiden die voor problemen zorgen: de lente-zomeronweders en de langdurige regenval in de herfst-winterperiode.

Voor een verstedelijkt grondgebied dat zich helemaal bovenin het stroomgebied bevindt, veroorzaken vooral hevige onweders hoogwater, wanneer grote hoeveelheden water snel afvloeien. Grote hoeveelheden afvloeiend water ontstaan doordat het water vergeleken met de intensiteit van de regenval minder snel in de bodem dringt en het afvloeiend water tegen hoge snelheid samenstroomt in het rioleringsstelsel. Dergelijke vloed is heel lokaal, komt en gaat weer snel en kan zware schade aan de infrastructuur aanrichten. Precies dat gebeurde in augustus 2011 toen een heel plaatselijk, kort maar hevig onweer losbrak.

Voor een gebied dat zich in de overstromingsvlakte (of winterbedding) van de rivieren bevindt, zijn het doorgaans aanhoudende regenperiodes die uitgestrekte overstromingen veroorzaken doordat waterlopen buiten hun oevers treden. Oorzaak van het stijgende water is de verzadiging van de bodems stroomopwaarts waardoor water niet meer kan infiltreren. Het water stijgt geleidelijk waarbij water over de oevers stroomt en in de alluviale vlakte komt te staan. Dit is een natuurlijk proces eigen aan rivieren dat door ingrijpen van de mens nog kan worden versterkt als hij het gebied stroomopwaarts waar het water kan stijgen te veel wordt ingeperkt. Dergelijke vloed deed zich voor in november 2010 na een bijzonder regenachtige herfst, waarna sneeuw en vorst het infiltratievermogen van de bodem nog verder beperkten. Dat zorgde ervoor dat de Zenne en het Kanaal dat aan Wallonië, Vlaanderen en Brussel grenst buiten hun oevers traden.

Als algemene regel geldt dat de duur van de kritieke regenval verder stroomafwaarts van het stroomgebied afneemt en de intensiteit ervan vermindert (statistisch gezien neemt de intensiteit van kritieke regenval af met de duur). Ieder perceel van het grondgebied kent dus een specifieke gevoeligheid voor regenbuien waarvan de intensiteit en de duur variëren, volgens de locatie ervan binnen het stroomgebied. Dat gegeven moet worden opgenomen in de studie van regenval met variabele duur. We kunnen ons onmogelijk beperken tot de analyse van een of ander omvangrijk voorval.

### 3.3 De overstromingswaarnemingen, een rechtstreekse informatie, maar heel plaatsgericht

We haalden onze overstromingswaarnemingen bij vier verschillende bronnen:

- een rapport van de Provincie Brabant met de namen van de straten die tussen 1900 en 1970 onder water kwamen te staan,



- een lokalisatie per adres waar de brandweerdiensten tussen 1997 en 2009 tijdens overstromingen voor onder meer het leegpompen van kelders en het vrijmaken van verstopte rioolputten optraden,
- een lokalisatie per adres van de dossiers overgemaakt aan het Rampenfonds in verband met de overstromingen tussen 1999 en 2009,
- een lokalisatie per adres van de waarnemingen gemeld aan de beheerder van het rioleringsnet (Databank SIGASS Flood) tussen 1992 en 2012.

Die overstromingswaarnemingen zijn om uiteenlopende redenen niet exhaustief:

- een gebied staat onder water, maar niemand meldt dit omdat niemand rechtstreeks is getroffen (bijvoorbeeld overstroming in niet bebouwd gebied)
- een gebied staat onder water, maar de getroffen personen doen geen beroep op het Rampenfonds, de brandweer of de beheerder van het rioleringsnet.
- een gebied kan in theorie niet onder water komen te staan; in de praktijk is dat gebied niet overstromd omdat er reeds (privé of collectieve) beschermingsmiddelen bestaan.

Bovendien wordt de lokalisatie van de overstromingen vaak te vaag gemeld (dat is het geval wanneer men enkel over de straatnaam beschikt en niet over het huisnummer) en de omvang van de overstroming nooit wordt gemeld.

Kortom, het is niet omdat er voor een bepaald gebied geen overstromingswaarneming bestaat, dat dit gebied ook daadwerkelijk gespaard blijft. In de realiteit beschikken we over heel wat nuttige, maar heel plaatselijke, informatie die samenhangt met de aanwezigheid van een gevolg en bovendien ook onvolledig is. De kaart zou dus opnieuw moeten worden beoordeeld naarmate er nieuwe kennis wordt vergaard.

Daarnaast moet er ook een onderscheid worden gemaakt tussen de terugkeerperiode van de overstroming: herhaaldelijk of occasioneel. Er kan zich een toevallig probleem voordoen (zoals de aanwezigheid van een obstructie in het afvoergebied), waardoor een gebied dat a priori nooit zou overstromen alsnog onder water komt te staan.

### 3.4 Het overstromingsgevaar, continue, maar onrechtstreekse informatie

Per definitie weten we dat we ons in overstromingsgebied bevinden wanneer het gebied eerder al eens onder water kwam te staan. Dat gezegd vormt de lokalisatie van de overstromingswaarnemingen doorgaans een plaatselijke informatie (in de zin van een uniek punt in de ruimte); hoewel de gevaarkaart een continu gegeven in de ruimte moet vormen. We wensen inderdaad de overstromingscontouren af te bakenen en niet enkel de overstroming te situeren ten opzichte van een bepaald gehucht of een bepaald adres. Daarom moet de analyse tot alle punten van het Gewest worden uitgebreid. Daarvoor wordt een reeks factoren gebruikt die de aanleg voor overstroming aangeven en die wordt afgeleid van informatie die over alle punten is gekend. Door de aanlegfactoren vervolgens onderling te combineren, wijzen we aan ieder punt van het grondgebied een waarde toe die de intensiteit van het gevaar kwantificeert en met de term *overstromingsgevoeligheid* wordt aangeduid. Die combinatie gebeurt zodanig dat de bedreigde gebieden die op basis van de analyse van de overstromingsgevoeligheid werden afgebakend, aansluiten bij de overstromingswaarnemingen. Samengevat kunnen we de overstromingsgevaar voor elk punt kwantificeren, op basis van de ruimtelijke continue informatie en na een ijkingsproces dat uitgaat van de vergelijking tussen de voorspelde gevaar gebieden binnen alle punten en de plaatselijke overstromingswaarnemingen.



### 3.5 De aanlegfactoren, op basis van ruimtelijk continue informatie

Intuïtief wordt niet betwijfeld dat een gebied gevoelig is voor overstroming als:

- Men zich op het laagste punt van een dal bevindt (zie overhangfactor, in §4),
- in een relatief vlak gebied (zie hellingsfactor, in §4),
- en meer bepaald in een gebied dat van nature vochtig is door de ligging binnen het stroomgebied (zie topografische vochtigheidsfactor, in §4)

Die factoren kunnen rechtstreeks worden afgeleid uit de topografie (het **Digitaal HoogteModel** uit LIDAR 2012 vlucht van het CIBG, samengevoegd in een resolutie van 20 m en vermengd in het **DHM** van het NGI met een resolutie van 20 m vormde onze gegevensbron). De topografie oefent een eersterangscontrole uit op de ruimtelijke variaties van de hydrologische omstandigheden (vochtigheid van de bodem, oriëntatie en opstapeling van het afvloeiend water en de ondergrondse afvloeiing).

Bovendien weet men dat men zich in een gebied bevindt dat gevoelig is voor overstroming als:

- men zich stroomafwaarts van een uitgestrekte oppervlakte bevindt, te meer wanneer die sterk is verstedelijkt (zie factor verstedelijkt gebied, in §4)

Dit gegeven is afgeleid van de topografie en van het gewestelijk cijfer toegekend aan de ondoordringbaarheid van de bodem (de studie van IGEAT over de verstedelijkingsgraad in 2006, volgens een resolutie van 0,6 m samengevoegd met een resolutie van 20 m, is onze gegevensbron)

Tot slot weet men dat men zich in een gebied bevindt dat gevoelig is voor overstroming als:

- De bodem bestaande uit alluviale afzettingen getuigen van overstromingen in het verleden (bodemfactor, in §4)

De bodemkundige kaart van België dekt slecht klein deeltje van het Gewest, gelet op het verstedelijkt karakter en de ondoordringbaarheid van de bodem. Daarom exploiteren we de kaart van de "natuurlijke bodems" van het BONat project dat op basis van de waarnemingen van de diepte van de waterlaag, van geologische en hydrogeologische gegevens de bodems in kaart brengt zoals ze vermoedelijk waren vóór het ontstaan van de stad.

Om het overstromingsgevaar op een genuanceerde wijze te kwantificeren moeten die verschillende aanlegfactoren onderling worden samengevoegd.





## 4 AANLEGFACTOREN

### 4.1 Aanvankelijk een hydrologisch geldig digitaal hoogtemodel

Het digitaal hoogtemodel (DHM) uit LIDAR 2012 vlucht, aangeleverd door het CIBG werd gewijzigd om de risico-index goed te kunnen berekenen. Immers de aanwezigheid van hoge bermen en bruggen wijzigt de topografie gezien vanuit de lucht; zij vormen een soort van virtuele dammen voor de afvloeiing. In de praktijk vormen echt lage gebieden vijvers en zijn er bouwwerken voorzien om de hoge bermen en bruggen over te steken. De doorstromingsmogelijkheid van het water moet in het digitaal hoogtemodel in aanmerking worden genomen om grote scheefftrekkingen in de berekening van de index te vermijden. Bovendien volgt ook het rioleringsstelsel zijn eigen afloop die niet altijd overeenstemt met het reliëf aan de oppervlakte. Het digitaal hoogtemodel werd derhalve aangepast (uitgraven van waterlopen door hoge bermen, opvullen van de putten en richting van de afvoerassen in de richting van de collectoren) voordat het bij de berekening van onderstaande aanlegfactoren werd gebruikt. Door de schaal van het model (1/10.000) en de uitgevoerde berekeningen werd de resolutie van 1 m van het DHM teruggebracht tot 20m, maar wel zodanig dat er geen informatie over de afvoergeulen verloren ging. Die resolutie van 20m bepaalt de ruimtelijke resolutie van de aanlegfactoren, en dus ook de ruimtelijke resolutie van de overstromingsgevoeligheid. De pixel van de gevaarkaart zal 20m bedragen.

De aanlegfactoren worden berekend door de factoren onderling af te toetsen, aangezien bepaalde stappen in de berekening, die uitgaat van het DHM, gemeenschappelijk zijn (vb.: aanduiden van de afstromingsrichting en van de gebieden die bijdragen tot de positiebepaling van de dalweg bij de berekening van de overhang, bij de berekening van de belastende oppervlakte verstedelijkt gebied of nog, voor de topografische vochtigheidsindex). De stroomrichtingen en de berekening van het belastend gebied gaan uit van een "multiple-flow direction"-algoritme (Toolbox TauDEM<sup>2</sup>), dat het arceringsfenomeen dat zo typisch is voor een meer klassiek "single-flow direction" algoritme drastisch beperkt.

### 4.2 De overhangfactor, het risico om zich op het laagste punt te bevinden...

De overhangfactor berekent voor iedere pixel het hoogteverschil tussen deze pixel en de pixel die het verloop van de dichtstbijzijnde dalweg vormt. Deze index bepaalt (in cm) in welke mate een plaats boven het verloop van de dalweg uitsteekt en daardoor voorkomt dat die plaats onder water komt te staan. Bij de berekening moeten de pixels worden bepaald die het verloop van de dalweg (op basis van een enkel belastend gebied) vormen. De overblijvende pixels worden toegewezen aan het verloop van de dichtstbijzijnde dalweg. Tot slot worden deze pixels vergeleken met de hoogte van iedere pixel ten opzichte van de hoogte van de pixel van het verloop van de dalweg waarmee die is verbonden. Vervolgens wordt die waarde omgekeerd (de laagste waarden duiden op een grote aanleg) en zal die dienen als aanlegfactor. De waarde zal aangeven in welke mate een gebied op het niveau van het verloop van de dalweg ligt en dus dreigt onder te lopen.

### 4.3 De hellingsindex, het risico van stagnerend water...

De snelheid van afstromend water wordt bepaald door de helling. Bij een identiek debiet zal het waterpeil in de leidingen, greppels of op oppervlakken waarover water afstroomt lager staan naarmate de helling steiler is. Het risico van overdrukt in de kunstwerken en buizen of van significante overstroming hangt dus samen met de hellingsgraad. Die factor wordt weliswaar niet expliciet gebruikt, maar is in de hierna volgende topografische vochtigheidsfactor inbegrepen.

<sup>2</sup> <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5.0/index.html>



#### 4.4 De topografische vochtigheidsfactor (twi), het risico van bodemverzadiging...

De Topographic Wetness Index (TWI) (Beven and Kirkby, 1979<sup>3</sup>) is een klassieke hydrologische index die hydrologisch homogene gebieden identificeert en het topografisch effect op de hydrologische processen (onder meer de bodemverzadiging) en andere biologische en chemische processen die daar een gevolg van zijn, kwantificeert. Deze index wordt gedefinieerd als  $\ln(A/\tan(B))$ , waarbij  $\tan(B)$  [m/m] de plaatselijke helling is en  $A$  [m<sup>2</sup>/m], voor iedere pixel en per breedte-eenheid, het voedingsgebied (m.a.w. het oppervlak stroomopwaarts van de pixel die door deze pixel wordt gedraineerd). Voor deze berekeningen bestaan verschillende algoritmen die hoofdzakelijk verschillen in de wijze waarop de belastende gebieden zich stroomafwaarts en binnen de invloedsstraal die voor de berekening van de helling werd gebruikt, uitdienen. Uit de studie van Sorensen et al. (2006)<sup>4</sup> die de impact van de algoritmekeuze vergelijken, besluiten we dat de kwaliteit van de resultaten verbeterd wordt wanneer gebruik wordt gemaakt van:

- algoritmen van accumulatie van multi-directionele stromen<sub>1</sub>
- de wijziging van Tarboton (1997)<sup>5</sup> in de berekening van de stroomrichting

We volgden dus deze aanbevelingen en pasten een “multiple-flow accumulation area” algoritme toe door gebruik te maken van de wijziging van Tarboton (1997) in de hoekberekening (toolbox TauDEM, ontwikkeld aan de Utah State University).

#### 4.5 De factor verstedelijkt voedingsgebied, het belang van het voorbijstromend afvloeiend water ...

Aan iedere pixel wordt de waarde van het verstedelijkt oppervlak stroomopwaarts daarvan toegekend dat daardoor wordt gedraineerd. Het verstedelijkt oppervlak wordt berekend op basis van de verstedelijkingsgraad gewogen ten opzichte van het werkelijk oppervlak. Naarmate de grootte van het verstedelijkt oppervlak stroomopwaarts van een pixel toeneemt, zal tijdens een regenval meer afvloeiend water voorbij deze pixel stromen, wat de omvang van de overstroming naar hoogte en uitgestrektheid in geval van een hydraulische obstructie aangeeft. Het belastende gebied gebruikt andermaal een multi-directioneel algoritme van de TauDEM toolbox.

#### 4.6 De bodemfactor, getuige van een alluviaal verleden...

De processen van erosie en afzetting beïnvloeden de bodemkunde en de geomorfologie. Erosie kalft de bodem stroomopwaarts af en heeft een uitgesproken voorkeur voor bepaalde partikelfracties. De partikels zetten zich af volgens hun grootte en de beweeglijkheid (die wordt bepaald door de afstromingsnelheid) van het water. In onderstroomde gebieden waar water stagneert, stellen we een afzetting vast van fijne partikels; dat proces leidt tot de vorming van alluviale vlakten waar we bodems aantreffen verrijkt met fijne deeltjes (fijne klei of leem). Die afzettingen doen een zware bodem ontstaan die slecht doorlatend is en snel verzadigd geraakt. Bij regenval infiltreert water slechts heel beperkt in de bodem. De verklaring daarvoor zijn de fijne poriën die de infiltratiecapaciteit van de bodem beperken en de eerder verzadigde bodem die het absorptievermogen vermindert. Dergelijke bodem getuigt van overstromingen in het verleden en bevorderen de infiltratie allerm minst.

Aangezien er voor Brussel geen exhaustieve bodemkaart bestaat gezien het feit dat de bodem werd gewijzigd en die ook ondoordringbaar is, gebruiken we de natuurlijke bodemkaart (BONat-project) die de aard op basis van de onderliggende hydrogeologische eigenschappen en de geomorfologie extrapoleert. Deze informatie omvat tal van aspecten maar is bijzonder onrechtstreeks wat maakt dat die gepaard gaat met onzekerheden.

<sup>3</sup> Beven, K. J. and Kirkby, M. J.: A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrol. Sci. Bull.*, 24, 43–69, 1979.

<sup>4</sup> Sorensen, R., Zinko, U., and Seibert, J.: On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, 2006.

<sup>5</sup> Tarboton, D. G.: A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models, *Water. Resour. Res.*, 33, 1997.

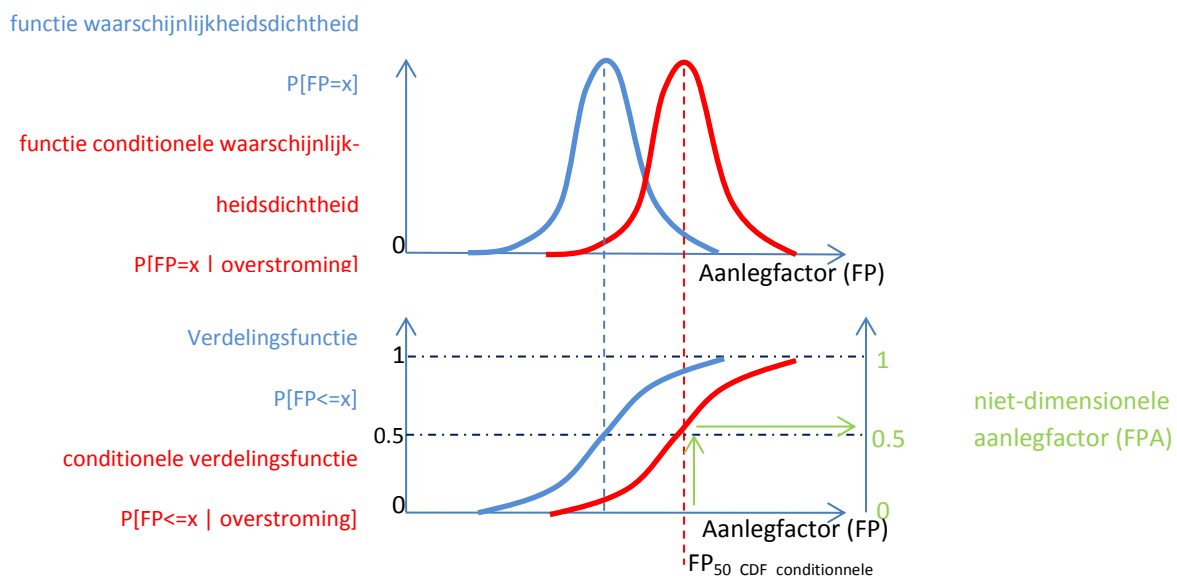


Bodems met een lage korrelgrootte fractie worden in verband gebracht met een hoge aanleg voor overstroming.

#### 4.7 Niet-dimensionering van de aanlegfactoren

Hoewel de aanlegfactoren correleren met de overstromingswaarnemingen, bestaat er geen eenduidige theoretische relatie tussen deze factoren en de lokalisatie van de overstromingen. Bijgevolg kunnen we de aanlegfactoren niet combineren met theoretische formules die de natuurverschijnselen voorstellen en voortvloeiën uit bijvoorbeeld de stromingsmechanica. We kunnen weliswaar een vage logische benadering gebruiken waarbij de aanlegfactoren niet worden gedimensioneerd en ze onderling worden gecombineerd om te komen tot een kwalitatieve raming van de overstromingsgevoeligheid van de percelen.

De verschillende aanlegfactoren onderscheiden zich door duidelijk onderscheidende eenheden (voorbeeld: de overhangfactor wordt uitgedrukt in centimeter, de bodemfactor heeft geen eenheid, ...). Vervolgens wordt iedere aanlegfactor verbonden met een niet-dimensionele waarde tussen 0 en 1, door middel van een lidmaatschapsfunctie ("membership function"). De lidmaatschapsfunctie geeft de toenemende overgang tussen 0 en 1 weer volgens de waarde van de aanlegfactor: de evolutie verloopt van een situatie met een lage overstromingswaarschijnlijkheid (0) naar een situatie met een hoge overstromingswaarschijnlijkheid (1). Om de interpretatie van de lidmaatschapsfunctie te vereenvoudigen kozen wij ervoor om die te laten samenvallen met de conditionele verdelingsfunctie van de aanlegfactor, met als voorwaarde de waarneming van een overstroming (op basis van verklaringen van het Rampenfonds). De aanlegfactor is dan ook niet-gedimensioneerd doordat de waarde van het hogere deciel dan waarmee die overeenstemt, gedeeld door 100, wordt genomen. De niet-dimensionele aanlegfactor zal dus gelijk zijn aan 0.1, 0.2, ..., 1.



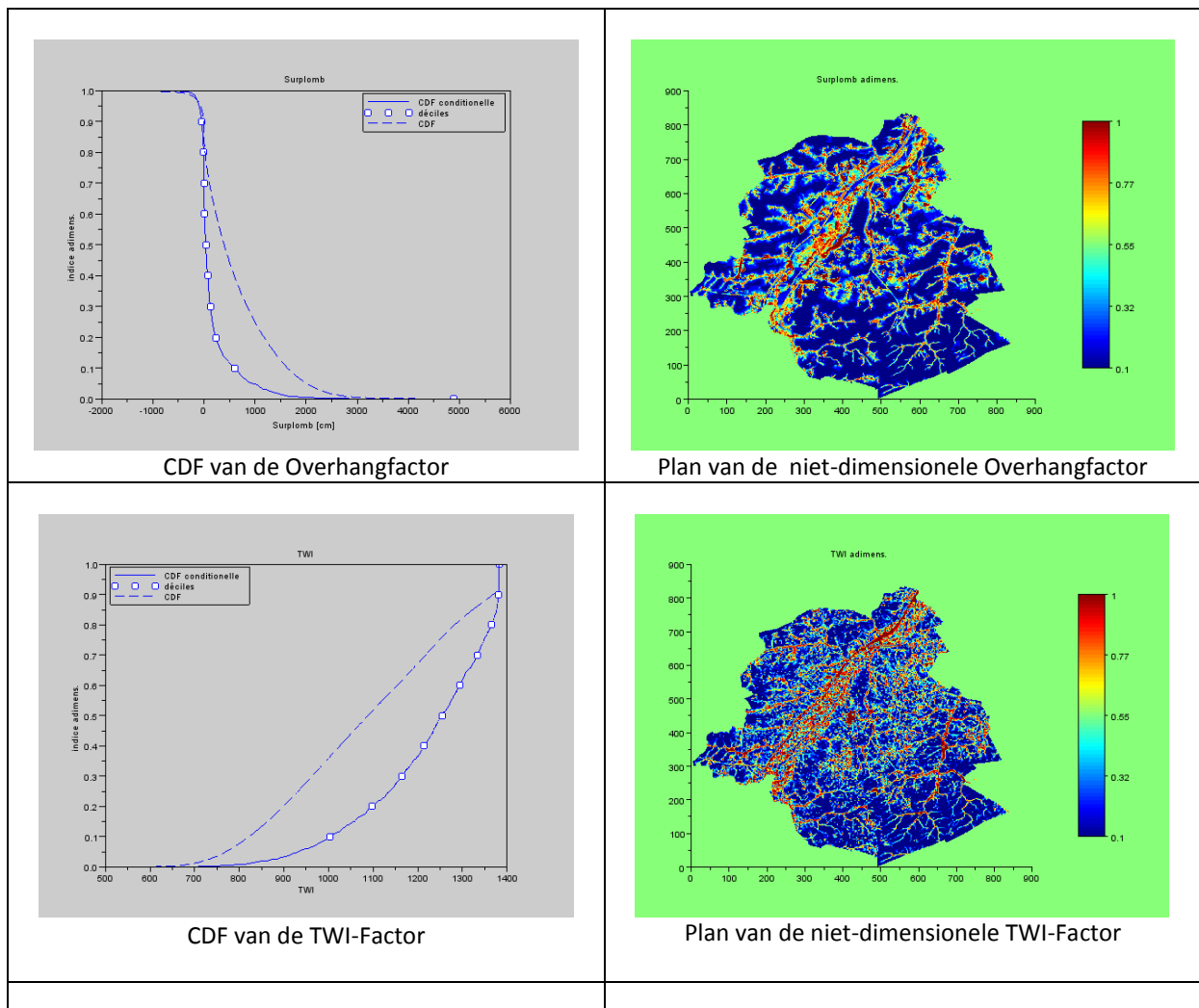
Vb.: Voor een bijzondere waarde van de aanlegfactor: als 50 % van de overstromingswaarnemingen zich situeren in gebieden met een aanlegfactor kleiner dan of gelijk aan deze waarde, wordt daar een niet-dimensionele waarde van 0.5 aan toegekend.

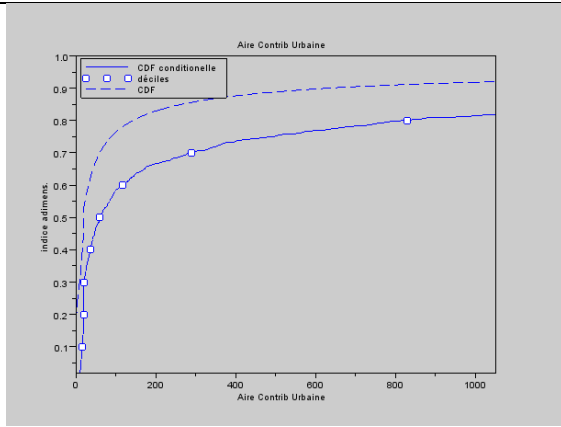
Laten we er met andere woorden vanuit gaan dat we enkel de plaatsen analyseren waarvoor er overstromingen werden gemeld (vandaar de hiervoor gebruikte term "voorwaardelijk") en dat we vaststellen dat de aanlegfactor "TWI" voor 25% van die plekken die onder water kwamen te staan kleiner was dan of gelijk aan 7, dat de TWI voor 50% van de overstroomde plaatsen kleiner was dan



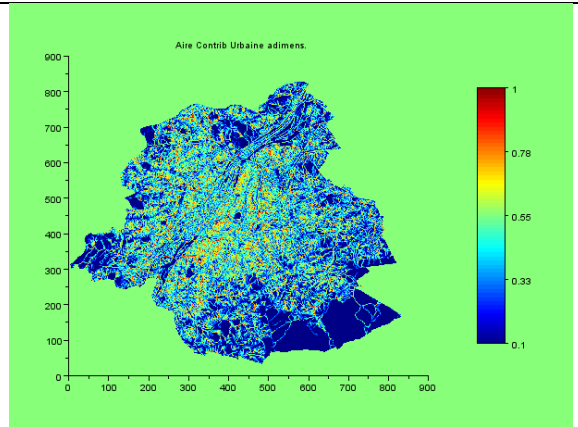
of gelijk aan 9 en dat in 75% van de gevallen de TWI kleiner was dan of gelijk aan 12; als we weten dat een hogere TWI wijst op een hoge waarschijnlijkheid van overstroming, dan kennen we dus de (niet-dimensionele) waarde 0.25 toe aan TWI = 7, de waarde 0.5 aan TWI = 9 en de waarde 0.75 aan TWI = 12. De niet-dimensionele waarde van de aanlegfactor krijgt dus een betekenis die voor iedereen te begrijpen valt (vaak beter dan de waarde van de eigenlijke aanlegfactor). Zo kunnen we voor een bepaalde plaats (waarvoor we niet noodzakelijk over overstromingswaarnemingen beschikken) met een waarde TWI = 12 (niet-dimensionele waarde 0.75) verklaren dat in even gunstige omstandigheden als deze, we 75% van de overstromingen die bij het rampenfonds waren aangegeven telden.

Grafieken met de (al dan niet conditionele) verdelingsfuncties; de decielen die werden weerhouden als lidmaatschapsfunctie en het resultaat op het plan van de niet-dimensionering van de aanlegfactoren

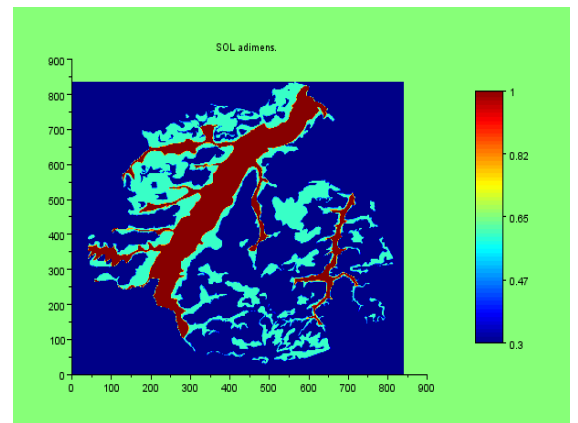




CDF van de Factor Stedelijk voedingsgebied



Plan van de niet-dimensionele SVG-Factor



Plan van de niet-dimensionele Bodemfactor

## 5 HET OVERSTROMINGSGEVAAR: EEN VERZWARENDE COMBINATIE VAN DE AANLEGFACTOREN

### 5.1 Kwantificeren van het overstromingsgevaar: de overstromingsgevoeligheid

Een hoge waarde hebben voor een bepaalde aanlegfactor volstaat niet om te stellen dat het gebied werkelijk gevoelig is voor overstroming als, bijvoorbeeld, de waarde van de andere aanlegfactoren laag is. Zo is het loutere feit dat het een vlak gebied betreft (zoals bijvoorbeeld een hoogvlakte) niet voldoende om het risico van een significante overstroming te lopen, evenmin als het loutere feit dat een gebied zich ter hoogte van het verloop van de rivier dalweg bevindt (bijvoorbeeld bovenaan een bosgebied). In werkelijkheid moeten de waarden van de aanlegfactoren onderling worden samengevoegd om er de gevoelige gebieden aan te onttrekken waar de ongunstige omstandigheden zich versterken.

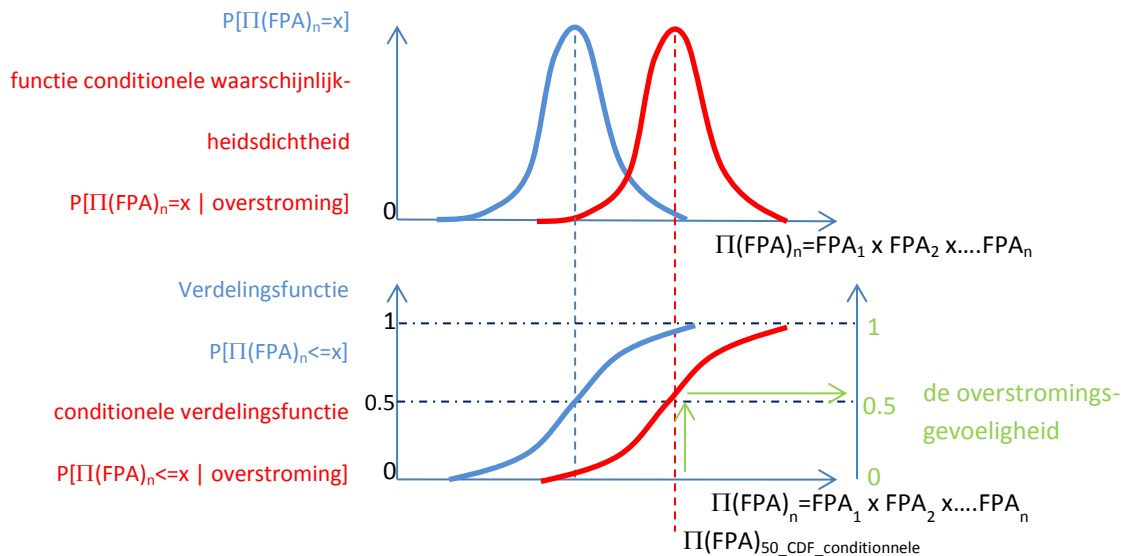
We voerden tal van testen uit om te komen tot een optimaal gecombineerde aanlegfactoren en dus een kaart samen te stellen die de bedreigde gebieden het best in beeld brengt. Het komt erop aan een maximum van historische overstromingswaarnemingen te dekken en daarbij zo sterk mogelijk in te zoomen op het risicogebied, maar gelijktijdig het gebied niet te groot te maken.

Via analyse zijn we tot de conclusie gekomen dat de gewone vermenigvuldiging van de waarden van de verschillende niet-dimensionele aanlegfactoren (zonder deze factoren onderling te wegen) de beste manier vormde om de bedreigde gebieden van het overige deel van het gewest te discrimineren. In onderstaande grafiek wordt dit vertaald door een maximale scheiding tussen de conditionele verdelingsfunctie (rode lijn) en de verdelingsfunctie (blauwe lijn).

Maar aangezien de aanlegfactoren onderling niet onafhankelijk zijn (vb.: een dal ligt per definitie ter hoogte van het verloop van de dalweg, is heel vaak vochtig, ligt stroomafwaarts van de bebouwde oppervlakte, vormt een alluviale bodem), heeft het product (tussen 0 en 1) van de niet-dimensionele aanlegfactoren niet langer een statistische waarde. We kunnen de waarde van het product bijvoorbeeld niet langer koppelen aan de dekkingsgraad van de overstromingswaarnemingen geregistreerd bij het Rampenfonds.

Daarom grijpen we terug naar de transformatie die we eerder al gebruikten bij de niet-dimensionering van de aanlegfactoren. Het product van de niet-dimensionele aanlegfactoren wordt getransformeerd door een lidmaatschapsfunctie die wordt gedefinieerd als de conditionele verdelingsfunctie van het product, waarbij de voorwaarde zoals eerder is dat de overstroming werd aangegeven bij het Rampenfonds.

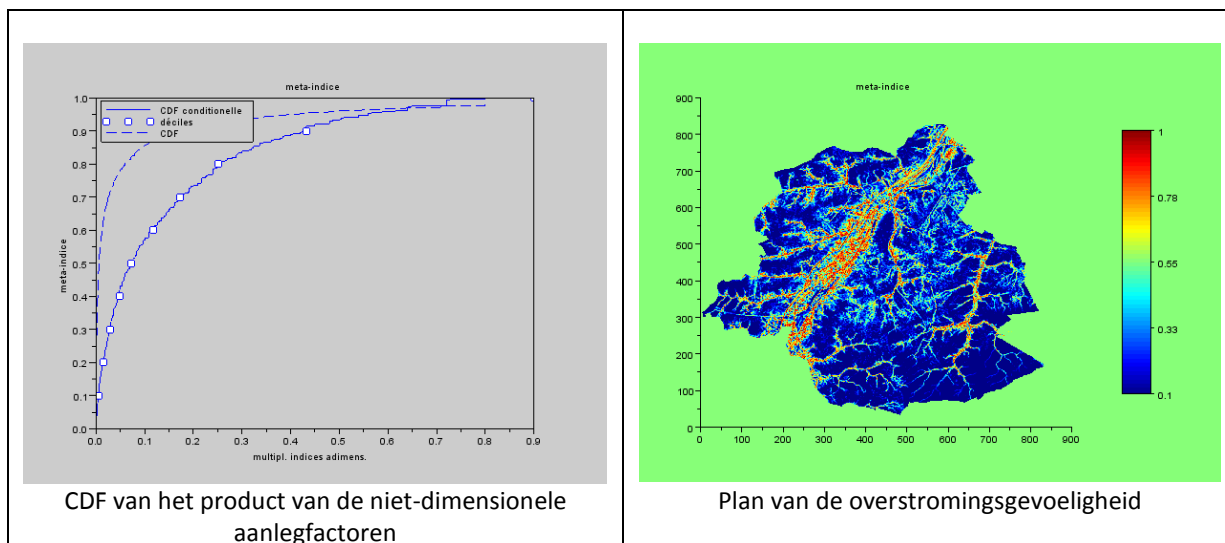
functie waarschijnlijkheidsdichtheid



Vb.: Voor een bijzondere waarde van de niet-dimensionele aanlegfactor (FPA): als 50 % van de historische overstromingen zich situeert in gebieden waarvan de waarde van het product kleiner is dan of gelijk aan deze bijzondere waarde, kennen we daar een waarde van overstromingsgevoeligheid van 0,5 aan toe.

Het product van de niet-dimensionele aanlegfactoren, dat vervolgens met de lidmaatschapsfunctie werd getransformeerd, kwantificeert de overstromingsgevoeligheid (begrepen tussen 0 en 1). Die overstromingsgevoeligheid wordt berekend op alle punten van het gewest en kwantificeert het gevaar. Als bijvoorbeeld de overstromingsgevoeligheid van een bepaalde plek 0,8 bedraagt dan betekent dit dat het gevoeligheidsniveau (vertegenwoordigd door het product van de niet-dimensionele aanlegfactoren) van 80% van de locaties waarvan is geweten dat ze overstromden (Rampenfonds), even ongunstig is als de situatie van de betreffende plek.

Grafiek met de (al dan niet conditionele) verdelingsfuncties; de decielen die werden weerhouden als lidmaatschapsfunctie en het resultaat op het plan van de niet-dimensionering **van het product van de niet-dimensionele aanlegfactoren (=overstromingsgevoeligheid)**



## 5.2 Definitie van de overstromingsgevaarklassen

Naarmate de gevoeligheid voor overstroming van een gebied toeneemt, des te groter lijkt de kans op terugkerende overstromingen. Omgekeerd onthult het terugkerend karakter van overstromingen iets over de gevoeligheid van het gebied voor overstroming. Toch hebben we de juistheid van bovenstaande bewering in onze gegevensbank om volgende redenen niet altijd onderzocht:

- de beperkte waarnemingsperiode laat niet toe alle episodes van kritieke regenval te dekken die variëren volgens de ligging van de bedreigde gebieden binnen het stroomgebied;
- bepaalde gebieden waar zich herhaaldelijk overstromingen voordoen, zijn van nature uit niet gevoelig om onder water te lopen, maar overstroomden toch door een plaatselijk slecht functiestoornis (een obstructie, slechte bepaling van de grootte van het rioleringsnet,...). Wat kan worden opgelost en wat onafhankelijk is van de algemene omgevingsomstandigheden;
- we kunnen niet uitsluiten dat een overstroomd gebied zich elders bevindt dan op het adres geregistreerd bij het Rampenfonds. Wanneer bijvoorbeeld de eigenaars meerdere eigendommen bezitten of wanneer het een uitgestrekte eigendom betreft en wanneer het adres niet heel nauwkeurig het overstroomd gebied binnen het perceel situeert.

Bijgevolg en tenzij we het risicogebied overmatig zouden uitbreiden<sup>6</sup>, dekt dat niet de volle 100% van de overstromingswaarnemingen.

We moeten dus een keuze maken over het percentage overstromingswaarnemingen dat het bedreigd gebied dekt. We moeten een evenwicht zien te vinden in de volgende tegenstrijdige behoeften:

- de maximalisering van de dekkinggraad van de waarnemingen,
- het minimaal uitbreiden van het risicogebied.

De gemeenschappelijke analyse van de overstromingsgevoeligheid en het terugkeren van overstromingen die bij het Rampenfonds werden aangegeven, zetten ons ertoe aan de pixels waar de overstromingsgevoeligheid groter is dan 0,4 als gevaargebied te benoemen. Met een tolerantie van één pixel (20m) op de lokalisatie van de overstromingen, komen overeen met 81 % van de waarnemingen waarvan de waarde van de terugkeerperiode groter is dan of gelijk aan 1x in 10 jaar en meer dan 96% van de waarnemingen met een waarde van terugkeerperiode groter dan of gelijk aan 2x in 10 jaar.

Gebied met "gevoeligheid > 0.4", gegevensbank "Rampenfonds"		
Terugkerend karakter	Groter dan of gelijk aan 1	Groter dan of gelijk aan 2
aantal waarnemingen	1735	53
dekking-% van de waarn. (rampen), op 20 m na	81%	96%

Om een voorspellingsmodel te kunnen valideren dienen de resultaten daarvan te worden vergeleken met een reeks gegevens die onafhankelijk is van de reeks gegevens die werd gebruikt voor het samenstellen en parametriseren van het model. Speciaal daartoe gebruikten we de gegevens over de brandweer interventies. Met een tolerantie van één pixel (20m) op de lokalisatie van de overstromingen, controleren we aldus 91 % van de interventiepunten waarvan de waarde van het terugkerend karakter groter is dan of gelijk aan 2x in 12 jaar.

<sup>6</sup> In het extreme geval dat we het volledige grondgebied van het Gewest als bedreigd zouden beschouwen, zouden we alle overstromingswaarnemingen uit het verleden opnieuw moeten laten overeenstemmen; we zouden het risicogebied daarvoor echter zodanig moeten vergroten dat de informatie volstrekt nutteloos wordt.





### Gebied met "gevoeligheid > 0.4", gegevensbank " brandweerdiensten "

Terugkerend karakter	Groter dan of gelijk aan 1	Groter dan of gelijk aan 2
aantal waarnemingen	1183	106
dekkings-% van de waarn. (SIAMU), op 20 m na	68%	91%

Als we ons buigen over de SIGASS – Flood gegevensdatabank (VIVAQUA) en nog steeds uitgaan van een tolerantie van één pixel (20m) op de lokalisatie van de overstromingen, controleren we 88 % van de interventiepunten waarvan de waarde van het terugkerend karakter groter is dan of gelijk aan 2x in 20 jaar.

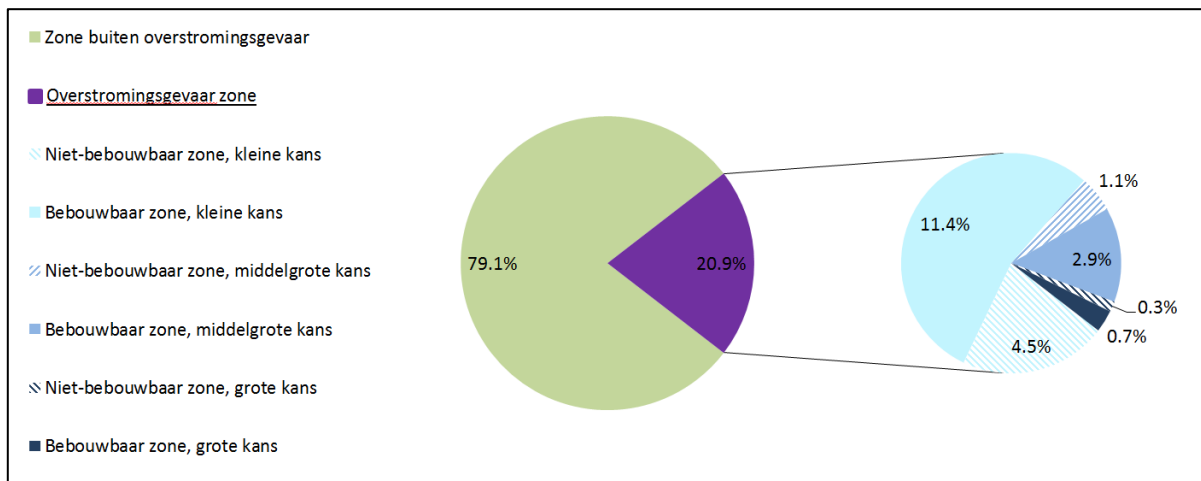
### Gebied met een "gevoeligheid > 0.4", gegevensbank « SIGASS - Flood »

Terugkerend karakter	Groter dan of gelijk aan 1	Groter dan of gelijk aan 2
aantal waarnemingen	3688	726
dekkings-% van de waarn. (SIGASS), op 20 m na	76%	88%

Om het overstromingsgevaar te kwantificeren worden drie klassen van gevoeligheid onderscheiden die de overstromingsgevaarkaart afzonderlijk kleuren:

- kleine kans: gebied waarvan de gevoeligheid zich situeert binnen het interval ]0.4-07],
- middelgrote kans: gebied waarvan de gevoeligheid zich situeert binnen het interval ]0.7-0.9],
- grote kans: gebied waarvan de gevoeligheid zich situeert binnen het interval ]0.9-1].

De aandelen van ieder gebied binnen de totale oppervlakte van het gewest (NB: na de validering op het terrein die in het volgend deel worden toegelicht) zijn als volgt opgedeeld:



De grote gevaarkans is gedefinieerd als 1% van het gebied die het meest overstroombaar is. De grote kans en de middelgrote kans stellen samen 5% van het gebied voor die het meest overstroombaar is.

## 6 NABEHANDELING: VALIDERING OP HET TERREIN

Bovenstaande methode is een globale, maar vereenvoudigde benadering van de werkelijkheid. De contouren van de voorspelde bedreigde gebieden werd voor verdere verfijning aan deskundigen op het terrein voorgelegd (19 gemeenten, de beheerders van riolen en van het Kanaal). In die fase werden de resultaten van bovenstaande methode geëxploiteerd als uitgangspunt voor een werkelijke omschrijving van het bedreigd gebied. Daarbij werden de terreinbijzonderheden in aanmerking genomen.

Met name de aanwezigheid van een stormbekken vermindert in bepaalde gebieden de frequentie en de omvang van overstromingen, wat het gevaar plaatselijk de facto doet verminderen. Vermits de huidige benadering de fijne hydrodynamica van het stroomgebied niet in aanmerking neemt, hebben we de resultaten van de huidige methode vergeleken met de beschikbare hydraulische simulaties die wel rekening hielden met het effect van het stormbekken. We leidden daaruit volgende regel af die we toepasten op het volledige grondgebied:

initiële intensiteit (kans)	Indien SB-Factor < 75	Indien SB-Factor >= 75 maar < 95	Indien SB-Factor >= 95
Kleine	Kleine	Kleine	Kleine
Middelgrote	Middelgrote	Kleine	Kleine
Grote	Grote	Middelgrote	Kleine

SB-Factor = SVG vergaard door de SB stroomopwaarts / totale SVG  
 SB = stormbekken, SVG = Stedelijk Voedingsgebied

Tot slot kan nog een aantal filters worden toegepast om te vermijden dat we individuele en verlaten gebieden overhouden (het geval van een zogenaamd niet-overstroombaar gebied dat ingesloten komt te liggen in een groter overstroombaar gebied, of het geval van een klein overstroombaar gebied zonder rechtstreekse verbinding met een groter overstroombaar gebied).

In een bebouwde zone werd de overstromingsgevaarkans lokaal verlaagd naar een kleinere kans in geval dat er geen enkele overstromingswaarneming of geen hydraulische simulatieresultaten zijn die significante problemen aantonen.