

# De Chaamse Beken in Tygron

**Ruben den Hertog**

26-07-2021

—

Het simuleren van een landelijk  
bekensysteem in Tygron

—



**TYGRON**

**wareco**  
INGENIEURS



**Aveco de Bondt**  
Ingenieursbedrijf

**UNIVERSITY OF TWENTE.**

## Voorwoord

Dit verslag is mijn scriptie die ik heb geschreven over mijn onderzoek naar het simuleren van neerslag afvoerstroming in een bekensysteem in Tygron. Tijdens de eerste twee jaar van de bachelor is mijn interesse voor modelleren en waterstromen gegroeid. Ik was dan ook blij dat ik bij Aveco de Bondt terecht kon voor een onderzoek in deze richting. Hier heb ik van april tot en met juli stagegelopen. Ik heb tijdens mijn stage erg veel geleerd over het modelleren van oppervlakte en grondwater, werken met geografische data en de werking van riolen. Tijdens mijn stage heb ik leren werken met de programma's Qgis, SOBEK en Tygron.

Graag wil ik Christian Bouman en Anouk Bomers bedanken voor de hulp en ondersteuning bij de voorbereiding van mijn onderzoek. Anouk verdient een extra bedankje voor de ondersteuning en feedback tijdens het onderzoek. Jesse Jager heeft mij in mijn stage onvermoeibaar en met veel enthousiasme begeleid. Ik heb erg veel van hem geleerd en vond het heel leuk en interessant om samen over vraagstukken te sparren. Ik wil hem en Sara Eeman bedanken voor de ondersteuning vanuit Aveco de Bondt.

Tot slot wil ik Thomas Mittring bedanken. Thomas heeft mij de basis van het modeleren in SOBEK bijgebracht en stond altijd klaar voor mijn vragen hierover.

### Student:

|                 |                                |
|-----------------|--------------------------------|
| Naam:           | Ruben den Hertog               |
| Studentnummer:  | S1947818                       |
| Email adres:    | r.denhertog@student.utwente.nl |
| Telefoonnummer: | +31 6 361 44 431               |

### Interne begeleider:

|                 |                     |
|-----------------|---------------------|
| Naam:           | Dr.Ir. Anouk Bomers |
| Functie:        | Universitair docent |
| Email adres:    | A.bomers@utwente.nl |
| Telefoonnummer: | +31 53 489 1062     |

### Externe begeleider:

|                 |                             |
|-----------------|-----------------------------|
| Naam:           | Jesse Jager                 |
| Functie:        | Adviseur /Specialist Tygron |
| Email adres:    | jjager@avecodebondt.nl      |
| Telefoonnummer: | +31 6 826 71 234            |

### Tweede beoordelaar:

|                 |                         |
|-----------------|-------------------------|
| Naam:           | Dr. Karina Vink         |
| Functie:        | Postdoctoral Researcher |
| Email adres:    | k.vink@utwente.nl       |
| Telefoonnummer: | +31 53 489 8682         |



## Summary

---

In water management, computerized hydrologic models are used extensively to efficiently and cost-effectively, perform analyses. One of the largest implementations of hydrological models is the simulation of rainfall-runoff. The water module in Tygron is suitable for this purpose. Tygron is a software package that is constantly being improved and extended with more applications. In this way Tygron can be used to calculate more hydrological processes integrally. One of these new applications is the simulation of water flow through a stream system. In this study, an attempt was made to gain insight into the capabilities and limitations of the Tygron software for this implementation.

For this purpose, a model of the Chaamse Beken (stream system southeast of Breda) was set up. Three processes for initialization have been worked out because a Tygron model cannot be initialized directly. For this, a GIS program is needed. Using Voronoi polygons to create gauge areas in the GIS software gives the best results. This, in terms of calculation time reduction, but also because this way the groundwater can be initialized directly. Next, the influence of the roughness parameter in Tygron was investigated. This shows that the roughness in Tygron does have very important influence in the model but does not have the same influence and effect as in other models, or as in real streams. The roughness gets more influence in Tygron the higher the water level is. However, research shows that in real life, roughness gets less influence as the water level rises.

Finally, a comparison was made between the Tygron model and a SOBEK model of the Chaamse Beken. This shows that there are major differences between the two models. Tygron generally builds a more realistic model. However, watercourses between trees are not well drawn in and the storage in narrower watercourses is underestimated. Also, the way in which culverts are placed in the model is still too sensitive to uncontrollable errors. Finally, the influence of the downstream boundary condition is very noticeable in the model. The flow rate through these outlets cannot vary based on calculations during a simulation but must be set in advance. This has an impact on the water level in the connecting watercourse.

The study shows that improvements can be made in the software. To use Tygron properly for precipitation simulations in watercourses, knowledge of its limitations is necessary. Standard models in Tygron can be improved manually, for example by loading new watercourses or drawing in culverts manually. This often takes a lot of time and is sometimes only possible on a limited scale.

---





## Samenvatting

---

In watermanagement wordt uitgebreid gebruik gemaakt van gecomputeriseerde hydrologische modellen om efficiënt en kosteneffectief, analyses te maken. Eén van de grootste implementaties van hydrologische modellen is het simuleren van afstroming van water door neerslag. De watermodule in Tygron is hier geschikt voor. Tygron is een softwarepakket dat telkens verbeterd en uitgebreid wordt met meer toepassingen. Op deze manier kan Tygron gebruikt worden om meer hydrologische processen integraal door te rekenen. Een van deze nieuwe toepassingen is het simuleren van waterstroming door een bekensysteem. In dit onderzoek is geprobeerd om inzicht te verkrijgen in de mogelijkheden en beperkingen van de Tygron software voor deze implementatie.

Hiervoor is er een model opgezet van de Chaamse Beken (bekensysteem ten Zuidoosten van Breda). Er zijn drie processen voor het initialiseren uitgewerkt, omdat een Tygron model niet direct geïntialiseerd kan worden. Hiervoor is een GIS-programma nodig. Het gebruik van Voronoi polygonen om peilgebieden te maken in de GIS-software geeft de beste resultaten. Dit, qua rekentijd reductie, maar ook omdat hiermee direct het grondwater kan worden geïntialiseerd. Vervolgens is de invloed van de ruwheid in Tygron onderzocht. Hieruit blijkt dat de ruwheid in Tygron een erg belangrijke invloed heeft maar niet dezelfde invloed en hetzelfde effect heeft als in andere modellen, of zoals in echte beken. De ruwheid krijgt in Tygron meer invloed naarmate het waterpeil hoger is. In de werkelijkheid krijgt de ruwheid minder invloed krijgt naarmate het waterpeil stijgt.

Als laatste is er een vergelijking gemaakt tussen het Tygron model en een SOBEK-model van de Chaamse Beken. Hieruit blijkt dat er grote verschillen zitten tussen beide modellen. Tygron bouwt over het algemeen een realistischer model op. Echter worden watergangen tussen bomen niet goed ingetekend en wordt de berging in smallere watergangen onderschat. Ook is de manier waarop duikers in het model worden geplaatst nog te gevoelig voor oncontroleerbare fouten. Als laatste is de invloed van de benedenstroomse randvoorwaarde goed merkbaar in het model. Het debiet door deze uitlaten kan niet variëren op basis van berekeningen tijdens een simulatie maar moet van tevoren worden ingesteld. Dit heeft een invloed op de waterstand in de aansluitende watergang.

Uit het onderzoek blijkt dat er verbeteringen gedaan kunnen worden in de software. Om Tygron goed te kunnen gebruiken voor neerslag-simulaties in watergangen, is kennis van de beperkingen noodzakelijk. Standaardmodellen in Tygron kunnen handmatig verbeterd worden, bijvoorbeeld door nieuwe watergangen in te laden of door duikers handmatig in te tekenen. Dit kost vaak veel tijd en is soms maar op beperkte schaal mogelijk.

---

# Inhoudsopgave

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Introductie.....                                    | 7  |
| 1.1   | Context.....  | 7  |
| 1.2   | Probleembeschrijving.....                           | 8  |
| 1.3   | Onderzoeksdoel en onderzoeksvragen.....             | 8  |
| 1.4   | Studiegebied.....                                   | 9  |
| 1.5   | Leeswijzer.....                                     | 10 |
| 2     | Theoretische achtergrond.....                       | 11 |
| 2.1   | De watermodule.....                                 | 11 |
| 2.2   | Digitaal hoogtemodel en hoogtemodel in Tygron.....  | 12 |
| 2.3   | Intekenen van het wateroppervlak.....               | 13 |
| 2.4   | Inlaat en uitlaat.....                              | 13 |
| 3     | Onderzoeksmethodiek.....                            | 14 |
| 3.1   | Modelinitialisatie.....                             | 14 |
| 3.1.1 | Initieel waterpeil berekenen.....                   | 15 |
| 3.1.2 | Resultaten omzetten naar peilgebieden.....          | 15 |
| 3.2   | Gevoeligheidsanalyse.....                           | 17 |
| 3.3   | Validatie.....                                      | 19 |
| 4     | Resultaten.....                                     | 20 |
| 4.1   | Modelinitialisatie.....                             | 20 |
| 4.1.1 | Berekening initieel waterpeil.....                  | 20 |
| 4.1.2 | Verwerking van resultaten.....                      | 24 |
| 4.2   | Gevoeligheidsanalyse.....                           | 28 |
| 4.2.1 | Vergelijking in gevoeligheid van de parameters..... | 28 |
| 4.2.2 | Debietsafhankelijke invloed van de ruwheid.....     | 30 |
| 4.3   | Validatie.....                                      | 31 |
| 4.3.1 | Vergelijking SOBEK vs Tygron.....                   | 31 |
| 4.3.2 | Handmatig intekenen van watergangen in Tygron.....  | 35 |
| 4.3.3 | Duikers.....  | 38 |
| 4.3.4 | Uitlaten.....                                       | 39 |
| 5     | Discussie.....                                      | 40 |
| 6     | Conclusie.....                                      | 41 |
| 7     | Aanbevelingen.....                                  | 42 |
| 8     | Verwijzingen.....                                   | 43 |
| 9     | Bijlagen.....                                       | 44 |
|       | A Elementary Effects Method.....                    | 44 |
|       | B Resultaten simulaties gevoeligheidsanalyse.....   | 47 |

# Lijst Tabellen en Figuren

|  |    |
|--|----|
| FIGUUR 1: DE CHAAMSE BEKEN (GECOMBINEERDE KAART VAN EIGENHUIJSEN ET AL. (2008) EN KAMSMA (2019) .....                            | 9  |
| FIGUUR 2: OVERZICHT VAN DE HYDROLOGISCHE RELATIES IN DE WATERMODULE VAN TYGRON (TYGRON SUPPORT, 2021 - E) .....                  | 11 |
| FIGUUR 3: OVERZICHT ONDERGROND IN TYGRON (TYGRON SUPPORT, 2021 - E).....   | 12 |
| FIGUUR 4: UITSNEDE DIGITAAL HOOGTEMODEL (AHN) (GELE LIJN) EN HET HOOGTEMODEL WAARMEE TYGRON REKENT (RODE LIJN) .                 | 12 |
| FIGUUR 5: INGETEKENDE WATERGANG IN TYGRON. (TYGRON SUPPORT, 2021 - B). .....   | 13 |
| FIGUUR 6: STROOMDIAGRAM VAN DE METHODE DIE IS GEVOLGD .....  | 14 |
| FIGUUR 7: MEETLOCATIES IN HET MODELGEBIED .....  | 16 |
| FIGUUR 8: OVERZICHT MODELOPZET GEVOELIGHEIDSANALYSE.....   | 17 |
| FIGUUR 9: OPPERVLAKTEWATER BEREKENING, TIJDSTAPPEN TOT STABIELE WATERSTAND .....   | 20 |
| FIGUUR 10: OPPERVLAKTEWATER BEREKENING, WATERSTAND OVER TIJD VOOR DRIE MEETPUNTEN IN HET MODEL .....                             | 21 |
| FIGUUR 11: REKENEN MET INFILTRATIE, TIJDSTAPPEN TOT STABIELE WATERSTAND .....  | 22 |
| FIGUUR 12: INFILTRATIE BEREKENING, WATERSTAND OVER TIJD VOOR DRIE MEETPUNTEN IN HET MODEL .....                                  | 23 |
| FIGUUR 13: UITSNEDE UIT PEILGEBIEDENBESTAND GEBASEERD OP WATERGEBIEDEN .....   | 24 |
| FIGUUR 14: PEILGEBIEDEN OP WATERGEBIED, TIJDSTAPPEN TOT STABIELE WATERSTAND .....  | 25 |
| FIGUUR 15: PEILGEBIEDEN OP WATERGEBIED, WATERSTAND OVER TIJD VOOR DRIE MEETPUNTEN IN HET MODEL.....                              | 25 |
| FIGUUR 16: PEILGEBIEDEN OP WATERGEBIED, WATERSTAND OVER TIJD VOOR DRIE MEETPUNTEN IN HET MODEL (2).....                          | 26 |
| FIGUUR 17: PEILGEBIEDENBESTAND OP BASIS VAN WATERSTANDEN (VONOROI POLYGONEN).....  | 26 |
| FIGUUR 18: PEILGEBIEDEN OP WATERSTAND, TIJDSTAPPEN TOT STABIELE WATERSTAND.....  | 27 |
| FIGUUR 19: PEILGEBIEDEN OP WATERSTAND, WATERSTAND OVER TIJD VOOR DRIE MEETPUNTEN IN HET MODEL, HOGE INITIËLE<br>WATERSTAND ..... | 27 |
| FIGUUR 20: GEMIDDELDE EFFECT OP DE WATERSTAND IN VIER VERSCHILLENDE WATERGANGEN.....   | 28 |
| FIGUUR 21: STANDAARDDEVIATIE VAN DE VARIATIE IN WATERSTAND VOOR ELKE VARIABLE. ....  | 29 |
| FIGUUR 22: GEMIDDELDE TOENAME VAN DE WATERSTAND BIJ VERHOOGING RUWHEID MET $\sigma_{0,01}$ .....                                 | 30 |
| FIGUUR 23: SCREENSHOT BENEDENSTROOMSE LOCATIE TYGRON.....  | 31 |
| FIGUUR 24: VERGELIJKING IN WATERSTAND VAN EEN BENEDENSTROOMSE LOCATIE. ....  | 32 |
| FIGUUR 25: DWARSPROFIEL VERGELIJKING VAN TWEE WATERGANGEN IN SOBEK EN TYGRON .....   | 33 |
| FIGUUR 26: DWARSPROFIEL VERGELIJKING VAN TWEE WATERGANGEN IN TYGRON, SOBEK EN BODEMMETINGEN .....                                | 33 |
| FIGUUR 27: DWARSPROFIEL VERGELIJKING VAN TWEE WATERGANGEN IN TYGRON, SOBEK EN BODEMMETINGEN .....                                | 34 |
| FIGUUR 28: DE LOOP VAN EEN WATERGANG IN TYGRON VS SOBEK.....   | 35 |
| FIGUUR 29: MISSENDE WATERGANG IN TYGRON .....  | 36 |
| FIGUUR 30: BODEMPROFIELEN IN TYGRON VS FYSIEKE METINGEN NA HANDMATIG INSTELLEN VAN DE BODEMHOOGTE .....                          | 36 |
| FIGUUR 31: BODEMPROFIEL IN TYGRON VS FYSIEKE METINGEN NA HANDMATIG AANPASSEN BODEMHOOGTE EN "ANGLE OF REPOSE".                   | 37 |
| FIGUUR 32: BODEMPROFIEL VAN EEN WATERGANG IN DE STROOMRICHTING.....  | 38 |
| FIGUUR 33: LOCATIE VAN DE NIET GOED INGETEKENDE DUIKER IN TYGRON .....   | 38 |
| FIGUUR 34: DE RELATIEVE WATERSTAND LANGS DE LENGTE VAN EEN WATERGANG .....   | 39 |
| <br>   |    |
| TABEL 1: PARAMETER WAARDES VOOR ELK LEVEL IN DE GEVOELIGHEIDSANALYSE .....   | 18 |
| TABEL 2: ALLE MOGELIJKHEDEN VOOR D, P EN X.....  | 45 |
| TABEL 3: OPGEBOUWDE RANDOM TRAJECTEN .....   | 46 |
| TABEL 4: RESULTATEN SIMULATIES GEVOELIGHEIDSANALYSE .....  | 47 |

# 1 Introductie

## 1.1 Context

In watermanagement wordt uitgebreid gebruik gemaakt van gecomputeriseerde hydrologische modellen om efficiënt en kosteneffectief, analyses te maken. Eén van de grootste implementaties van hydrologische modellen is het simuleren van afstroming van water door neerslag. Er bestaan veel pakketten die hiervoor gebruikt kunnen worden. Veel van deze softwarepakketten zijn vooral gefocust op stroming van regenwater over het oppervlakte en door het riool, om te onderzoeken waar inundatie ontstaat (Hutchins et al., 2016). Bestuurders zoals waterschappen en gemeentes hebben echter veel meer vragen zoals; Waar infiltreert water in de grond? Wat voor effect heeft dit op de grondwaterstand? Via welke beken wordt water afgevoerd richting het hoofdsysteem? Tygron Geodesign Platform is een vrij nieuw softwarepakket waarmee dit soort vragen door middel van simulaties kunnen worden beantwoord. Voor bovengenoemde applicaties heeft Tygron zich al bewezen.

Origineel is Tygron ontwikkeld als visualisatietool. Doordat Tygron een 3D wereld creëert die automatisch wordt opgebouwd vanuit openbare data, zoals het AHN (Actueel hoogtebestand Nederland, [www.ahn.nl](http://www.ahn.nl)) en BRO (Basisregistratie ondergrond, [www.basisregistratieondergrond.nl](http://www.basisregistratieondergrond.nl)), kunnen simulatieresultaten heel mooi worden gevisualiseerd en gepresenteerd. Naarmate Tygron langer bestond, werden er steeds meer functionaliteiten toegevoegd, die modules worden genoemd. Er zijn bijvoorbeeld modules voor warmtesimulaties, verkeerssimulaties en simulaties over leefbaarheid. De watermodule berekent waterstroming binnen de 3D wereld van Tygron. Veel softwarepakketten voor hydrologische simulaties zijn vooral goed in het simuleren van een bepaald aspect van een watersysteem. Hierdoor zijn modelleurs vaak aangewezen op het combineren van onafhankelijke modellen die specifieke hydrologische processen simuleren (Hutchins et al., 2016). Dit is één van de redenen waarom de watermodule in Tygron steeds meer gebruikt wordt. Het programma is in staat om veel hydrologische processen zoals oppervlaktestroming, infiltratie, evaporatie, gewasevaporatie en grondwaterstromen integraal door te rekenen. Doordat Tygron modellen worden doorgerekend in de Cloud, is het programma niet afhankelijk van de rekenkracht van de computer van de modelleur. Alle gebruikers van de Tygron software maken gebruik van de supercomputer van Tygron, die zorgt voor een enorme rekenkracht voor alle modelleurs.

Tygron is nog steeds in ontwikkeling. Steeds meer toepassingen van de software worden getest en verbeterd. Zo is Tygron al op grote schaal gebruikt voor stresstesten. Hierin worden de gevolgen van klimaatverandering op stedelijk en landelijk gebied onderzocht om knelpunten te bepalen. Hierin wordt bijvoorbeeld oppervlakkige afstroming van een regenbui onderzocht om te zien waar er wateroverlast kan ontstaan.

De watermodule in Tygron heeft de potentie om een breed gebruikt pakket te worden in hydrologisch onderzoek en hydrologisch advies. Onderzoekers en ingenieurs zijn geïnteresseerd in de mogelijkheden van de software. Eén van de potentiële toepassingen waar Tygron op dit moment nog niet voor wordt gebruikt, is het simuleren van neerslag-afvoerstromen door een bekensysteem. Hiermee kunnen waterstanden in een watersysteem worden geanalyseerd, kan er onderzocht worden waar beken gevoelig zijn voor overstroming en kan de afvoercapaciteit naar het hoofdnetwerk worden geanalyseerd. Waterschappen gebruiken voor deze toepassing al jaren het zeer gerenommeerde pakket SOBEK, ontwikkeld door Deltaris ([www.deltaris.nl/en/software/sobek](http://www.deltaris.nl/en/software/sobek)). Onderzoek naar de mogelijkheden van de watermodule in Tygron kan ervoor zorgen dat Tygron een universeel pakket wordt voor hydrologische simulaties en daarbinnen een goed alternatief wordt voor bijvoorbeeld SOBEK.

## 1.2 Probleembeschrijving

Doordat Tygron voor zo veel verschillende vraagstukken gebruikt kan worden, heeft het de potentie om een breed gebruikt softwarepakket te worden voor onderzoekers, ingenieurs en adviseurs. De integraliteit van Tygron is op dit moment echter ook nog een nadeel. Doordat de simulaties van verschillende hydrologische processen gebaseerd zijn op dezelfde basisprincipes van de software, kan het zijn dat deze basisprincipes beter aansluiten bij het ene proces dan bij het andere proces. Zo kan de manier hoe data ingeladen wordt bijvoorbeeld makkelijk zijn bij een model van een polder, maar moeilijkheden geven bij een model van een bekensysteem. Ook is bijvoorbeeld al gebleken dat het gebruik van de Saint-Venant formules voor oppervlaktewater stroming (Kurganov & Guergana, 2007), zorgt voor 95% aan nutteloze rekentijd bij grondwaterberekeningen (Kneple, 2020). Dit omdat 95% van de rekentijd wordt besteed aan het berekenen van kleine golfjes in een watergang, terwijl een modelleur hier niet in geïnteresseerd is tijdens een grondwatervraag.

Deze voorbeelden gaan over een werkwijze van data inladen en rekentijd. Echter zou dit ook kunnen leiden tot onnauwkeurige of onbetrouwbare resultaten. Daarom moet er bij elke potentiële nieuwe implementatie goed worden gekeken naar de implicaties van de basisprincipes van de software, voor die specifieke implementatie. Omdat Tygron potentie heeft voor het simuleren van neerslag-afvoer stroming door watergangen, maar dit nog niet breed is uitgevoerd, is er nog erg weinig bekend over de werking en praktische uitvoering van dit soort simulaties. Veel factoren en invloeden in een Tygron model, voor deze implementatie zijn nog niet goed onderzocht en getest. Ook is het nog niet duidelijk hoe een model van een bekensysteem in Tygron het beste geïntialiseerd kan worden.

## 1.3 Onderzoeksdoel en onderzoeksvragen

Het doel van dit onderzoek is:

***Het creëren van inzicht in de werkwijze, mogelijkheden en beperkingen van het modelleren van een bekensysteem in Tygron voor neerslag-afvoer stroming simulaties***

Het modelleren van een bekensysteem in Tygron vergt vier stappen:

1. De opzet van het model;
2. De initialisatie;
3. De kalibratie;
4. De simulatie.

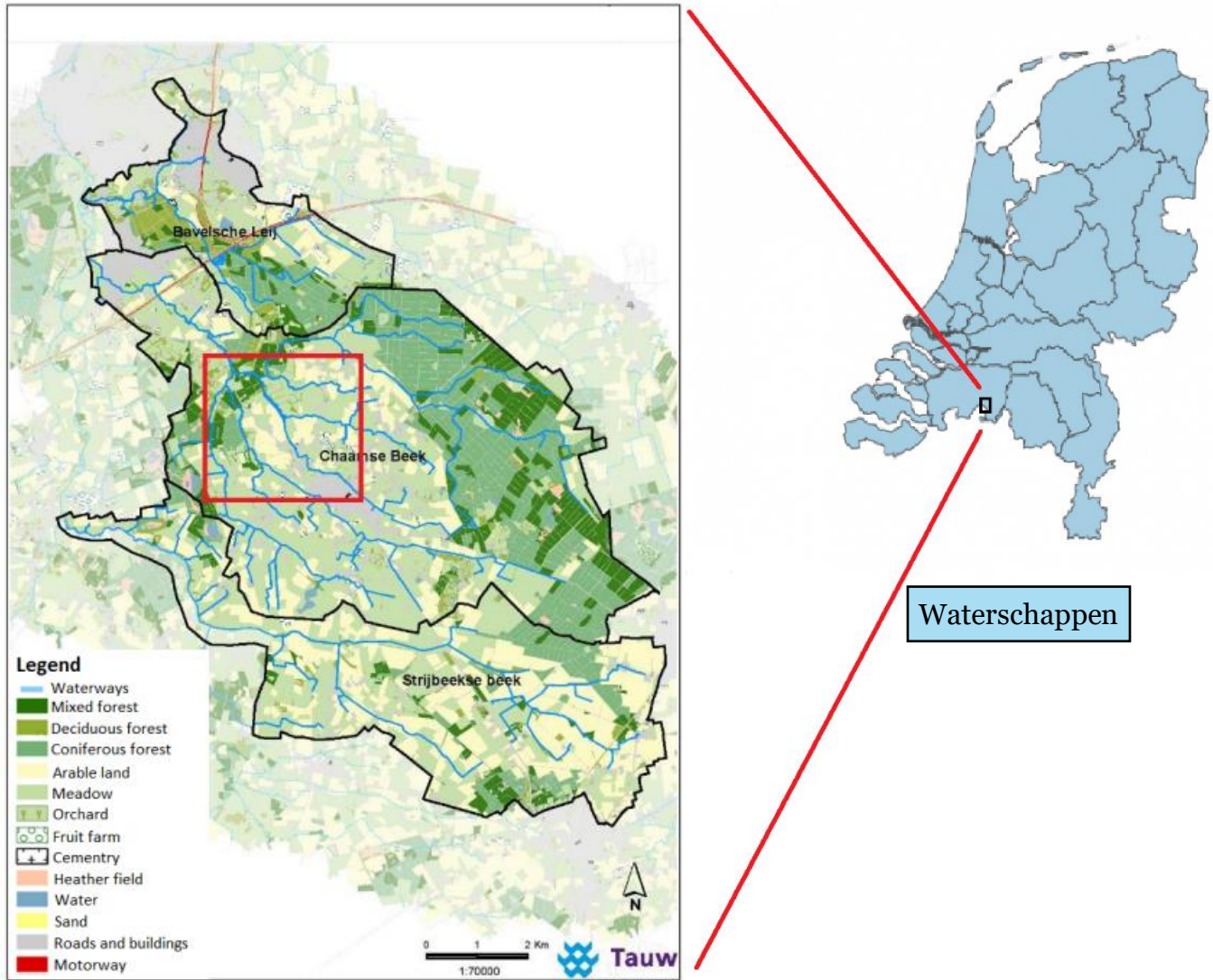
Tygron combineert verschillende openbare datasets om automatisch een model op te zetten van het interessegebied. Omdat de tijd voor dit onderzoek beperkt is, worden daarom alleen de laatste drie stappen onderzocht. Dit gebeurt aan de hand van drie onderzoeksvragen:

1. ***Welke manier van initialisatie geeft de beste resultaten qua toepasbaarheid, validiteit van waterstanden en rekentijd?***
2. ***Welke belangrijke invloeden voor een kalibratie, heeft de Manning coëfficiënt voor ruwheid, op de waterstand in een watergang in Tygron?***
3. ***Welke beperkingen heeft de Tygron software in het simuleren van neerslag-afvoer stroming in een bekensysteem?***



# 1.4 Studiegebied

Het bekensysteem dat in dit onderzoek wordt geanalyseerd zijn de Chaamse beken. Dit is een bekensysteem dat ten zuidoosten van Breda ligt. In Figuur 1 is het modelgebied van vier bij vier kilometer aangegeven met het rode vierkant.



*Figuur 1: De Chaamse Beken (gecombineerde kaart van Eigenhuijsen et al. (2008) en Kamsma (2019))*

De Chaamse beken bestaan uit een netwerk van zes afzonderlijke beken die allemaal uitmonden in de Chaamse Beek. Het bekenstelsel is onderdeel van het werkveld van Waterschap Brabantse Delta. Het landschap kenmerkt zich als een combinatie van landbouwgrond en naaldbos. In de jaren negentig zijn er een aantal maatregelen genomen om het oppervlaktewater langer vast te houden. Zo zijn alle beken voorzien van stuwen en zijn er bergingsbassins aangelegd (Eigenhuijsen et al., 2008). Tegenwoordig is er in de winter regelmatig wateroverlast doordat beken buiten hun oevers treden.

# 1.5 Leeswijzer

Dit onderzoek is opgedeeld in drie delen. In elk deel wordt een andere stap in het modelleren onderzocht. Het eerste deel is de initialisatie, het tweede deel de kalibratie en het derde deel de simulatie. Elk deel, heeft een eigen onderzoeksvraag die het onderzoek verder specificeert. Na de theoretische achtergrond volgt het hoofdstuk onderzoeksmethodiek en het hoofdstuk resultaten. Deze laatste twee hoofdstukken zijn elk opgedeeld in drie paragrafen. In elke paragraaf wordt één van de drie onderdelen van het onderzoek behandeld. De paragrafen zijn genoemd naar wat er daadwerkelijk in het onderzoek wordt uitgevoerd.

- H2 Theoretische achtergrond
- H3 Onderzoeksmethodiek
  - o H3.1 Modelinitialisatie
  - o H3.2 Gevoeligheidsanalyse (kalibratie)
  - o H3.3 Validatie (simulatie)
- H4 Resultaten
  - o H4.1 Modelinitialisatie
  - o H4.2 Gevoeligheidsanalyse (kalibratie)
  - o H4.3 Validatie (simulatie)

## H2 Theoretische achtergrond

Hoofdstuk twee is de theoretische achtergrond van de software die gebruikt is. Hierin worden een aantal cruciale zaken besproken over Tygron. Deze informatie is belangrijk om de analyses in het onderzoek goed te kunnen begrijpen.

## H3 Onderzoeksmethodiek

Dit hoofdstuk is opgedeeld in de drie delen van het onderzoek. In elke sub-sectie van dit hoofdstuk wordt de onderzoeksmethodiek voor een ander deel van het onderzoek besproken (eg: Modelinitialisatie, gevoeligheidsanalyse en validatie).

### H4.1 Modelinitialisatie

In deze paragraaf worden de resultaten van de eerste onderzoeksvraag besproken. In de methode is deze vraag onderdeel opgedeeld in twee delen, het berekenen van een initieel waterpeil en het omzetten van resultaten naar een peilgebieden bestand. In paragraaf 4.1 worden de resultaten ook in deze twee delen besproken.

### H4.2 Gevoeligheidsanalyse

Paragraaf 4.2 slaat terug op het tweede deel van het modelleren in Tygron, de kalibratiestap. In deze paragraaf is de invloed van de ruwheid in het perspectief van andere parameters geplaatst. Vervolgens wordt de debietsafhankelijke invloed van de ruwheid besproken.

### H4.3 Validatie

In hoofdstuk 6 wordt een vergelijking gemaakt tussen de resultaten uit een SOBEK-simulatie en het Tygron model. De validatie slaat dus terug op het derde deel van het modelleren in Tygron, de simulatie. Vervolgens worden dwarsdoorsnedes van watergangen in SOBEK en Tygron vergeleken met fysieke bodemmetingen. Bij watergangen die niet goed zijn ingetekend door Tygron wordt geprobeerd dit handmatig te verbeteren, waarna de resultaten hiervan worden besproken. Als laatste wordt er in dit hoofdstuk wordt de stroming door duikers en uitlaten en de invloed hiervan op modelresultaten besproken.

## 2 Theoretische achtergrond

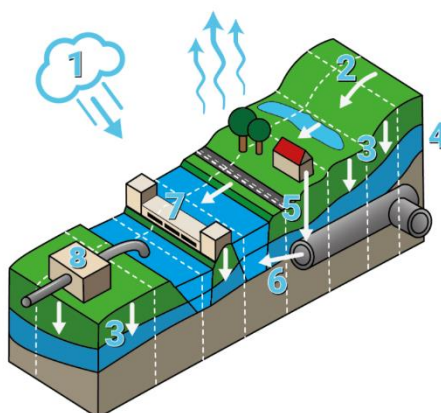
De watermodule in Tygron kan een groot aantal hydrologische relaties doorrekenen. Deze hydrologische relaties worden kort besproken. Hierna wordt een uitleg gegeven van een aantal processen en definities die belangrijk zijn in de uitvoer van dit onderzoek.

Tygron is een rastermodel. Dit betekent dat er een modelgebied is van een bepaalde grootte. Dit modelgebied wordt opgedeeld in rastercellen. Vervolgens worden alle berekeningen per raster cel gedaan. De grootte van deze rastercellen kan worden ingesteld. Het kleinste oppervlak van een cel waarmee gerekend kan worden is 0,5 x 0,5 meter. In een interessegebied kunnen dus analyses worden uitgevoerd voor elke halve meter in dat modelgebied. In Tygron zou je hierdoor bij wijze van spreken kunnen uitrekenen, hoe een tuin onder water stroomt als de tuinslang de hele dag aan is laten staan.

### 2.1 De watermodule

De watermodule berekent waterstroming binnen de 3D wereld van Tygron. In deze watermodule is er via een aantal hydrologische relaties interactie tussen regen, oppervlaktewater, grondwater, gebouwen en het riool. Een overzicht van deze relaties is gegeven in Figuur 2.

1. Neerslag en verdamping
2. Oppervlaktestroming
3. Infiltratie en exfiltratie
4. Horizontale grondwaterstroming
5. Riool invoer
6. Riool overstort
7. Stroming over constructies
8. Invoer/Uitvoer



*Figuur 2: Overzicht van de hydrologische relaties in de watermodule van Tygron (Tygron Support, 2021 - e)*

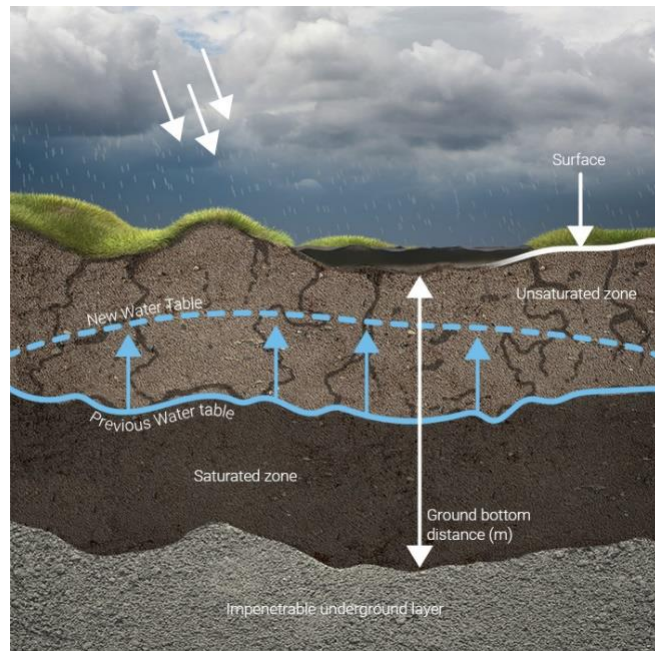
Neerslag kan zowel in tijd als ruimte variëren. Zo kunnen ook heel makkelijk ontwerpbuien worden toegevoegd. Er kan vervolgens voor worden gekozen om de neerslag over het hele modelgebied te laten vallen of over een gedeelte van het modelgebied. Op dit moment is de mogelijkheid tot het gebruik van radar data in ontwikkeling. Op die manier zou het in de toekomst mogelijk moeten zijn om regen in real time te simuleren.

Water kan het modelgebied instromen door neerslag en door inlaten. Het kan het modelgebied weer uitstromen door verdamping en uitlaten. Deze in- en uitlaten zijn belangrijk en worden apart nog besproken. Het water in het model kan vervolgens over het oppervlak stromen, infiltreren in de grond en opgenomen worden in het riool. Water wordt alleen opgenomen in het riool als er rioolgebieden zijn gespecificeerd in het project. Oppervlakte stroming wordt berekend aan de hand van de berekeningen gebaseerd op de Saint-Venant vergelijkingen voor ondiep water zoals beschreven in Kurganov & Guergana (2007). Deze formules berekenen de stroming van het water gebaseerd op het verschil in waterhoogte tussen twee rastercellen en is daarmee dus vooral afhankelijk van het (AHN) hoogtemodel.



Energieverlies door frictie met de ondergrond wordt hierin meegenomen door de Gauckler-Manning ruwheid coëfficiënt van het oppervlakte type (Tygron Support, 2021 - d).

De ondergrond in Tygron is opgebouwd uit drie lagen: de *onverzadigde* laag, de *verzadigde* laag en een *ondoordringbare* laag. Water kan vanaf het oppervlak infiltreren in de onverzadigde laag. Deze laag kan alleen water verticaal transporteren en niet opslaan. Vervolgens kan het vanuit de onverzadigde laag infiltreren in de verzadigde laag. In de verzadigde laag wordt water opgeslagen en kan het horizontaal stromen. Deze laatste infiltratie zorgt voor een stijging van het grondwaterpeil. Het grondwaterpeil bepaalt namelijk de hoogte van de verzadigde laag. De grens van de verzadigde laag en de onverzadigde laag is het grondwaterpeil. Op een bepaalde afstand onder het oppervlak (standaard 10 meter), begint een ondoordringbare laag. Hier kan geen water door stromen, dit is een randvoorwaarde van het model. De snelheid waarmee water infiltreert, is gebaseerd op de infiltratiesnelheid, in meter per dag, die gespecificeerd is voor elk oppervlakte type en elk grondtype van de ondergrond. Het berekenen van grondwater kan worden uitgezet in de simulatie instellingen. In dit geval bepaalt het oppervlakte type de infiltratie snelheid. Er is nu geen limiet aan de hoeveelheid water die kan worden opgeslagen. Als er wel met grondwaterberekening wordt gerekend, wordt de snelheid van infiltratie bepaald door de minst snelle parameter, of de infiltratie snelheid van het oppervlakte type of de infiltratiesnelheid van de ondergrond. Meestal is dit de infiltratiesnelheid van de ondergrond.



Figuur 3: Overzicht ondergrond in Tygron (Tygron Support, 2021 - e)

## 2.2 Digitaal hoogtemodel en hoogtemodel in Tygron

Om gebruik te kunnen maken van het schema van berekeningen zoals beschreven door Kurkanov moet elke cel een constante lineaire helling hebben in de x en de y richting (Tygron Support, 2021 - d). Dit is niet het geval in het AHN. Daarom moet het hoogtemodel in Tygron worden aangepast. Dit gebeurt door middel van “linear piecewise reconstruction” (Kurganov & Guergana, 2007). De hoogte van elke cel kan hierdoor afwijken van de originele hoogte uit het AHN. In Figuur 4 is de gele lijn het AHN en de rode lijn het hoogtemodel waar Tygron mee rekent.

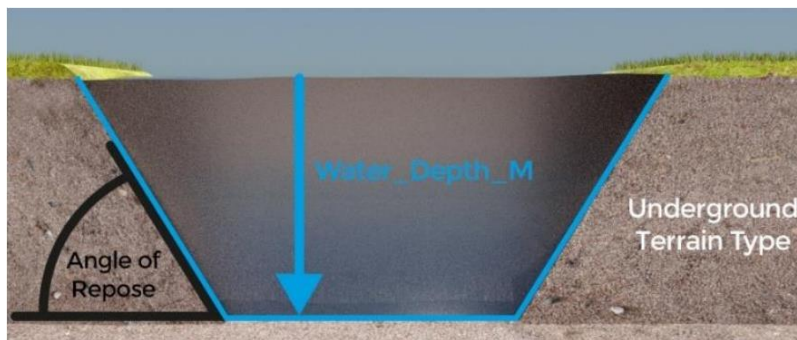


Figuur 4: Uitsnede digitaal hoogtemodel (AHN) (gele lijn) en het hoogtemodel waarmee Tygron rekent (rode lijn)



## 2.3 Intekenen van het wateroppervlak

Het hoogtemodel is gebaseerd op het AHN. Het AHN heeft geen hoogtemetingen onder water. Hierdoor kunnen watergangen dus niet volledig worden ingetekend op basis van het AHN. Daarom is er in Tygron een benadering om watergangen in te tekenen. Uit de BGT (Basisregistratie grootschalige topografie, [www.kadaster.nl/zakelijk/registraties/basisregistraties/bgt](http://www.kadaster.nl/zakelijk/registraties/basisregistraties/bgt)) haalt Tygron polygonen die gespecificeerd als “waterloop”. Vervolgens identificeert Tygron de hoogte in het hoogtemodel aan de zijkanten van deze polygoon als basishoogte. Vanuit deze hoogte trekt Tygron aan beide zijden een schuine oever naar beneden. De helling van deze lijn wordt bepaald door de “angle of repose” van het type ondergrond ter plaatse. Deze “angle of repose” in Tygron is gebaseerd op de hoek van interne wrijving van het type grond. Tussen verschillende types grond varieert deze waarde ongeveer tussen de 25 graden (kleigronden) en de 35 graden (bewerkte gronden, roergronden, moeras). De schuine lijn van de oever wordt doorgetrokken naar beneden totdat, ofwel de vooraf gespecificeerde waterdiepte is bereikt, of totdat de oevers elkaar snijden. Deze waterdiepte is standaard twee meter voor alle watergangen.



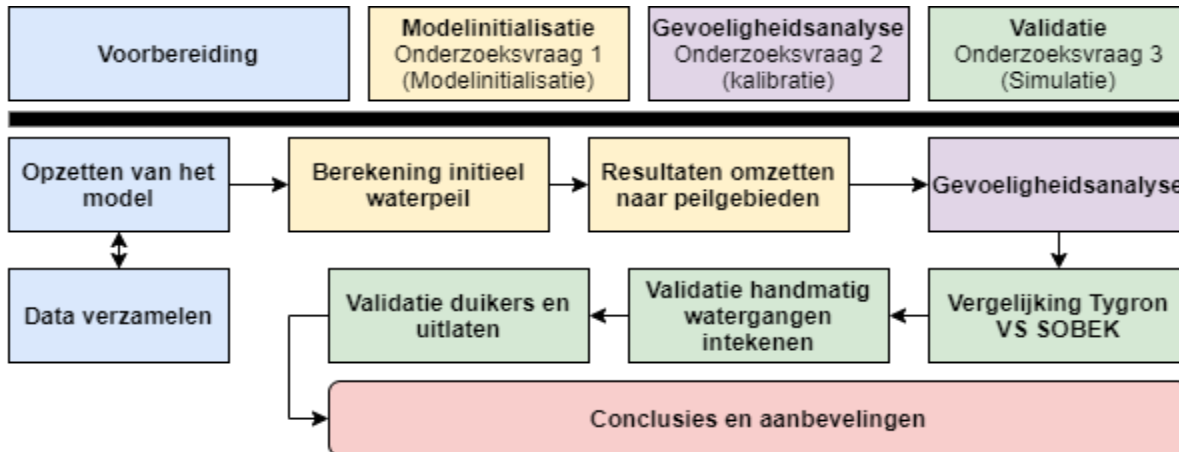
Figuur 5: Ingetekende watergang in Tygron. (Tygron Support, 2021 - b).

## 2.4 Inlaat en uitlaat

Door de manier waarop het raster is bepaald in Tygron moeten de buitenste cellen van het modelgebied inactief zijn (Tygron Support, 2021 - a). Over de buitenste twee cellen van het modelgebied kan geen water stromen. Dit betekent ook dat er geen water in of uit het model kan stromen over het maaiveld of door watergangen. Dit is een probleem als het modelgebied niet een volledig watersysteem omvat. Als er beken zijn die bovenstrooms het modelgebied in moeten stromen en benedenstrooms het model weer uit, moet hiervoor een oplossing in het model worden geïmplementeerd. Dit zijn de in- en uitlaten. Inlaten voegen een bepaalde hoeveelheid water (in meter per seconde) toe aan de cel waar de inlaat aan is toegevoegd. Uitlaten halen een hoeveelheid water (in meter per seconde) van de cel af.

Deze hoeveelheid water kan constant worden ingesteld of kan worden gevarieerd door middel van een debietreeks. Dit debiet kan verder worden gereguleerd door een bepaalde streefwaterhoogte aan een in- of uitlaat toe te voegen. Een inlaat zal dan water toevoegen aan de cel totdat deze waterhoogte is bereikt, terwijl een uitlaat water boven deze waterhoogte zal wegnemen. Ook deze waterhoogte kan in tijd worden gevarieerd. De in- en uitlaten moeten voor de simulatie ingesteld zijn. Er is geen mogelijkheid om de in- en uitlaten te laten controleren tijdens de simulatie.

# 3 Onderzoeksmethodiek



Figuur 6: Stroomdiagram van de methode die is gevolgd

## 3.1 Modelinitialisatie

Een model heeft een bepaalde initialisatietijd nodig. In deze tijd moet er water aan het model worden toegevoegd en moet het water in het model realistisch gaan stromen. Zodra er een bepaalde realistische stroming is bereikt in het model, kan een regenbui worden toegevoegd om het effect hiervan op de afvoerstroming te simuleren.

Het toevoegen van water aan het model in Tygron kan niet gedaan worden met een standaard instelling voor waterdiepte. Dit kan alleen gedaan worden door aan de watervlakken in het model een waterhoogte in NAP-hoogte toe te kennen. Hiervoor is het gebruik van een GIS-programma noodzakelijk. Ook is er geen functie waarmee het resultaat uit een eerdere simulatie direct als beginpunt voor een tweede simulatie kan worden gebruikt. Hiernaast zijn resultaten uit Tygron altijd in de vorm van een rasterbestand, terwijl de invoer in Tygron altijd een vectorbestand moet zijn. Om initiële waterstanden (zonder stroming) te bepalen aan de hand van resultaten uit een eerdere simulatie, is het gebruik van een GIS-programma waarin rasterbestanden omgezet kunnen worden naar vectorbestanden dus ook noodzakelijk.

Voor een model van een polder is dit geen probleem en juist makkelijk. Hier hebben watergangen over grote lengte nagenoeg dezelfde NAP-bodemhoogte. Er kan in een GIS-programma snel voor grote vlakken een initieel waterpeil op NAP-hoogte worden ingesteld op basis van de bodemhoogtes. In dit onderzoek is echter een modelgebied gekozen met een redelijk groot verhang (2-3 m/km). Dit zorgt ervoor dat NAP-bodemhoogtes erg verschillen binnen het modelgebied, maar vooral ook binnen watervlakken. Hierdoor kan er niet één waterpeil op NAP-hoogte worden ingesteld per watervlak. Het verhang in de bodemhoogte moet namelijk ook terug te zien zijn in het waterpeil.

Om de initialisatietijd te verkorten, wordt er onderzocht hoe er toch een initieel waterpeil gespecificeerd kan worden in het model. Dit gebeurt door eerst waterstanden te berekenen in Tygron en deze resultaten vervolgens via een GIS-programma om te zetten naar een peilgebiedenbestand. Dit bestand kan dan vervolgens als invoer gebruikt worden voor echte simulaties.

### 3.1.1 Initieel waterpeil berekenen

Er worden twee methoden onderzocht om een initieel waterpeil op NAP-hoogte te berekenen in het model. Het berekenen gebeurt bij beide methodes door een simulatie te draaien in Tygron. Hierdoor wordt een waterhoogte gespecificeerd voor elke raster cel in het modelgebied. De simulaties om het initiële waterpeil te bepalen, zijn simulaties van 12 dagen waarbij er aan het begin geen water aanwezig is in het model. Er stroomt een vast debiet door de bovenstroomse inlaten van het modelgebied. Dit moet ervoor zorgen dat er na een bepaalde simulatietijd een stabiele stroming en een stabiele waterhoogte ontstaat in het volledige model. Een stabiele waterhoogte is gedefinieerd als een fluctuatie in de waterstand over vijf uur, kleiner dan twee centimeter. De twee methoden die zijn gebruikt, verschillen alleen in de manier van rekenen. Bij methode één wordt alleen stroming op het oppervlak doorgerekend en wordt de interactie met grondwater uitgeschakeld. Bij de tweede methode wordt het oppervlaktewater en infiltratie in de ondergrond doorgerekend. Voor beide methodes wordt een simulatie met een laag debiet gedraaid en een simulatie met een twee keer zo hoog debiet.

Voor elk scenario geldt dat alleen de watergangen en een gebied van 30 meter rondom de watergangen worden doorgerekend. Dit zorgt voor een aanzienlijk minder lange rekentijd. Omdat er niet wordt gerekend met een regenbui, is er geen stroming op het maaiveld verwacht buiten het berekende gebied. Deze instelling zal dus een verwaarloosbare invloed heeft op de resultaten terwijl het wel zorgt voor een verkleining van de rekentijd. Het doel van deze initiële simulaties is het creëren van een initieel waterniveau, niet een exacte kalibratie. Daarom is in de beoordeling vooral de vergelijking tussen verschillende resultaten belangrijk. Hieruit is het namelijk te beoordelen wat voor invloed een bepaalde instelling heeft op rekentijd en resultaat en welke methode het beste gebruikt kan worden in welke situatie.

### 3.1.2 Resultaten omzetten naar peilgebieden

Met de resultaten uit de eerdere simulaties wordt via Qgis ([qgis.org/nl/site/](http://qgis.org/nl/site/)) een peilgebiedenbestand gemaakt. Hiervoor worden drie methoden onderzocht.

Bij de eerste methode wordt het rasterbestand direct geconverteerd naar een vectorbestand. Hierdoor is er aan de waardes niets veranderd, behalve dat elke cel in een rasterbestand, nu een polygoon in een vectorbestand is. Dit resulteert in een bestand waarvoor voor elke cel in het modelgebied een initiële waterhoogte is gespecificeerd.

Bij de tweede methode wordt naast het rasterbestand met waterhoogtes, ook alle gebieden die Tygron specificeert als watergebied geëxporteerd in een vector bestand. Omdat deze watergebieden in principe invoerdata zijn, kan dit wel worden geëxporteerd in een vectorbestand. Dit vectorbestand had ook direct uit de BGT geladen kunnen worden. Vervolgens wordt, door beide bestanden in Qgis over elkaar te leggen, voor elk watervlak, een gemiddelde waterhoogte bepaald op basis van de data uit het rasterbestand. Door een gemiddelde waarde te bepalen per watergebied hoeft het rasterbestand niet te worden omgezet naar een vectorbestand. Dit is een proces wat vaak veel tijd vergt. Met deze methode kan ook alleen het hoogtemodel gebruikt worden als input voor de peilgebieden. Bijvoorbeeld door de gemiddelde bodemhoogte in een watergang te bepalen en vervolgens hier een waterpeil aan toe te voegen. Dit is echter minder accuraat dan de rasterwaardes gebruiken.

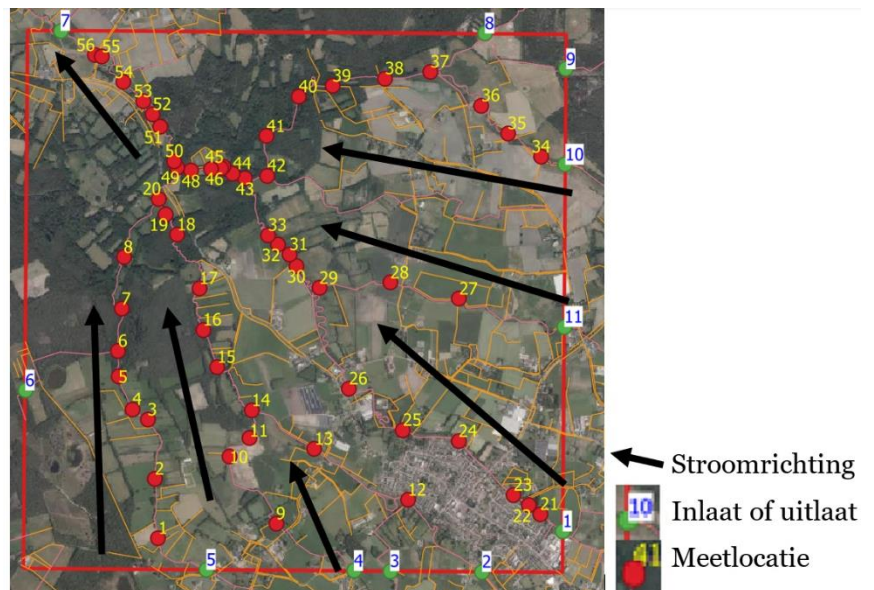
Het nadeel is, dat er bij deze methode grotere verschillen zitten in aan elkaar grenzende watergangen. Er is op deze manier namelijk geen verhang in de waterstand per watergang. De verschillen tussen

waterhoogtes in aangrenzende watergangen kan oplopen tot 20 centimeter. Dit laatste kan worden overkomen door de polygonen van de watergebieden eerst in kleinere polygonen te verdelen om zo het verhang enigszins te benaderen. Dit kost echter erg veel tijd en is daarom niet overwogen als reële optie.

Bij de derde methode worden ook het rasterbestand met waterhoogte waarden en het vectorbestand met watergebieden geëxporteerd. Het rasterbestand bevat waarden voor het volledig uitgerekende gebied in Tygron. Dit betekent dat er ook hoogtewaarden van de oevers en de 30 meter buffer rondom de watergangen in staan. Voor een initieel waterpeil zijn deze waarden niet interessant. Alle hoogtewaarden die niet binnen een watergebied vallen worden daarom verwijderd. Het rasterbestand wordt vervolgens geconverteerd naar een vectorbestand. De hoogtewaarden van de oevers die binnen de watergebieden vallen zijn nu nog niet verwijderd. Hierdoor bevat het vectorbestand erg veel kleine polygonen met de oppervlakte van een raster cel. Dit maakt het bestand onwerkbaar groot. Daarom worden in een keer alle polygonen met een oppervlakte van een raster cel ( $0,25 \text{ m}^2$ ) verwijderd. Het resulterende bestand is niet dekkend voor alle watergangen. Daarom wordt door van alle polygonen het zwaartepunt te bepalen en gebruik te maken van Voronoi polygonen een dekkend peilgebieden bestand gemaakt. De Voronoi polygoon van een zwaartepunt omvat alle ruimte in het modelgebied dat dichterbij dat punt ligt dan bij enig ander zwaartepunt in het modelgebied. Zo worden de peilgebieden vergroot. Er is nu niet alleen voor de watergangen, maar juist voor het volledige model een initieel waterpeil is bepaald, oppervlaktewater en grondwater. Deze waterhoogtes zijn gespecificeerd voor kleinere gebieden dan bij het generaliseren op basis van watergebied. Door deze manier kan naast dat het grondwaterpeil wordt geïnitieerd, dus ook makkelijk het verhang in een watergang worden benaderd. De verwachting is dan ook, dat generaliseren op basis van waterstanden betere resultaten geeft en sneller van een stilstaand model naar een stabiel stromend model gaat.

Deze peilgebieden zorgen voor een initieel waterpeil in het model. Echter moet het water nog wel gaan stromen, waardoor er nog steeds een initialisatieperiode nodig is in een simulatie. Deze periode is echter wel veel korter, omdat er nu al wel water aanwezig is in het model. Met de gemaakte peilgebieden als initiële waarden zijn daarom weer simulaties gedaan.

Om de resultaten te kunnen beoordelen zijn er over het hele model, in watergangen, meetlocaties geplaatst. Het Tygron model is zo ingesteld dat het als resultaat de waterhoogte (NAP) op deze locaties wordt gegeven. De locaties zijn genummerd. Startend in de meest westelijke watergang, bovenstrooms. De locaties zijn oplopend genummerd langs de stroom naar beneden tot er een andere watergang wordt gekruist. Zo is elke watergang voorzien van meetlocaties met als laatste de watergang benedenstrooms, beginnend bij meetlocatie 50.



Figuur 7: Meetlocaties in het modelgebied

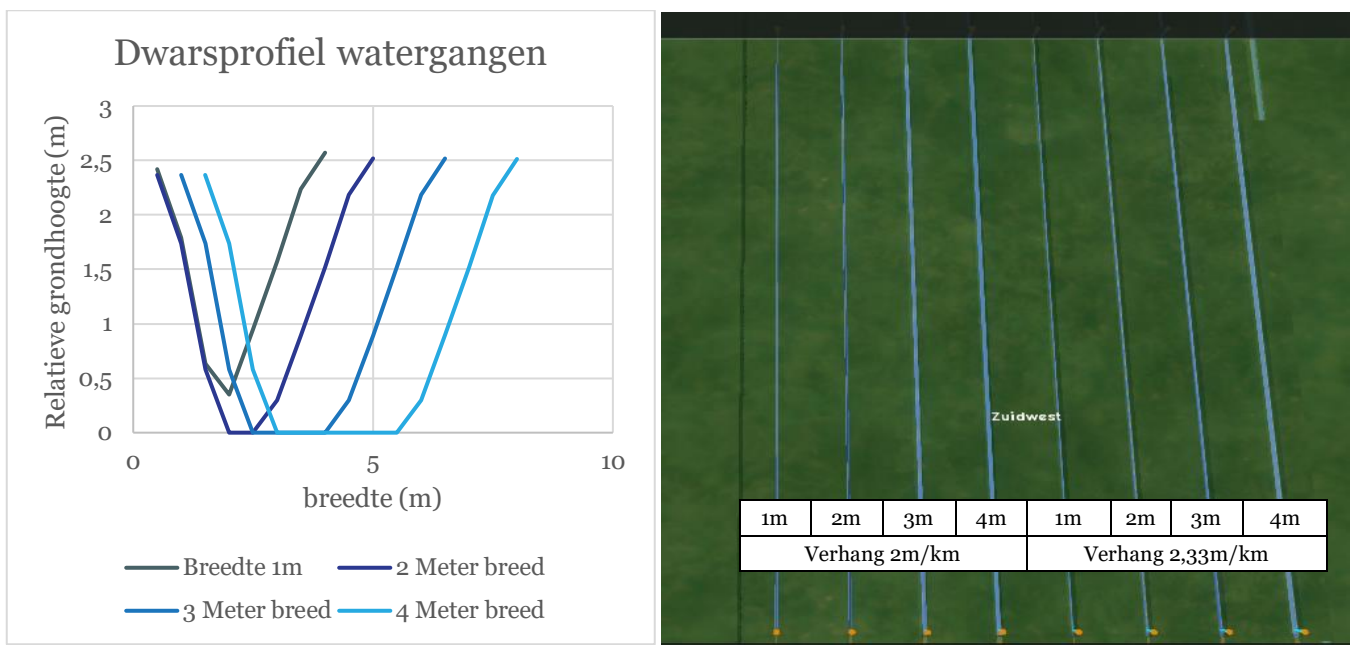


## 3.2 Gevoeligheidsanalyse

Het onderzoeken van de invloed van de Manning coëfficiënt in het model is belangrijk omdat dit de parameter is waarmee een Tygron model gekalibreerd kan worden. Door een gevoeligheidsanalyse kan er inzicht verkregen worden in het kalibreren van een Tygron model.

Voor de gevoeligheidsanalyse is een apart model opgezet. In een apart model kan namelijk een gecontroleerd onderzoek worden opgezet. In het model van de Chaamse beken zijn te veel factoren die effect hebben op de resultaten, zoals duikers en stuwen. In het aparte model zijn alleen de watergangen die nodig zijn voor de analyse ingetekend. Samen met het feit dat dit model veel kleiner is dan het model van de Chaamse Beken, bespaart dit ook enorm veel rekentijd.

Het model bestaat uit 4 rechte watergangen. Elke watergang wordt door Tygron ingetekend op basis van een polygoon en de "angle of repose". Deze polygonen hebben een breedte variërend van één meter tot vier meter. Aan beide kanten van elke watergang is in het hoogtemodel een strook van een meter breed getekend, met een verhang richting de watergang van 0,5 meter per meter. Dit representeert het talud naast watervlakken, die in het model van de Chaamse Beken nog bepaald worden door het AHN. Doordat het hoogtemodel waarmee wordt gerekend, door Tygron wordt aangepast zodat het de Saint-Venant formules ondersteund, vallen alle watergang breder uit dan origineel bedoeld. Deze vier watergangen worden vier keer ingetekend, telkens met een ander verhang.



Figuur 8: Overzicht modelopzet gevoeligheidsanalyse

Het effect van de ruwheid coëfficiënt op de waterstand in de watergang wordt onderzocht. Omdat de waterstand niet alleen afhankelijk is van de ruwheid, is het belangrijk om de gevoeligheid in het perspectief van andere invloeden te plaatsen. Om dit te bewerkstelligen is er gekozen om een gevoeligheidsanalyse te doen volgens de “elementary effect method” van Morris (Morris, 1991). Dit is een methode die valt in de categorie OAT (one at a time). Dit betekent dat er één parameter veranderd wordt per simulatie. De Manning formule laat zien dat de snelheid van het water en daarmee de waterstand, afhankelijk is van de ruwheid coëfficiënt, het verhang en de hydraulische straal (Manning, 1891). Omdat de hydraulische straal mede afhankelijk is van de waterstand en dus niet ingesteld kan worden, is ervoor gekozen het debiet door de watergang te variëren. De waterstand zal namelijk naast de ruwheid ook afhangen van de hoeveelheid water die door de watergang stroomt.

In de gevoeligheidsanalyse worden er dus drie parameters gevarieerd, de ruwheid, het verhang en het debiet. Daarnaast zijn er vier watergangen met verschillende breedtes die vergeleken kunnen worden. In het model van de Chaamse Beken varieert het debiet door een watergang ongeveer tussen de 0,1 en 1 m<sup>3</sup>/s. Het verhang in een watergang varieert tussen de twee en drie meter per kilometer. De ruwheid varieert in Tygron tussen de 0,01 en 0,04 S/m<sup>(1/3)</sup>. Daarom zijn deze waarden als bereik gekozen voor de parameters in de gevoeligheidsanalyse. De drie parameters kunnen variëren in het gekozen bereik dat verdeeld is in vier levels. Voor elke parameter zijn dus vier instellingen nodig. Dit betekent dat er 4x4x4 simulaties nodig zijn om alle combinaties van parameters één keer te simuleren. Echter, omdat de variatie in verhang in één keer is ingetekend in het model, zijn er maar 4x4=16 simulaties nodig. Het effect van een parameter wordt bepaald door het verschil in waterstand, wanneer één parameter van het ene level naar het andere level veranderd.

*Tabel 1: Parameter waarden voor elk level in de gevoeligheidsanalyse*

| <b>Levels</b>                        | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Ruwheid (S/m<sup>(1/3)</sup>)</b> | 0,01     | 0,02     | 0,03     | 0,04     |
| <b>Verhang (m/km)</b>                | 2,00     | 2,34     | 2,67     | 3,00     |
| <b>Debiet (m<sup>3</sup>/s)</b>      | 0,1      | 0,4      | 0,7      | 1,0      |

De analyse geeft als resultaten een gemiddelde variatie in waterstanden door de variatie in parameter en daarmee de invloed van de parameter. De standaarddeviatie van de resultaten geeft aan of de invloed van een parameter non-lineair is of voor een bepaalde mate komt door interactie met andere parameters. De uitgebreide beschrijving en het proces van de “Elementary Effect Method” dat is gevolgd, is beschreven in Appendix A.

## 3.3 Validatie

Eerst worden modelresultaten uit het Tygron model van de Chaamse Beken vergeleken met resultaten uit een SOBEK-model van hetzelfde gebied. Er zijn onvoldoende recente gemeten waterstand- en debietgegevens beschikbaar om het Tygron model te valideren. Het Waterschap vertrouwt voor hun analyses op het SOBEK model van de Chaamse Beken. Daarom is er in dit onderzoek voor gekozen om de resultaten uit SOBEK te gebruiken als referentie.

Er wordt er eerst een simulatie in SOBEK gedraaid met een constante instroom. In SOBEK is de instroom van water een temporaal constante neerslag over het hele gebied. Deze neerslag is door het waterschap bepaald als constante instroom voor het model en is gebaseerd op historische neerslag uit 1995. Dezelfde neerslag is ook in Tygron ingevoerd. Dit zorgt ervoor dat het resultaat uit beide modellen ook een constante stroming is met constante waterhoogtes. Het model in SOBEK omvat het volledige stroomgebied van de Chaamse Beken. Dit is niet het geval voor het model in Tygron. Daarom zijn de debietresultaten uit SOBEK, op de plekken waar in Tygron een inlaat staat, gebruikt voor de invoerwaardes van deze inlaten. Hierdoor zijn de twee modellen qua instroom van water gelijk aan elkaar.

Er zijn wel metingen beschikbaar van dwarsprofielen van een aantal watergangen in het gebied. Deze metingen worden gebruikt om de watergangen in Tygron te valideren. Hierin worden de watergangen in Tygron en in SOBEK vergeleken met bodemmetingen recentelijk gedaan in het gebied. Tygron tekent watergangen automatisch in op basis van het AHN en de BGT. Als hier fouten in worden gemaakt kunnen watergangen ook handmatig worden ingetekend. Dit is gedaan voor verschillende locaties in het Tygron model. De mogelijkheden en beperkingen hiervan worden beoordeeld op werkbaarheid en realiteit van het behaalde resultaat. Naast de validatie van de watergangen wordt ook de stroming door duikers en de uitlaten beoordeeld. Er wordt gekeken of hier geen fouten in zitten, of de doorstroom plausibel is en of negatieve invloeden beperkt kunnen worden.

# 4 Resultaten

## 4.1 Modelinitialisatie

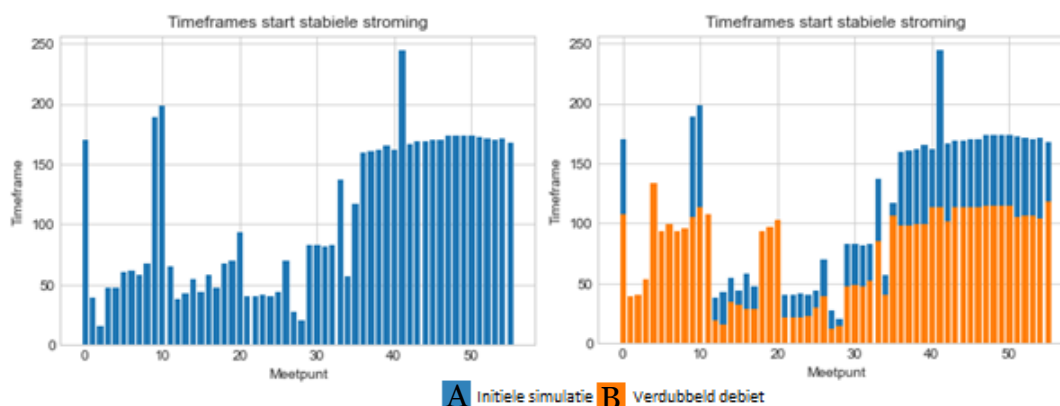
Elke simulatie die gedaan wordt met een model is een momentopname. In deze situaties is er in werkelijkheid natuurlijk al water aanwezig in het gebied. Daarom is de eerste vraag: hoe wordt ervoor gezorgd dat de beginsituatie van de simulatie het beste deze realiteit weergeeft. De beste resultaten worden geboekt als er veel waterhoogte- en debietmetingen zijn in het modelgebied. Dit is echter niet altijd voorhanden. Ook zijn deze metingen niet op elke vierkante meter van het gebied beschikbaar.

### 4.1.1 Berekening initieel waterpeil

#### 4.1.1.1 Alleen oppervlaktewater berekenen

In de resultaten is gekeken hoelang het duurt voordat er een stabiele stroming ontstaat. Binnen de simulatie schrijft Tygron een resultaat weg volgens een bepaald interval. In de simulatie is er een interval van een uur bepaald. Dit betekent dat voor 12 dagen er 289 tijdstappen zijn (t=0 is ook een tijdstap). In Figuur 9 zijn de resultaten uit twee simulaties te zien. In Figuur 9a is af te lezen dat overall in het modelgebied een stabiele waterstand is behaald na 200 tijdstappen. Het duurt in het model van de Chaamse Beken dus 200 uur om van een leeg model naar een stabiel stromend model te gaan. Zonder dat er een initieel waterpeil is gespecificeerd, is de initialisatietijd voor een simulatie met dit ingestelde debiet dus bijna 8,5 dagen. Vooral in korte simulaties waarbij de afvoer van een enkele regenbui wordt gesimuleerd, is deze initialisatietijd veel groter dan de uiteindelijke gesimuleerde tijd na de regenbui. Dit zorgt er dus voor dat simulaties onnodig lang zijn.

In de eerste simulatie met een laag debiet (blauwe figuur) zijn meetpunten 9 en 10 te zien waar het erg lang duurt voordat er een stabiele waterhoogte wordt waargenomen. Dit is te verklaren doordat deze meetpunten tussen een serie aan duikers en stuwen ligt. Hoe lager het debiet, hoe langer het duurt voordat bij elke stuw en elke duiker de minimale doorstroomhoogte is bereikt. Dit zorgt voor meer pauzes in de doorstroming en zo voor een meer uitgestelde stabiele waterhoogte bij de meetpunten. Zodra het debiet hoger wordt heeft dit minder invloed.

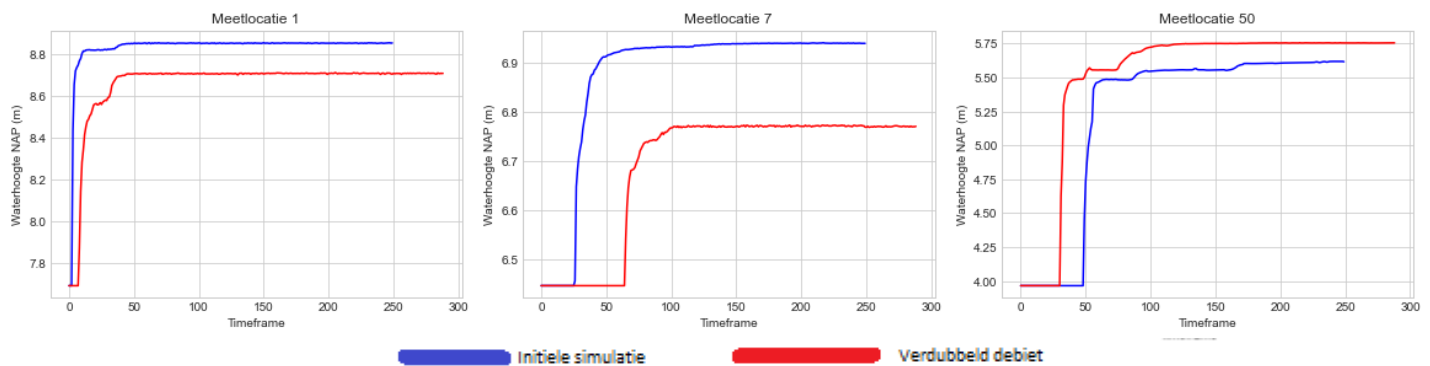


Figuur 9: Oppervlaktewater berekening, Tijdstappen tot stabiele waterstand



In de 2<sup>e</sup> simulatie zijn alle debieten van de inlaten verdubbeld. De verwachting was dat naast een hogere waterstand in het model, er ook sneller een stabiele waterstand zou worden bereikt. Bij een hoger debiet zal water namelijk sneller stromen en zal het systeem gemiddeld sneller gevuld zijn. Dit is te zien in Figuur 9b. Bij een hoger debiet is voor alle benedenstroomse meetpunten (42 – 56), sneller een stabiele waterstand bereikt. Gemiddeld gezien is de initialisatietijd over het volledige model, verkort met meer dan 50 tijdstappen en dus meer dan twee dagen verlaagd.

Het is lastig om deze verkorting precies te kwantificeren. Kunstwerken zoals duikers en stuwen, de locatie van de watergang en de vorm van de watergang hebben bij verschillende debieten verschillende effecten. In een aantal bovenstroomse meetlocaties (1 – 8 en 18-20) is bij een hoger debiet juist een minder snelle stabilisering waargenomen. Dit kan te verklaren zijn doordat bij meetlocatie 1 – 8, bij een hoger debiet, de beek overstroomt. In plaats van dat al het water door de beek stroomt, stroomt er water het maaiveld op en kleine watergangen aan de zijkant in. Dit verlaagt de snelheid van het water waardoor er bij een aantal van deze meetlocaties bij een hoger debiet ook juist een lagere waterstand ontstaat. Dit is duidelijk te zien aan de blauwe (laag debiet) en rode (hoog debiet) lijn bij meetlocatie 1 en 7 in Figuur 10.



*Figuur 10: Oppervlaktewater berekening, Waterstand over tijd voor drie meetpunten in het model.*

Ook in meetpunten 18, 19 en 20 is een minder snelle stabiele stroming te zien bij een hoger debiet. Deze locaties liggen in een meander met een vrij smal profiel. In de bochten van een meander is veel energieverlies in de stroming van het water (Cassan et al., 2020). Water zal zich ophopen in de bocht. Hierdoor zal een gedeelte weer terugstromen, er ontstaat een klotsende golf in de bocht. Hoe groter het debiet, hoe sneller de waterstandtoename is in de bocht. Dit zorgt voor een grotere golf en daarmee voor een langere tijd tot de waterstand stabiel is. Hoe scherper de bocht en hoe smaller de watergang is, hoe groter dit effect is. Hoe breder het profiel van de meander is, hoe minder dit effect zichtbaar is.

In Figuur 10 representeert meetlocatie 50 wat er over het algemeen wordt waargenomen in het model. Allereerst bereikt het water bij een hoger debiet (rode lijn) meetlocatie sneller, in Figuur 10 is te zien dat de rode lijn eerder omhooggaat, de waterstand stijgt dus eerder. Ook is de uiteindelijk bereikte waterstand hoger bij een hoog debiet dan bij een laag debiet.

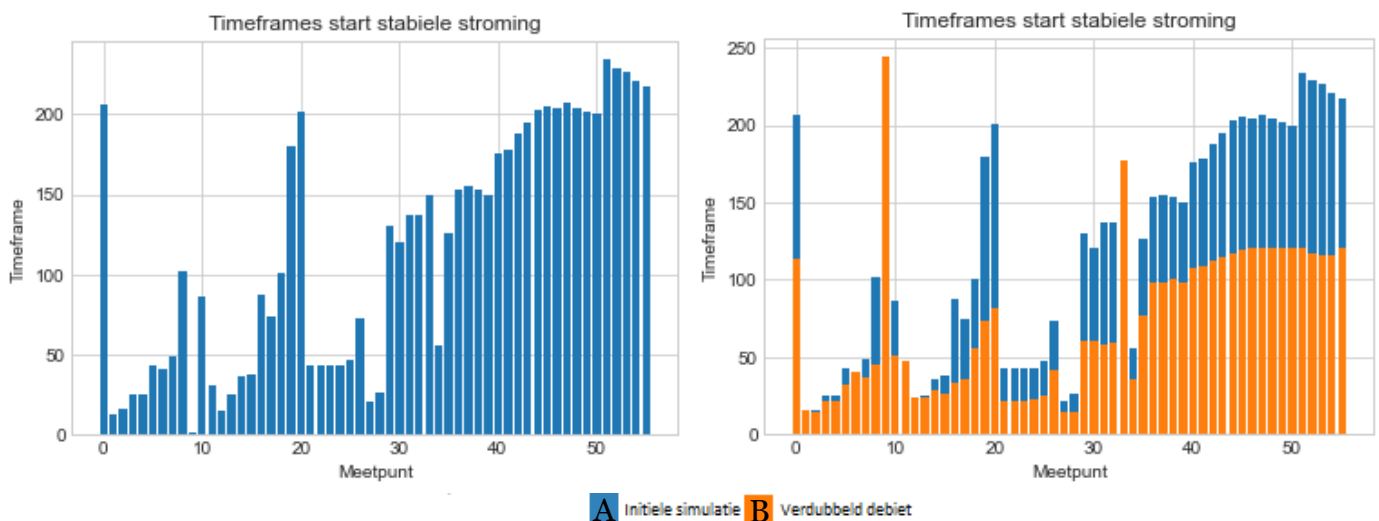
Bij het initiëren van waterhoogtes in het model, moet dus altijd rekening gehouden worden met het feit dat er bij hogere debieten, water op meer plaatsen geborgen wordt dan bij lagere debieten. Dit is vooral bij watergangen met veel zijtakken zoals sloten lang akkers en weilanden. Ook kan een hoger debiet zorgen voor andere effecten waardoor een stabiele waterstand minder snel bereikt wordt. De simulatieperiode van beide simulaties (laag debiet en hoog debiet) is gelijk (12 dagen), dit is ongeveer vier uur rekestijd. Doordat er bij een hoger debiet op een groter oppervlak water stroomt, duurt deze

simulatie ongeveer een half uur langer. Wel zou een simulatie met een hoger debiet volgens de resultaten met ongeveer twee dagen verkort kunnen worden, waardoor de rekentijd ook korter wordt, dit is een afname van 17%. Deze 17% is direct terug te zien in de rekentijd. De rekentijd bij een hoog debiet kan dus van 4,5 uur, verkort worden met een half uur tot 45 minuten. Een laag debiet en een hoog debiet zouden dus ongeveer evenveel rekentijd kosten.

#### 4.1.1.2 Rekenen met Infiltratie

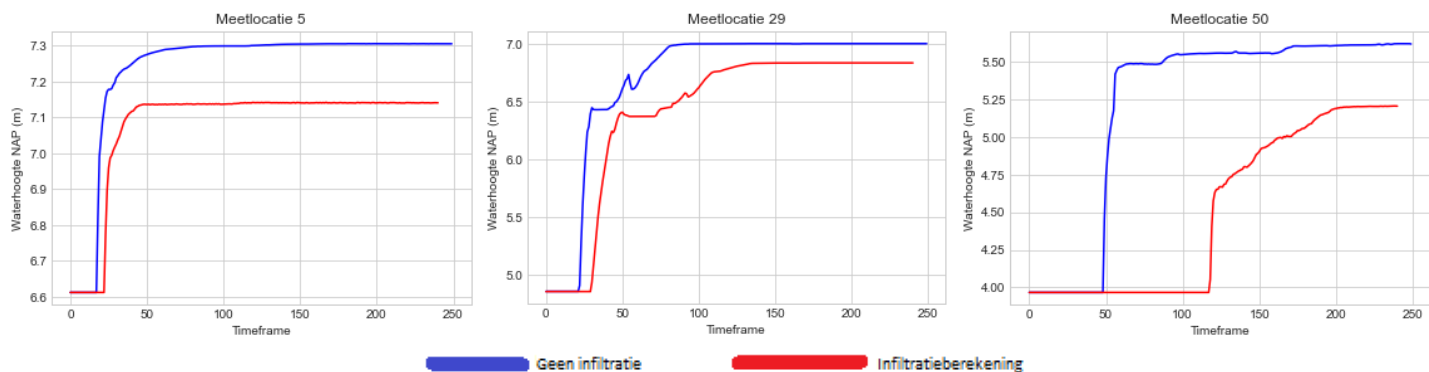
Bij de tweede methode wordt er infiltratie meegerekend in het model. Zoals besproken in de theorie, wordt de snelheid van de infiltratie bepaald door de infiltratiesnelheid van het oppervlak. Dit oppervlak in een watergang is gespecificeerd als “waterloop”. Een waterloop heeft een infiltratiesnelheid van 0 meter per dag. Er kan dus in deze berekening alleen water infiltreren op de oevers en op het maaiveld, buiten het in Tygron gespecificeerde “watergebied”. Dit is een instelling in Tygron die gebaseerd is op de aanname, dat rond een watergang, het grondwaterpeil op hetzelfde niveau ligt als het water in de watergang. Er wordt niet gerekend met horizontale grondwaterstroming, dus dit grondwaterpeil zal niet veranderen over tijd en er zal dus ook geen extra water infiltreren onder een watergang.

Nu er is gerekend met infiltratie is er weer duidelijk in de resultaten te zien dat een hoger debiet zorgt voor een snellere stabiele waterstand in het model. De rekentijd van deze simulaties is echter wel langer dan wanneer er zonder infiltratie gerekend wordt. De simulaties duren ongeveer 5 uur, een uur langer dan bij de simulaties zonder infiltratie. Ook duurt het bij de benedenstroomse meetlocaties (42 – 56) gemiddeld ongeveer 50 tijdstappen langer voordat er een stabiele waterstand wordt bereikt dan wanneer er zonder infiltratie gerekend wordt.



Figuur 11: Rekenen met infiltratie, Tijdstappen tot stabiele waterstand

In de werkelijkheid is er natuurlijk wel sprake van infiltratie in de ondergrond. In de resultaten is ook te zien dat infiltratie een zeer grote invloed heeft op de uiteindelijke waterstand die bereikt wordt. In Figuur 11 is bij meetpunt 5 een verschil te zien van 16 centimeter en bij meetpunt 50 een verschil van 37 centimeter. Hoeveel verschil in waterstand rekenen met infiltratie oplevert verschilt per meetpunt, maar het is duidelijk te zien dat dit aspect van het model niet genegeerd mag worden. Een minimaal verschil van 3 centimeter tot een maximaal verschil van 42 centimeter is waargenomen.



*Figuur 12: Infiltratie berekening, Waterstand over tijd voor drie meetpunten in het model.*

Doordat er bovenstrooms water infiltreert wordt er benedenstrooms later een stroming waargenomen. In meetlocatie 5 is dit al te zien, deze ligt bovenstrooms, maar in meetlocatie 50 is dit nog veel beter te zien. Op meetlocatie 29 is duidelijk een bepaalde golfpiek te zien wanneer er geen infiltratie doorgerekend wordt. Dit komt omdat deze meetlocatie op een kruising van watergangen ligt. De golf van de ene watergang bereikt dit meetpunt dus eerder dan de golf van de andere watergang. Zodra er met infiltratie gerekend wordt, is te zien dat de golf en daarmee de piek in de resultaten minder heftig is. Doordat er bovenstrooms van dit meetpunt water uit de golf infiltreert in de bodem, blijft er een minder heftige golf over.

Het uiteindelijke verschil in waterstand, tussen het rekenen met infiltratie en zonder infiltratie, verschilt heel erg per meetpunt. Dit grote verschil komt door de manier waarop de watergangen zijn ingetekend en de bergingscapaciteit van de watergangen. In een watergang met een kleine berging zal er eerder en meer water aan de oevers stromen. Hier zal er dus water gaan infiltreren en dus zorgen voor een groot verschil tussen het rekenen met infiltratie en zonder infiltratie. In een watergang met een grote berging zal er weinig water over de oevers stromen, wat zorgt voor een klein verschil tussen rekenen met infiltratie en zonder infiltratie.

Het verschil in waterstand is dus vooral toe te schrijven aan de infiltratie aan de oevers van de watergangen. Als er met een laag debiet gerekend wordt, waardoor er een lage waterstand in watergangen ontstaat, zal infiltratie een kleinere rol spelen. Dit omdat het oppervlak waarop geïnfiltreerd kan worden kleiner is. Bij een lage debieten, bijvoorbeeld in een zomer situatie zal rekenen zonder infiltratie kunnen volstaan voor het initieel vullen van het model.

## 4.1.2 Verwerking van resultaten

### 4.1.2.1 Resultaten direct converteren naar vectorbestand

Het resultaat van de eerste methode is een onwerkbaar bestand waardoor en Qgis en Tygron vastlopen. Het modelgebied van de Chaamse Beken heeft namelijk een grootte van vier bij vier kilometer. Dat betekent dat het oppervlak 16.000.000 m<sup>2</sup> is. Met een celgrootte van 0,25 m<sup>2</sup>, bevat het rasterbestand met waterhoogtes voor het volledige modelgebied 64.000.000 cellen. Omdat alleen de watergangen zijn doorgerekend, met een gebied van 30 meter hieromheen, is dit aantal teruggebracht tot 370.000 cellen. Als dit direct wordt geconverteerd naar een vectorbestand, resulteert dit in een vectorbestand met evenveel polygonen. Dit vectorbestand is zo groot (ruim 600 megabyte), dat Qgis en Tygron dit bestand niet kunnen verwerken en daardoor crashen. Het direct omzetten van de resultaten naar een vectorbestand is dus niet mogelijk voor dit modelgebied. Er is een bepaalde generalisatie nodig in de resultaten om dit te kunnen omzetten naar een peilgebieden bestand.

### 4.1.2.2 Resultaten generaliseren op basis van watergebieden

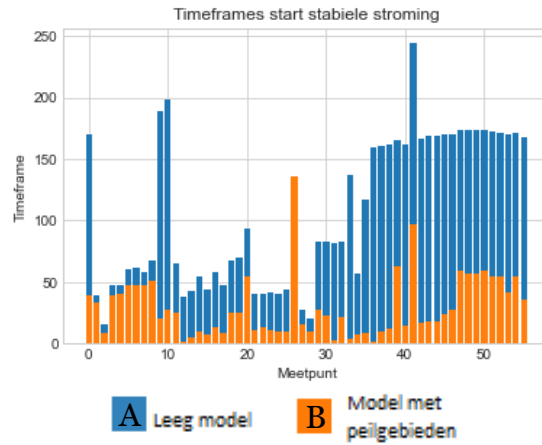
Met de resultaten van de eerste simulatie waarin alleen oppervlaktewater berekend is, is er een peilgebieden bestand gemaakt door resultaten te generaliseren op basis van het gemiddelde waterpeil in een watergebied. Met dit peilgebiedenbestand kan een Tygron model worden geïntialiseerd. Het resultaat is een vectorbestand met voor elke watergang een gespecificeerd initieel waterpeil. Een indicatie van hoe dit eruit ziet is gevisualiseerd in Figuur 13. Hierin zijn dus alleen de watergangen te zien in het gebied.



*Figuur 13: Uitsnede uit peilgebiedenbestand gebaseerd op watergebieden*

Er is nu alleen nog maar een korte periode nodig om het water in het model aan het stromen te krijgen. De stroming van water in een Tygron model wordt namelijk niet alleen bepaald door het verschil in waterhoogte tussen cellen, maar ook door de flux (de snelheid van het water) in een bepaalde richting (Kurganov & Guergana, 2007). In een peilgebiedenbestand is deze flux nog niet aanwezig. De periode om water te laten stromen is over het hele model ongeveer 120 tijdstappen kleiner dan wanneer het model ook eerst gevuld moet worden, dit is te zien in Figuur 14.



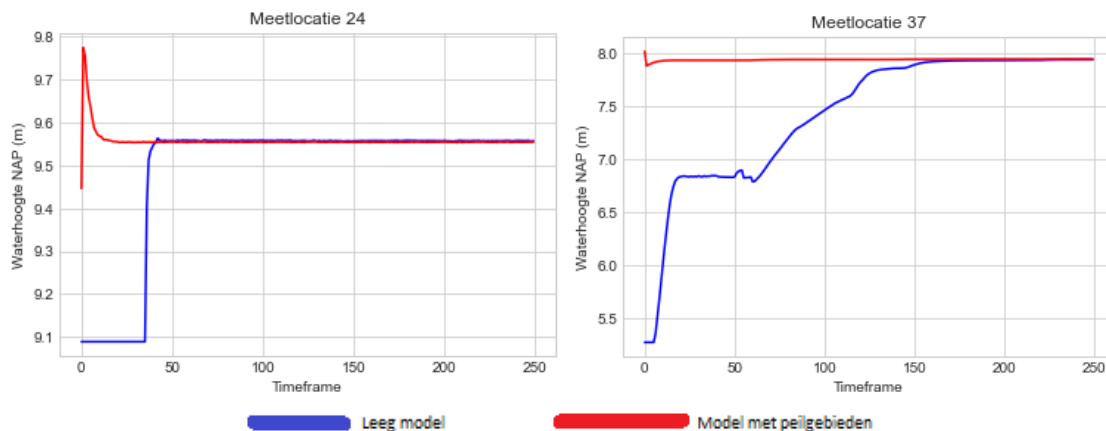


Figuur 14: Peilgebieden op watergebied, Tijdstappen tot stabiele waterstand

Door één keer een peilgebieden bestand te maken, kan elke verdere modelrun dus met vijf dagen verkort worden wat ongeveer twee uur aan rekentijd scheelt. Ook kan een peilgebieden bestand vaker worden gebruikt.

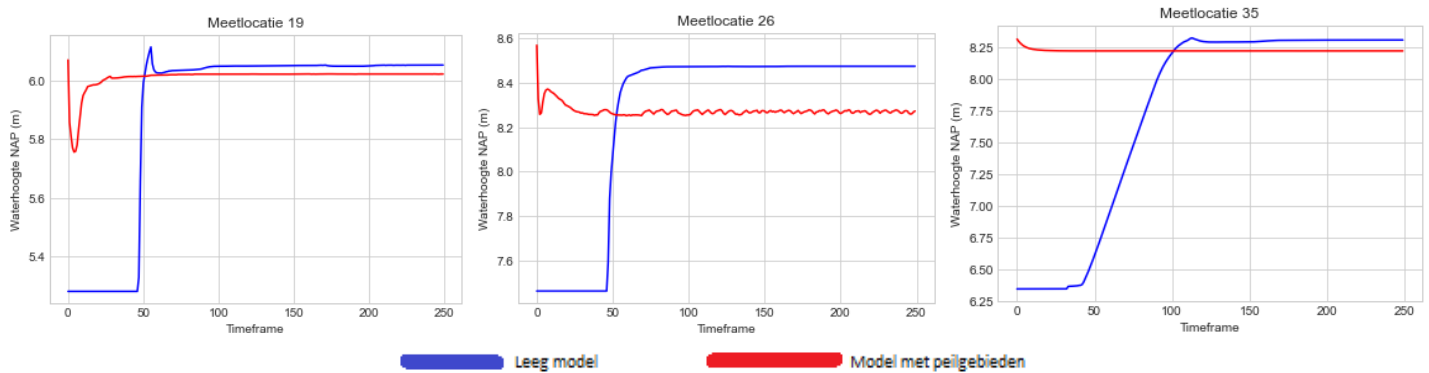
Het is te verwachten dat de fout in het initiële waterniveau een grotere rol speelt bij de meetpunten die verder stroomopwaarts liggen. Initiële waterstanden zorgen voor stilstaand water. Dit water gaat stromen op  $t=0$  door het verval in het model en door de bovenstroomse debieten. Meetpunten verder stroomafwaarts hebben langer de tijd om te stabiliseren door het verval in het model, voordat de flux die veroorzaakt wordt door de bovenstroomse debieten deze meetlocaties bereikt. Hierdoor heeft het initialiseren van het waterniveau benedenstrooms meer effect dan bovenstrooms.

In de resultaten is bij 50 van de 56 meetpunten geen significant verschil te zien in waterhoogte, tussen een simulatie zonder peilgebiedenbestand en een simulatie met peilgebiedenbestand. Figuur 15 laat zien dat, behalve de initiële fout in het peilgebieden bestand (meetpunt 24 een te lage waterstand, meetpunt 37 een te hoge waterstand) de uiteindelijke waterhoogtes gelijk zijn.



Figuur 15: Peilgebieden op watergebied, Waterstand over tijd voor drie meetpunten in het model

Dit is echter niet over het geval. Er zijn zes meetpunten waar een initieel waterniveau zorgt voor een lager uiteindelijk resultaat. Dit is te zien in Figuur 16. Waar meetpunt 19 op een waterniveau van 3 centimeter lager uitkomt, is dit in meetlocatie 26 zelfs 19 centimeter.

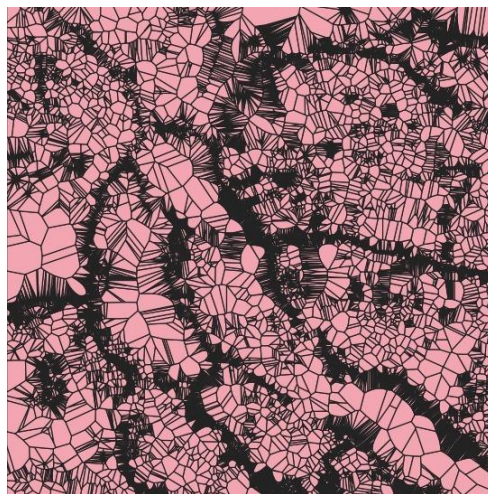


Figuur 16: Peilgebieden op watergebied, Waterstand over tijd voor drie meetpunten in het model (2)

Er zijn in het modelgebied geen overeenkomsten tussen deze meetpunten gevonden die zouden kunnen verklaren waarom dit gebeurt in het model. De meetpunten liggen verspreid over het modelgebied en liggen in watergangen met verschillende karakteristieken. Er is ook geen overeenkomst in de afstand van de meetpunten tot kunstwerken. De fout in het initiële waterpeil in het peilgebiedenbestand is voor alle meetpunten anders maar niet verschillend van de fout in meetpunten die wel op goede resultaten uitkomen. Het hoger instellen van het initiële waterpeil in het peilgebieden bestand geeft bij dezelfde meetpunten ene verschil in resultaten. De resultaten zijn dus onafhankelijk van het gekozen initiële waterpeil.

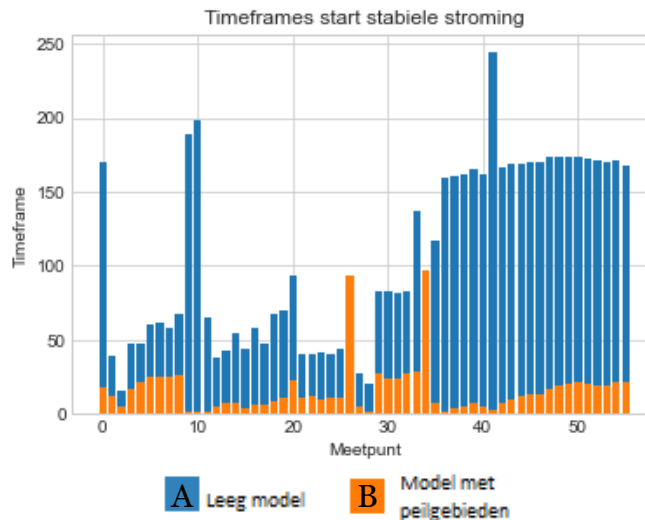
#### 4.1.2.3 Resultaten generaliseren op basis van waterstanden

In Figuur 17 hebben alle vlakken hebben één specifiek waterpeil. De watergangen zijn nog steeds te herkennen, hier zijn de vlakken veel smaller, zo wordt het verhang in een watergang benaderd.



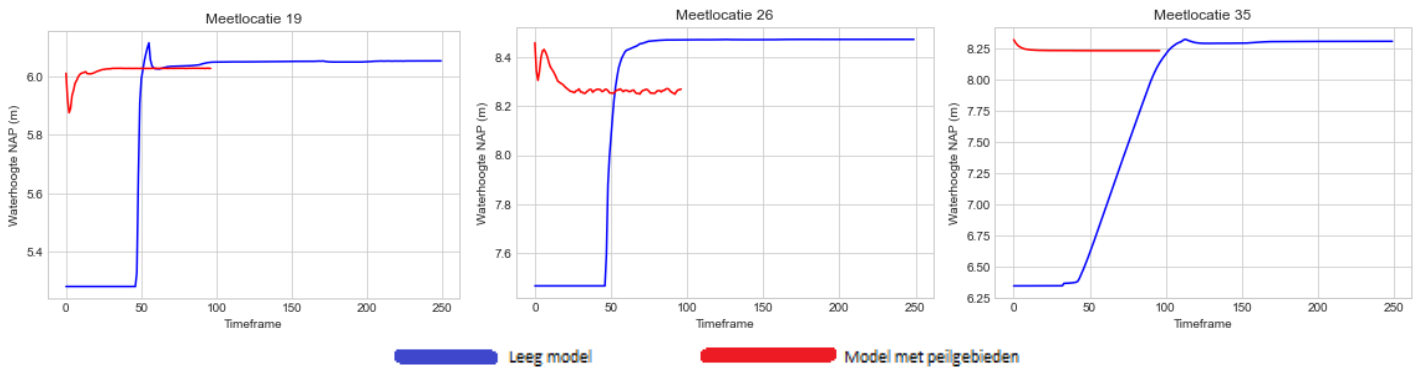
Figuur 17: Peilgebiedenbestand op basis van waterstanden (Voronoi polygonen)

In Figuur 18 is goed te zien dat deze peilgebieden voor de snelste initialisatie zorgen. De periode waarin het water gaat stromen kost nu maar 30 tijdstappen, wat 170 tijdstappen minder is dan de initialisatieperiode van een leeg model. Door één keer een peilgebieden bestand te maken, kan elke verdere modelrun dus met 7 dagen verkort worden wat ongeveer 2 uur en 45 minuten tot 3 uur aan rekentijd scheelt.



Figuur 18: Peilgebieden op waterstand, Tijdstappen tot stabiele waterstand

De fout in de resultaten echter nu ook te zien, bij dezelfde meetlocaties als bij het generaliseren op basis van watergebieden.



Figuur 19: Peilgebieden op waterstand, Waterstand over tijd voor drie meetpunten in het model, hoge initiële waterstand

De fout is ook nog steeds van dezelfde grootte. Dit is vooral duidelijk te zien in Figuur 19 bij meetlocatie 26. Hier is het initiële waterniveau door de Voronoi polygonen beter gespecificeerd dan door de watergebieden en toch is er geen verschil in de grootte van de fout.

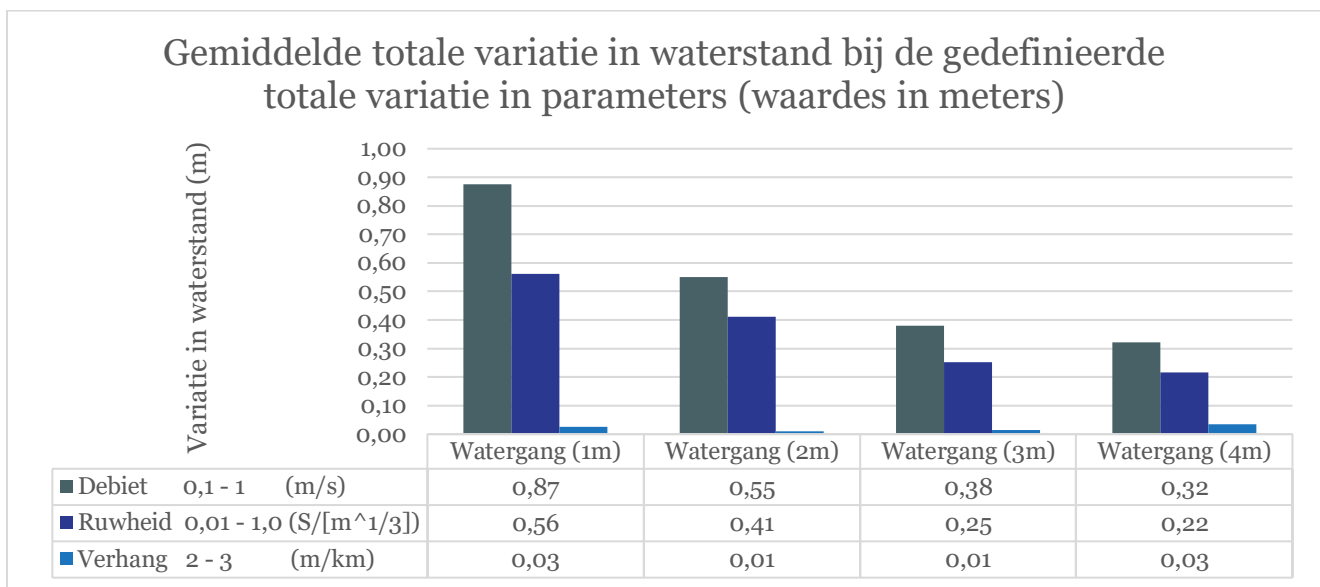
Resultaten generaliseren op basis van waterstanden en vervolgens een peilgebieden bestand maken door middel van Voronoi polygonen, zorgt voor de beste resultaten als het gaat om initialisatietijd. Als er Voronoi polygonen worden gebruikt, kan het verhang in een watergang worden benaderd en kan ook de grondwaterstand worden geïnitieerd. Echter, er bestaat een verschil in resultaten tussen een simulatie met een leeg model en een simulatie met een model waar een initieel waterpeil in het model is gespecificeerd. Dit verschil is niet binnen dit onderzoek te verklaren.

## 4.2 Gevoeligheidsanalyse

In Tygron is er voor stroming in een watergang één parameter die in zekere mate onzeker is en hierdoor aan te passen is om een stroming te kalibreren. Dit is de ruwheid van de bodem. In hydrologische modellen wordt in het algemeen de ruwheid gebruikt als kalibratie parameter (Paalberg et al., 2005). In Tygron wordt dit gerepresenteerd als de Manning coëfficiënt. Hierdoor is het voor een kalibratie belangrijk om te weten wat voor invloed het aanpassen van deze parameter heeft op de modelresultaten. Ook is het belangrijk om te weten hoe deze invloed in verhouding staat met de waarden en invloeden van andere, al dan niet gegeven, parameters in het model.

### 4.2.1 Vergelijking in gevoeligheid van de parameters

In Figuur 20 is de totale variatie in waterstand, in het gekozen bereik van de parameters weergegeven voor vier verschillende watergangen.



Figuur 20: Gemiddelde effect op de waterstand in vier verschillende watergangen

Het debiet is de parameter die de grootste invloed heeft op de waterstand in een watergang. De invloed van de ruwheid valt tussen de 65% en 75% van de invloed van het debiet. Dit betekent dat in het model van de Chaamse Beken, de ruwheid een erg grote invloed heeft op de waterstand in het model. Dit betekent ook dat er in het modelleren, de standaard instelling in Tygron van 0,02 S/m<sup>(1/3)</sup> niet toereikend is. De ruwheid van de bodem van een watergang varieert erg tijdens een jaar, door verandering in begroeiing (Janssen, 2021). De ruwheid heeft een dusdanig grote invloed op de waterstand ten opzichte van het debiet, dat het aanpassen van deze parameter uiterst belangrijk is in het kalibreren van een model in Tygron.

In de resultaten is te zien dat de waterstand door middel van het aanpassen van de ruwheid erg goed is te beïnvloeden. Bij een variatie van 0,01 S/m<sup>(1/3)</sup> tot 0,04 S/m<sup>(1/3)</sup> in ruwheid, is in een watergang van 3 meter breed, de waterstand gemiddeld met 25 centimeter te variëren. Dit geeft echter ook een beperking aan. In Tygron is een standaard ruwheid voor een watergang bepaald van 0,02 S/m<sup>(1/3)</sup>. Als Tygron de

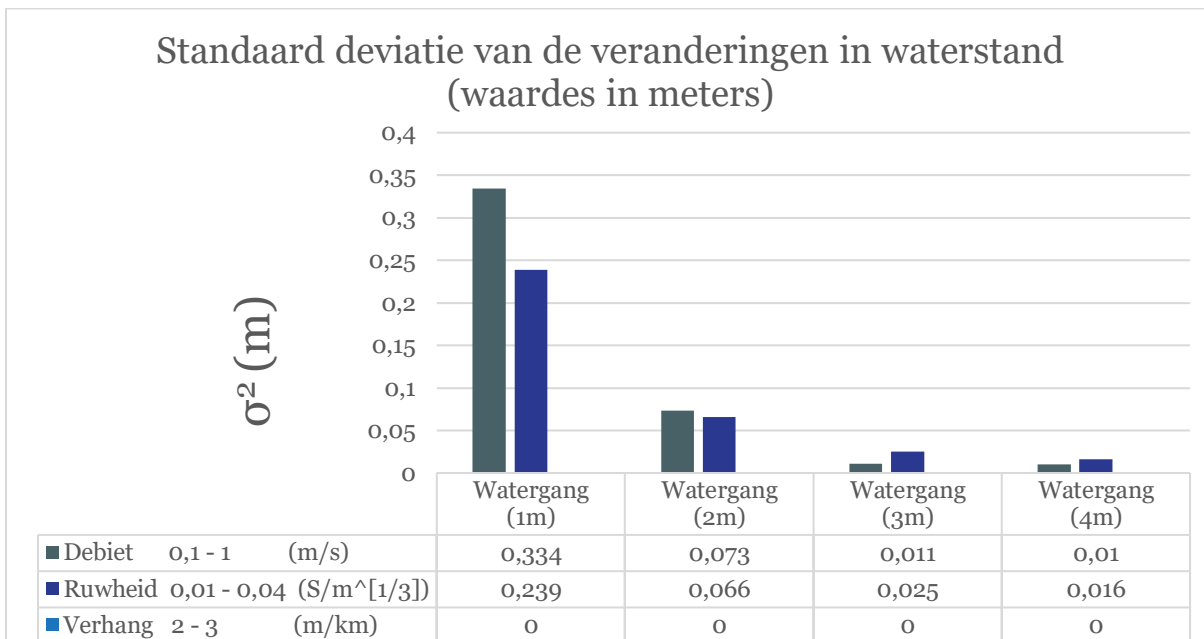


waterstand met deze standaard instelling overschat, is er weinig ruimte om deze waterstand te verlagen door de ruwheid te verlagen. Het gemiddelde maximum waarmee de waterstand verlaagd kan worden in een watergang van drie meter breed, door het verlagen van de ruwheid met  $0,01 \text{ S/m}^{(1/3)}$ , is  $25/4 = 6,25$  centimeter.

Ook is het logische resultaat te zien dat, hoe smaller de watergang is, hoe groter de invloed van het debiet en de ruwheid is op de waterstand. Binnen de variatie  $0,01 \text{ S/m}^{(1/3)}$  tot  $0,04 \text{ S/m}^{(1/3)}$  is een waterstand in een smalle watergang van één meter breed, gemiddeld te variëren met  $0,56$  meter en in een watergang van drie meter breed gemiddeld te variëren met  $0,25$  meter. Een smallere watergang kan bij dezelfde waterstand minder water bergen dan een bredere watergang. Een toename in ruwheid zorgt voor een afname in stroomsnelheid en hiermee voor een toename in het bergende oppervlak van de watergang. Deze toename in bergend oppervlak, zorgt in een bredere watergang voor een minder grote stijging in het waterpeil.

Een andere variabele in het model wat verwacht is invloed te hebben op de waterstand in een watergang, is het verhang van de watergang. In de resultaten in Figuur 20 is te zien dat de variatie in verhang ten opzichte van het debiet en de ruwheid een verwaarloosbare invloed heeft op de waterstand. Dit is positief. Het verschil in effect van de ruwheid zal verwaarloosbaar zijn bij verschillende verhangen. Dit geeft de mogelijkheid om grotere delen van het model, waarin het verhang kan variëren, tegelijkertijd te kalibreren aan de hand van de ruwheid. Een model zoals dat van de Chaamse Beken, waarin een groot verval zichtbaar is, zal dus niet door dit verval aanzienlijk minder goed te kalibreren zijn. Er hoeft tijdens het kalibreren op basis van de ruwheid weinig rekening gehouden te worden met het verhang in de watergang.

Figuur 21 laat de standaarddeviatie zien voor alle gemeten effecten van de parameters. Bij een parameter met een hoge standaarddeviatie verschillen de effecten die gemeten zijn erg van elkaar in grootte. Dat geeft aan dat de grootte van een effect erg wordt beïnvloed door de gekozen waarde van de andere parameters. Bijvoorbeeld, is het effect van de ruwheid hoger bij een lager debiet.

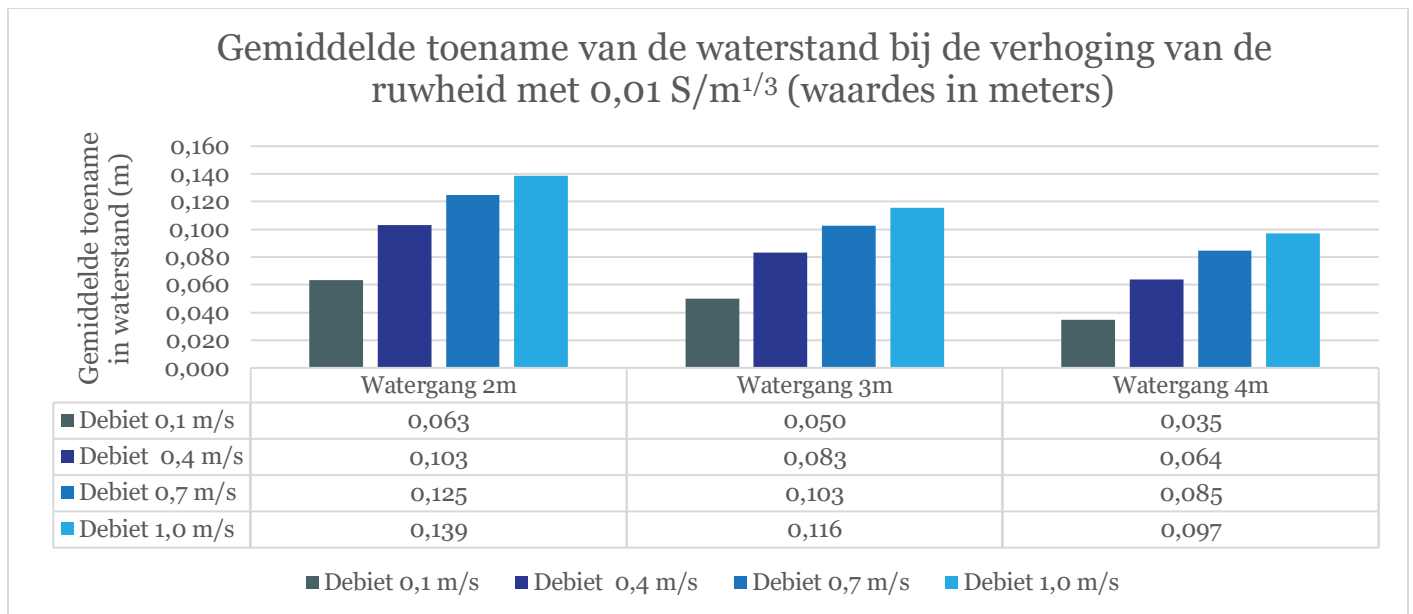


Figuur 21: Standaarddeviatie van de variatie in waterstand voor elke variabele.

In Figuur 21 is goed te zien dat de variatie in effect is heel groot is in de smalle watergang. Hoe breder de watergang, hoe kleiner deze variatie wordt. Is een watergang breder dan 2 meter, is dit effect bijna verdwenen. Dit geeft aan dat bredere watergangen makkelijker te kalibreren zijn door de ruwheid aan te passen dan smallere watergangen. Wel is duidelijk te zien dat bij een bredere watergang de variatie in effect van de ruwheid groter wordt dan de variatie in effect van het debiet. Dit terwijl het algemene effect van de ruwheid lager is dan het effect van het debiet. Dit geeft aan dat het effect van de ruwheid erg afhankelijk is van de hoogte van het debiet.

## 4.2.2 Debietsafhankelijke invloed van de ruwheid

De resultaten in Figuur 21 geven een hint, dat de invloed van de ruwheid verschilt bij verschillende debieten. In Figuur 22 is de invloed van het veranderen van de ruwheid met 0,01 afgezet tegen het debiet. In deze figuur is duidelijk te zien dat eenzelfde verandering in ruwheid, zorgt voor een grotere verandering in waterstand naarmate het debiet in een watergang hoger is. Een verhoging van de ruwheid met 0,01, zorgt in een watergang van drie meter breed voor een verhoging van de waterstand met 5 centimeter, bij een debiet van 0,1 m<sup>3</sup>/s. Bij een debiet van 1 m<sup>3</sup>/s is dit afgerond 12 centimeter. Dit is een vreemd resultaat omdat meerdere onderzoeken aantonen dat de ruwheid minder invloed krijgt naarmate het debiet en dus het waterniveau hoger wordt (Janssen, 2021; Paalberg et al., 2005; Xiaochen, 2017).



*Figuur 22: Gemiddelde toename van de waterstand bij verhoging ruwheid met 0,01*

De ruwheid in Tygron wijkt af van waardes die worden gevonden in recente onderzoeken. Janssen (2021) plaatst de Manning waarde voor de ruwheid in kleine beken met begroeiing, bijvoorbeeld tussen een waarde van 0,1 en 0,4 s/m<sup>(1/3)</sup>. Dit betekent dat de ruwheid in een watergang in Tygron, niet gebaseerd kan worden op gemeten of gesimuleerde waardes in een watergang, uit andere onderzoeken. Dit betekent ook dat de Tygron software bij hogere waterstanden een onderschatting zal maken van de stroomsnelheid en daarmee een overschatting van de waterstand. Dit zorgt ervoor dat met name neerslaggolven lastig te kalibreren zijn aan de hand van de ruwheid. Er is op dit moment te weinig kennis over de computercode en berekeningen in Tygron op dit effect te kunnen verklaren. Het onderzoeken van de precieze invloed van dit effect valt buiten de scope van dit onderzoek.

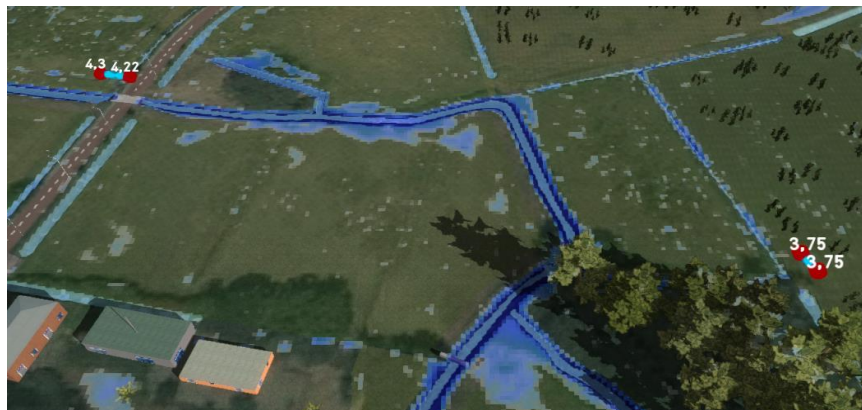
## 4.3 Validatie

SOBEK is een gerenommeerd pakket dat veel gebruikt wordt voor neerslag-afvoer simulaties. Het Waterschap Brabantse Delta gebruikt dit pakket dan ook om analyses te doen in de afvoer van de Chaamse Beken. Tygron is een pakket dat in eerste instantie niet voor deze toepassing is gebouwd, maar het heeft misschien wel potentie voor deze toepassing. Bij een eerste indruk van hoe beide modellen opgebouwd zijn, ontstaat het gevoel dat resultaten uit een Tygron model realistischer zijn. Dit omdat er veel minder generalisatie in het model is. Watergangen hebben hun natuurlijke loop, kunstwerken worden direct uit de data ingeladen en gecorrigeerd in het hoogtemodel geplaatst en stroming over maaiveld kan realistisch worden gesimuleerd. Echter dit kan ook zorgen voor een schijnbetrouwbaarheid.

### 4.3.1 Vergelijking SOBEK vs Tygron

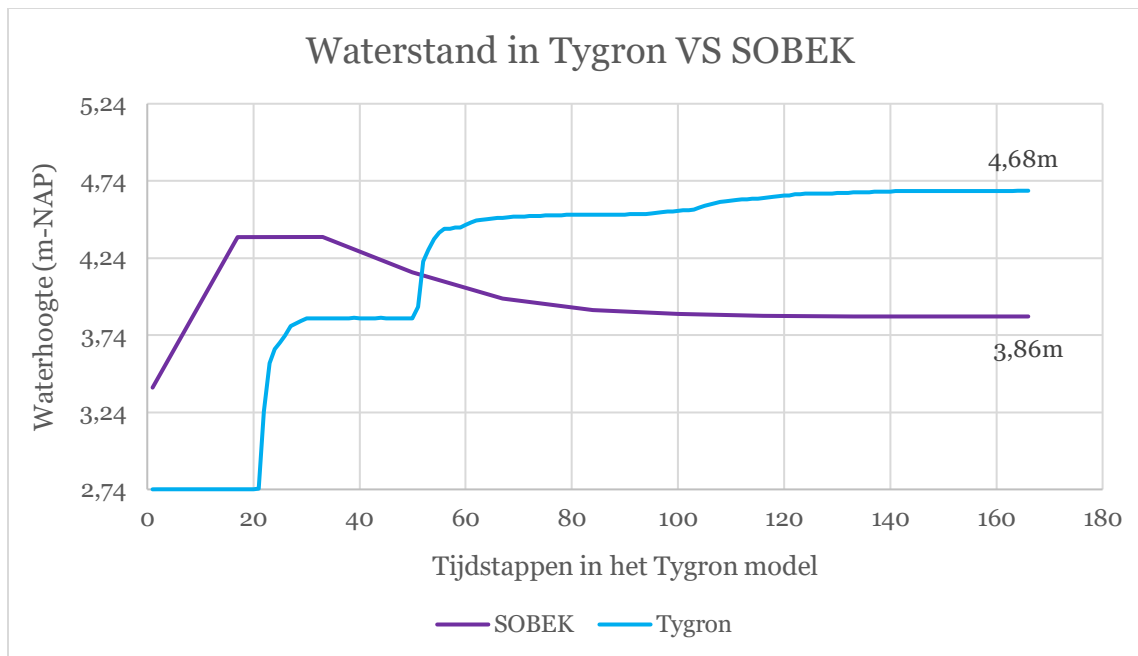
In de eerste simulatie is de waterhoogte op verschillende plekken in het model vergeleken. Wat allereerst al opvalt is dat er in het Tygron model regenwater wordt geborgen op het maaiveld. Naast dat er afstroming naar de watergangen is, is er ook water dat zich verzamelt op andere plekken op het maaiveld. Dit is al een wezenlijk verschil. In het SOBEK-model dat gebruikt is, is dit niet mogelijk. In dit SOBEK-model is de instroom van een watergang alleen gebaseerd op een bepaald afstroomoppervlak. Al het water dat valt op dit oppervlak, stroomt via één punt de watergang in.

Daarnaast is (bijvoorbeeld in Figuur 23) te zien dat het waterpeil in bepaalde watergangen in het Tygron model de oevers overschrijdt. Het is bekend dat er in het gebied vaak last is van overstromingen van de watergangen (Eigenhuijsen & Luijendijk, 2008). In die zin is het ook niet vreemd om dit vervolgens terug te zien in het Tygron model.



*Figuur 23: Screenshot benedenstroomse locatie Tygron*

Echter als gekeken wordt naar de waterstanden die het SOBEK-model berekent, zou dit niet het geval moeten zijn. De waterstanden die Tygron berekent zijn hoger dan de waterstanden die SOBEK berekent. Het verschilt erg per locatie binnen het modelgebied hoe groot dit verschil is, maar het verschil ligt ongeveer tussen de 20 en 90 centimeter. Hierin is de waterstand in Tygron altijd hoger. Een voorbeeld van een extreme locatie in het modelgebied is gegeven in Figuur 24. Dit is dezelfde locatie als in Figuur 23.



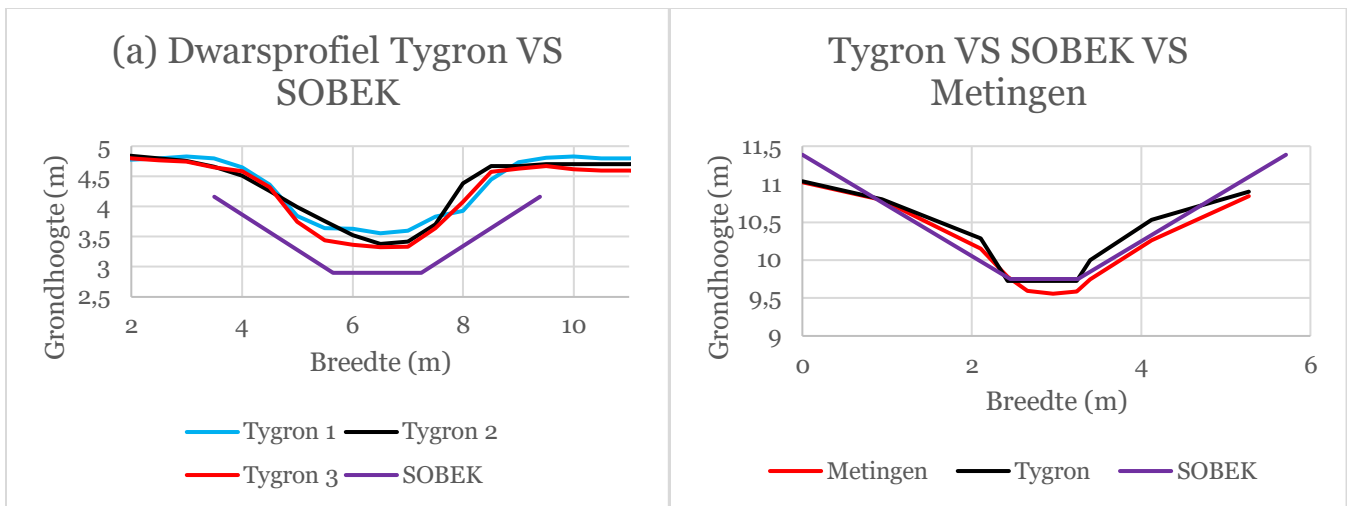
Figuur 24: Vergelijking in waterstand van een benedenstroomse locatie.

In Tygron is er gerekend met een ruwheid van 0,02. Dit betekent dat de waterstand volgens de resultaten uit de gevoeligheidsanalyse, afhankelijk van de afvoer, gemiddeld met 5 centimeter verlaagd zou kunnen worden door de ruwheid te verlagen (de watergang is ongeveer 4 meter breed). Bij een hogere afvoer heeft de ruwheid meer invloed en zou de waterstand meer dan gemiddeld verlaagd kunnen worden. Uiteindelijk is door de ruwheid met 0,01 te verlagen, het waterpeil met 12 centimeter verlaagd, lang niet genoeg om dicht bij de resultaten uit het SOBEK-model te komen.

De reden dat Tygron de waterstanden zo overschat is niet direct aan te tonen. Er zijn verschillende mogelijkheden die waarschijnlijk allemaal hun eigen invloed hebben. Zoals beschreven in de gevoeligheidsanalyse, zal Tygron waterstanden overschatten naarmate het waterpeil stijgt. Dit kan een behoorlijke invloed hebben in het model, aangezien de overstroming van watergangen aantoont dat het waterpeil hoog is. Dit is echter niet te kwantificeren, omdat er geen gemeten waterstanden beschikbaar zijn. Als tweede mogelijke reden van het verschil tussen het SOBEK-model en het Tygron model, is de intekening van watergangen geïdentificeerd.

Het SOBEK-model benadert het dwarsprofiel door middel van trapeziums, terwijl Tygron watergangen intekent aan de hand van de hoogte van de oever, de “angle of repose” en de gespecificeerde waterdiepte. Uit de vergelijking is gebleken dat er op sommige locaties in het model een groot verschil zit tussen de watergangen in Tygron en de watergangen in SOBEK. Er is vaak een verschil in bodemhoogte of in oeverhoogte. In Figuur 25a zijn de dwarsprofielen van de benedenstroomse locatie uit Figuur 23 weergegeven. Het is duidelijk te zien dat de bodemhoogte in SOBEK lager is dan in Tygron. Echter als de relatieve waterhoogtes vergeleken worden (SOBEK:  $3,86 - 2,9 = 0,96\text{m}$ , Tygron:  $4,68 - 3,33 = 1,35\text{m}$ ), is het verschil (39cm) nog steeds groter dan de 12 centimeter die het verlagen van de ruwheid oplevert. Als de watergang in SOBEK op dezelfde hoogte ingetekend zou zijn als in Tygron en de ruwheid in Tygron wordt verlaagd, zou Tygron nog steeds een overschatting maken in de waterstand van 27 centimeter.



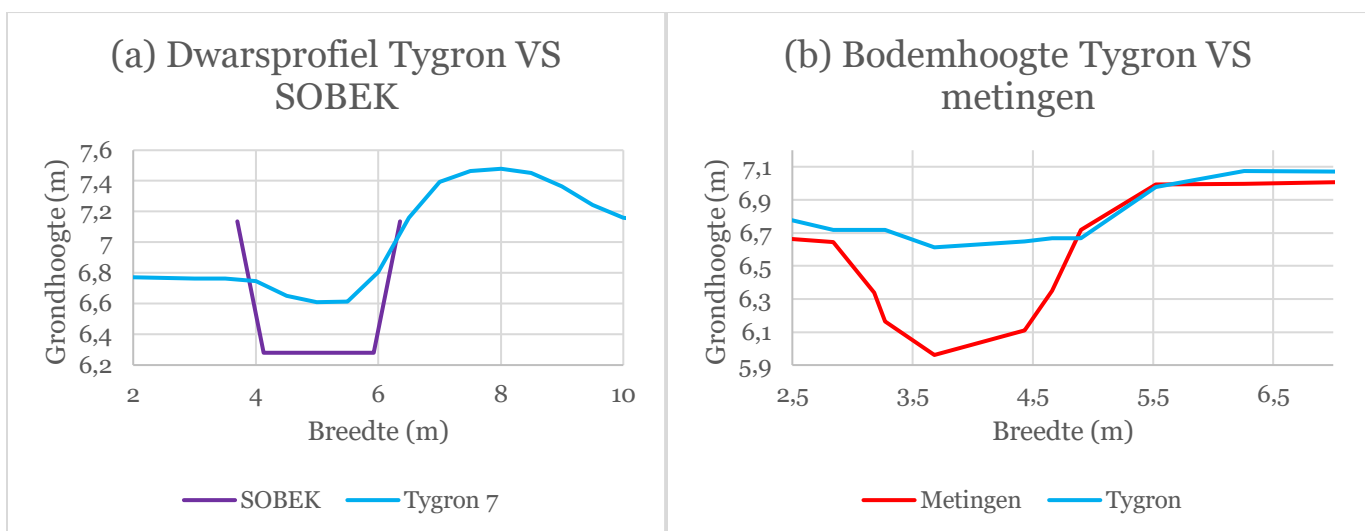


Figuur 25: Dwarsprofiel vergelijking van twee watergangen in SOBEK en Tygron

Op de benedenstroomse locaties uit Figuur 23,24 en 25a zijn geen bodem metingen beschikbaar om de watergang te valideren. Wel blijkt uit de vergelijking met het AHN, dat de oevers in het Tygron model op de goede hoogte liggen en de oevers in het SOBEK-model te laag zijn ingetekend.

Als watergangen in Tygron en SOBEK vergeleken worden met recente bodemmetingen valt op dat de watergangen in Tygron het echte profiel van de watergangen, qua vorm beter benaderen dan het SOBEK-model dat doet. Vooral de oevers en dus de overgang van de watergang naar het maaiveld zijn goed ingetekend. Dit is ook te verwachten omdat het AHN, metingen bevat op de oevers. Hierdoor tekent Tygron de watergangen realistischer in dan SOBEK zou doen. Dit is bijvoorbeeld te zien in Figuur 25b. Hier volgt Tygron de oever zoals in de realiteit het geval is, terwijl het SOBEK-model de oevers hoger doortrekt. Hierdoor is er dus ook meer berging mogelijk in het SOBEK-model, waardoor watertanden in het SOBEK-model lager uitvallen dan in het Tygron model.

Op sommige plekken in het model is er echter ook een heel groot verschil te zien in het profiel zelf. Hierin is het vaak ook zo dat het profiel in SOBEK een grotere berging toelaat dan het profiel in Tygron, wat ervoor zorgt dat de waterstand in Tygron hoger is. Een voorbeeld hiervan is te zien in Figuur 26a.

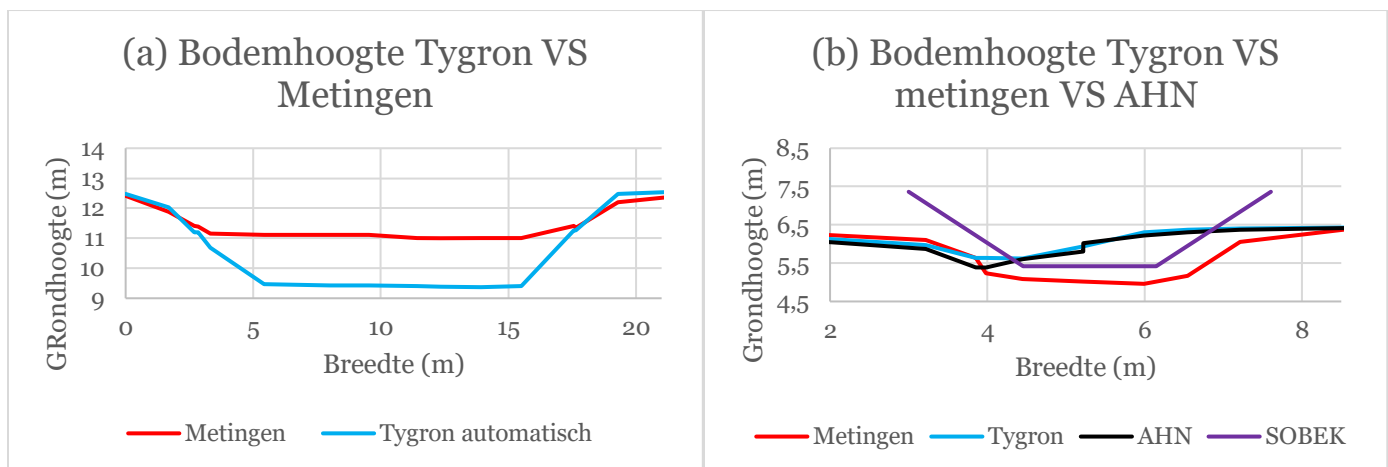


Figuur 26: Dwarsprofiel vergelijking van twee watergangen in Tygron, SOBEK en bodemmetingen

Op de locatie in Figuur 26a is het verschil in dwarsprofiel zo groot dat het duidelijk is dat de watergang in ieder geval in één model foutief is ingetekend. Omdat deze watergang onderdeel is van het hoofdnetwerk en de watergang erg klein is lijkt de watergang in Tygron foutief, hier is een te kleine watergang ingetekend. Verderop in de watergang van Figuur 26a zijn bodemmetingen beschikbaar om de watergang in Tygron te valideren. Het resultaat hiervan is te zien in Figuur 26b. Het is duidelijk te zien dat Tygron de watergang veel te klein heeft ingetekend, de ingetekende bodemhoogte is 70 centimeter boven de gemeten bodemhoogte.

Dit komt door de “angle of repose”. Doordat een schuine helling in een watergang wordt getekend vanaf de oever, tot hij de opgegeven waterdiepte bereikt of totdat hij de andere oever kruist, zullen smalle diepe watergangen bij de standaard instellingen altijd worden onderschat. In dit soort watergangen bereiken de schuine hellingen elkaar namelijk eerder dan dat de bodemdiepte is bereikt. In Tygron is de angle of repose altijd belangrijker dan de opgegeven bodemhoogte. Een extra factor waardoor Tygron smalle watergangen ernstig onderschat, is een verschil in hoogte van de oevers of een flauwe helling (een lage angle of repose). Hoe flauwer de helling van de oever is hoe breder een watergang moet zijn om niet onderschat te worden. De grootte van de onderschatting of overschatting is afhankelijk van de werkelijke bodemhoogte van een watergang en is daarom niet te kwantificeren.

Andersom zullen watergangen die breder zijn, met de standaard instellingen overschat worden. Standaard is de diepte van een watergang namelijk twee meter. In dit soort watergangen wordt deze diepte eerder bereikt dan dat de schuine hellingen van de oevers elkaar snijden. Dit is te zien in Figuur 27a. Hierdoor is er in het Tygron model veel meer berging in brede watergangen en vennen mogelijk dan er in werkelijkheid is. Tijdens de testen gedaan in dit onderzoek, heeft dit bij vennen weinig invloed op de gemeten waterstand. Dit, omdat de simulatie gerund wordt tot er een stabiele stroming bereikt is. Een ven zal zich vullen tot de maximale capaciteit voordat water doorstroomt. Dit heeft dus alleen invloed op de tijd waarin een stabiele stroming bereikt wordt en niet op de uiteindelijke waterstand benedenstrooms.



Figuur 27: Dwarsprofiel vergelijking van twee watergangen in Tygron, SOBEK en bodemmetingen

Het is goed te zien dat Tygron het intekenen van een watergang baseert op het AHN. Waar het AHN niet accuraat is, daar is Tygron ook niet accuraat. Dit gebeurt vooral onder bomen. Waar watergangen onder bomen doorlopen in het modelgebied, is te zien dat de locatie van de watergang in Tygron afwijkt van de locatie in werkelijkheid. In Figuur 27b is te zien dat Tygron de gegevens van het AHN volgt maar hierdoor de watergang niet op de goede locatie intekent. Deze fout komt dus door het volgen van het

AHN of doordat de watervlakken in de BGT niet kloppen. In Figuur 27b is ook te zien dat het SOBEK-model de vorm van de watergang en dus de bergingscapaciteit beter intekent. Deze bergingscapaciteit is weer hoger in het SOBEK-model dan in het Tygron model, wat weer bijdraagt aan de hogere waterstanden in Tygron.

Als er alleen gekeken wordt naar het profiel van de watergangen en de manier hoe het netwerk in het model is ingetekend, lijkt het erop dat de locatie van watergangen in Tygron, over het algemeen, dichter bij de realiteit komen. Dit is niet het geval op locaties waar het AHN of de BGT, tekortschiet zoals in Figuur 27b. Dit is een verschil tussen de manieren van modelleren. Het SOBEK-model is een 1D model, terwijl Tygron een 2D model is. In SOBEK zijn watergangen rechte segmenten die punten verbinden en wordt stroming alleen berekend in de richting van deze segmenten. In Tygron hebben de watergangen hun natuurlijke loop en wordt stroming in de richting van alle aangrenzende cellen berekend. Dit zou in principe moeten zorgen voor een realistischere stroming in Tygron in bijvoorbeeld meanders en wanneer watergangen overstromen. Daarnaast hebben watergangen SOBEK twee punten overal hetzelfde profiel. In Tygron kan dit profiel met de lengte van de watergang verschillen. Dit is ook te zien in Figuur 25a, waar Tygron 1, 2 en 3, drie verschillende dwarsdoorsnedes zijn in dezelfde watergang. In Figuur 28 is een vergelijking te zien tussen de loop van een watergang in Tygron en in SOBEK.



*Figuur 28: De loop van een watergang in Tygron VS SOBEK*

### 4.3.2 Handmatig intekenen van watergangen in Tygron

In Tygron is er een mogelijkheid om zelf de watergangen in te tekenen. Dit gebeurt door de watervlakken aan te passen. Dit, wel aan de hand van een bodemhoogte en een “angle of repose”. In Figuur 29a is te zien dat een belangrijk onderdeel van het watersysteem helemaal niet door Tygron is ingetekend. Dit bleek een fout te zijn in de BGT en is ondertussen aangepast in de basisregistratie. Omdat het netwerk niet handmatig wordt ingetekend, is het lastig om dit soort fouten op te merken.

Het intekenen van deze watergang is uiteindelijk handmatig gedaan op basis van de legger van het waterschap. Hierbij is een watervlak van één meter breed ingeladen. Hierdoor is de loop van de watergang accuraat te benaderen. De intekening wordt alsnog door Tygron gedaan, op basis van het ingeladen watervlak en de “angle of repose” van de ondergrond. Het resultaat is te zien in Figuur 29b. Het Tygron model bevat nu een watergang op de juiste plek. Echter is het dwarsprofiel niet te controleren omdat dit volledig afhankelijk is van de “angle of repose” van de ondergrond ter plekke.

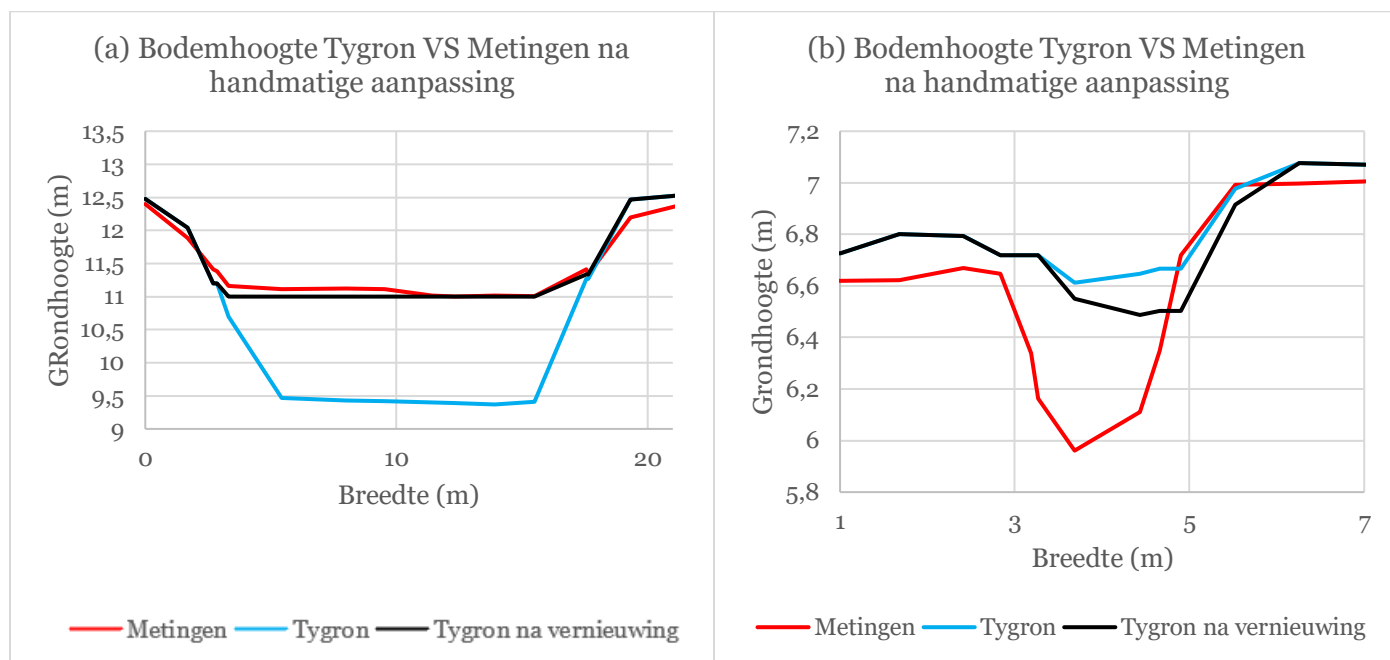
**(a) Automatisch ingetekend**

**(b) Handmatig ingetekend**



*Figuur 29: Missende watergang in Tygron*

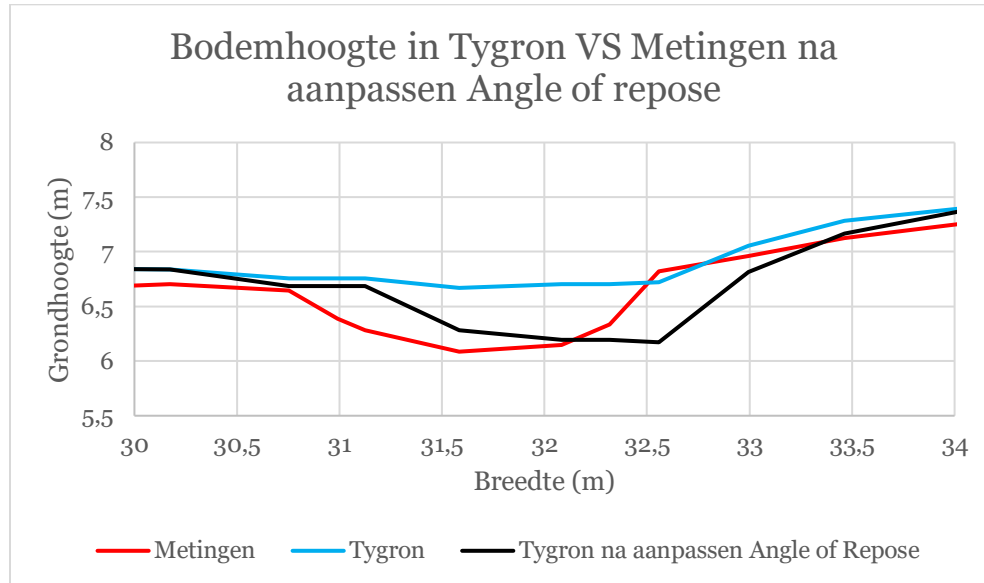
Bij een ondiepe, brede watergang is de reden dat Tygron de watergang overschat, de gespecificeerde bodemhoogte. Hierdoor zijn deze watergangen redelijk makkelijk aan te passen. Alleen een nieuwe bodemhoogte moet gespecificeerd worden. Dit is gedaan voor de watergangen uit Figuur 26a en 27b. In Figuur 30a, is te zien dat met deze wijziging de watergang ook in Tygron goed wordt ingetekend. Het profiel in Tygron benaderd erg accuraat het gemeten profiel. In Figuur 30b, is te zien dat dit niet geldt voor de smalle watergang. Door het instellen van een bodemhoogte met eenb NAP-hoogte, in plaats van een diepte, is de watergang wel aangepast. Echter niet tot aan de ingetelde bodemhoogte, wat aangeeft dat de “angle of repose” leidend is bij de intekening van deze watergang.



*Figuur 30: Bodemprofielen in Tygron vs fysieke metingen na handmatig instellen van de bodemhoogte*

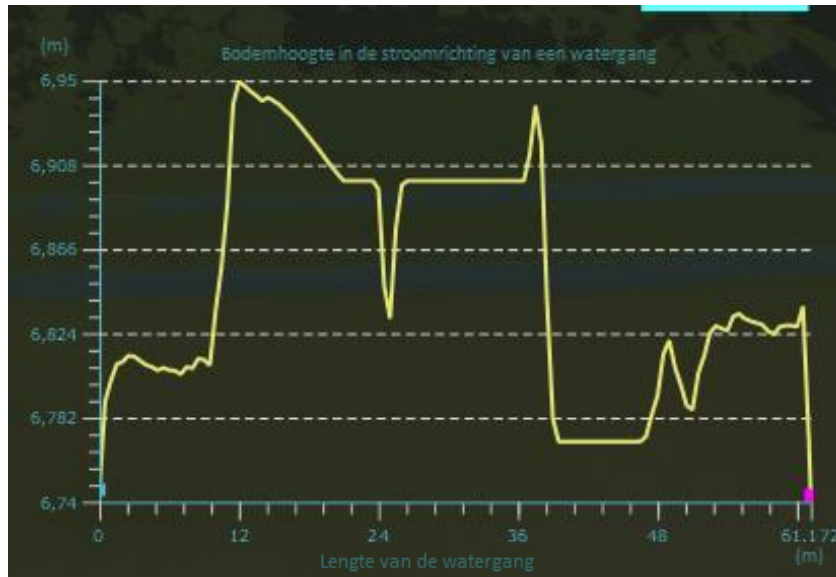


Bij aanpassing van de “angle of repose” naar 50 graden, in plaats van 25 graden op de linker oever en 33 graden op de rechter oever, is de ingestelde bodemhoogte wel bereikt. Het resultaat is te zien in Figuur 31. Echter is het profiel van de watergang nog steeds niet gelijk met de metingen. Ook is het instellen van een “angle of repose” van 50 graden een pure gok geweest. Deze hoek zal voor andere watergangen op een andere waarde moet staan. Er is moeilijk een voorspelling te maken van de benodigde “angle of repose” omdat de uiteindelijk ingetekende helling niet overeenkomt met theoretisch verwachte helling (Eeltink, 2021). Dit geeft geen controle over de intekening van de smalle watergangen in Tygron. De enige manier is via zo geheten “trial and error”. Dat maakt deze manier van watergangen intekenen haast onwerkbaar.



*Figuur 31: Bodemprofiel in Tygron VS fysieke metingen na handmatig aanpassen bodemhoogte en "angle of repose"*

Er is tot nu toe alleen nog maar gekeken naar een onafhankelijke doorsnede. Als er gekeken wordt naar de bodemprofiel in de lengte van een watergang, is te zien dat het instellen van bodemhoogtes langs deze lengte niet zorgen voor het gewenste effect. In Figuur 32 zijn vier aaneensluitende watervlakken ingetekend. Deze watervlakken hadden aaneensluitend een bodemhoogte van 6.77, 6.90, 6.90 en 6,74 meter. In Figuur 32 is dit maar gedeeltelijk terug te zien. Het is goed te zien waar de watervlakken op elkaar aansluiten, hier zitten sprongen in de waterhoogte. Dit komt waarschijnlijk doordat op deze plekken de over hoger gelegen is. Hierdoor kan met dezelfde “anlge of repose” niet dezelfde bodemhoogte worden bereikt. Ook de bodemhoogtes in de lengte van een watergang en daarmee een verhang in een watergang zijn dus lastig te controleren in een Tygron model.



Figuur 32: Bodemprofiel van een watergang in de stroomrichting

### 4.3.3 Duikers

Er zijn in het model twee duikers ontdekt die gekke resultaten geven. Deze duikers waren vanuit de ingeladen data, door Tygron, niet goed in het hoogtemodel geplaatst. Hierdoor werd water opgestuwd en was er op sommige plaatsen geen doorstroom van water. Dit resulteerde in hogere waterstanden bovenstrooms van deze duikers. Sommige duikers worden niet goed in het hoogtemodel geplaatst, echter wordt dit niet door het programma herkend als fout. Er is geen fout in de data van de duiker. De duiker wordt op de goede hoogte geplaatst en heeft de lengte zoals gespecificeerd in de data van het Waterschap. Er zijn geen bodemhoogtemetingen beschikbaar op deze plek, maar waarschijnlijk wijkt de bodemhoogte van de watergang bij de instroomcel af van wat het zou moeten zijn. Hierdoor stroomt water niet goed door de duiker. Bij de handmatige intekening is de duiker een stuk verlengd, waardoor de instroomcel veranderd is, terwijl de instroomhoogte wel gelijk is gehouden. Figuur 33 is een visualisatie van de locatie in het model. Figuur 33a is een simulatie met de duiker zoals deze door het programma is geplaatst en in Figuur 33b is de duiker handmatig geplaatst.

(a) Automatisch ingetekend

(b) Handmatig ingetekend



Figuur 33: Locatie van de niet goed ingetekende duiker in Tygron

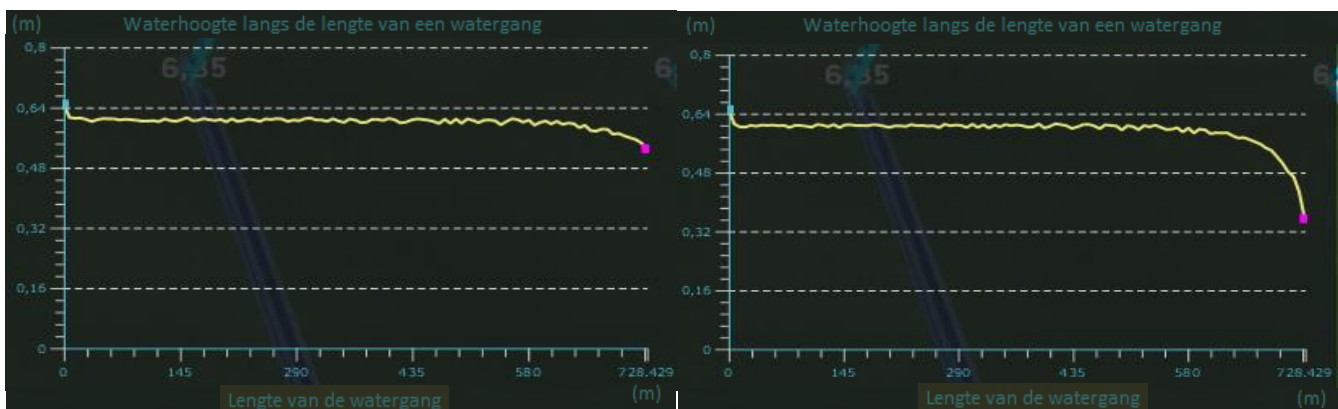
## 4.3.4 Uitlaten

De benedenstroomse randvoorwaarde die aan de uitlaat wordt meegegeven heeft een invloed op de waterstand in de aansluitende watergang. De uitlaat kan zo worden ingesteld, dat er een constante of een variërend debiet doorheen stroomt. Verder kan voor de uitlaat een minimale waterhoogte worden gespecificeerd. Er zal dan water van de cel worden weggenomen tot aan deze waterhoogte. De waterhoogte zal dus nooit onder de ingestelde waterhoogte geraken.

Hoe groter het verschil is tussen de ingestelde benedenstroomse waterhoogte en de uitgerekende waterhoogte in het model, hoe groter de invloed van de uitlaat en hoe verder stroomopwaarts deze invloed te merken is. Dit zorgt ervoor dat er altijd fouten ontstaan in de benedenstroomse waterstand. Hoe kleiner de horizontale afstand tot de uitlaat, hoe groter de fout. De invloed van de uitlaat is ook erg afhankelijk van de aanwezigheid van duikers, de precieze loop van een watergang en het verhang in de watergang. Als er een te laag debiet door de uitlaat stroomt zal er namelijk opstuwning van water plaatsvinden, hierdoor stijgt de waterhoogte. Als er duikers of stuwen in de aangrenzende watergang liggen, zorgen deze voor een groot deel al voor een opstuwning van het water waardoor de opstuwning door de uitlaat minder te merken is. De precieze invloed hiervan is nog niet bepaald en valt buiten de scope van dit onderzoek.

**(a) Waterhoogte uitlaat 0,5 meter**

**(b) Waterhoogte uitlaat 0,1 meter**



*Figuur 34: de relatieve waterstand langs de lengte van een watergang*

Een tweede beperking is dat er geen maximale waterhoogte kan worden ingesteld. Als het debiet door de watergang hoger is dan het maximale debiet door de uitlaat, wat het geval zou zijn als een “maximale waterhoogte” wordt bereikt, dan stijgt de waterhoogte boven de ingestelde waterhoogte van de uitlaat uit. Dit is te zien in Figuur 34. In Figuur 34a is de waterhoogte voor de uitlaat op 0,5 meter ingesteld. Het debiet door de watergang is lager dan het maximale debiet door de uitlaat en dus wordt de waterstand gecontroleerd op 0,5 meter. In Figuur 34b is de ingestelde waterstand van de uitlaat 0,1 meter. Hier is het debiet door de watergang hoger dan het maximale debiet door de uitlaat. De waterstand overstijgt dus de ingestelde waterstand.

De verwachting is dat benedenstroomse modelresultaten verbeterd kunnen worden, als er een q-h relatie voor de uitlaat gespecificeerd kan worden. Dit betekent dat de uitlaat dan een bepaald debiet doorlaat op basis van de berekende waterhoogte tijdens de simulatie op een bepaald meetpunt in het model. De uitstroom wordt dus door de simulatie gecontroleerd. Dit is realistisch en haalbaar, aangezien dit soort relaties in bijvoorbeeld SOBEK wel ingesteld kunnen worden.

## 5 Discussie

In dit onderzoek is geprobeerd meer inzicht te krijgen in het simuleren van stroming door watergangen in Tygron. Het modelgebied van de Chaamse Beken was gekozen omdat het waterschap Brabantse Delta ervan uitging dat er veel recente data beschikbaar was voor dit gebied, dit bleek echter niet zo te zijn. Daarom is ervoor gekozen om de resultaten uit een SOBEK-model van het gebied te gebruiken als referentie data. Dit model is aangeleverd door het waterschap. Het model is niet zelf opgezet waardoor de validiteit niet gegarandeerd kon worden. Wel is het model in grote lijnen door een adviseur van Aveco de Bondt gecontroleerd op fouten. Hierin zijn geen fouten gevonden. In het onderzoek is er daarom van uitgegaan dat het waterschap betrouwbare en gekalibreerde data heeft aangeleverd. Omdat er geen gegevens van waterstanden of debieten beschikbaar waren om de resultaten uit beide modellen mee te vergelijken, zijn conclusies over de validiteit van beide modellen niet ondersteund.

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van Tygron versie 2021.10.5.0. Zoals aangegeven wordt de software constant verbeterd en aangepast. Hierdoor is het mogelijk dat resultaten en conclusies uit dit onderzoek niet meer van toepassing zijn op nieuwere versies. Vooral de rekentijden die in dit onderzoek genoemd worden zullen aan verandering onderhevig zijn. Het bedrijf heeft al aangekondigd dat het voornemens is om de capaciteit in 2021 te verviervoudigen, dit zal ook invloed hebben op de rekentijden.

De resultaten in de gevoeligheidsanalyse zijn door de methode die gebruikt is, de “Elementary Effect Method”, heel erg afhankelijk van het bereik dat is gekozen waarbinnen de parameters kunnen variëren. Daarom zijn de resultaten uit dit onderzoek niet in één lijn door te trekken naar bijvoorbeeld de simulatie van rivieren. Hier varieert het debiet namelijk op een veel grotere schaal dan in het model van de Chaamse Beken, waardoor de invloed van de ruwheid ten opzichte van het debiet kleiner zal zijn. Vooral in situaties waar het bereik van de ene parameter wel groter wordt maar het bereik van een andere parameter niet, zal de verhouding tussen de effecten van parameters een ander beeld geven. Waar voor de parameters hetzelfde bereik wordt gekozen zullen de resultaten wel vergelijkbaar zijn met de resultaten uit dit onderzoek. Ook zal de invloed van de ruwheid nog steeds toenemen bij hogere waterstanden, dit is niet afhankelijk van het gekozen bereik van de parameters.

Deze debietsafhankelijkheid van de ruwheid in een Tygron model is anders dan verwacht zou worden op basis van literatuur. Er is op dit moment echter te weinig kennis over de exacte code en berekeningen in Tygron, om hieruit eenduidig te concluderen dat het model onbetrouwbaar is. Wel kan er hieruit dus geconcludeerd worden dat extra kennis nodig van de rekenprocessen op de achtergrond, om gericht met de ruwheid te kunnen kalibreren. Hierdoor zijn ruwheden uit andere modellen ook niet één op één over te nemen in een Tygron model.

In het model van de Chaamse Beken is gebruikt gemaakt van AHN 3. Dat is een versie van het digitaal hoogtemodel van Nederland waarvoor data is ingewonnen tussen 2014 en 2019. In 2021 staat de uitgave van AHN 4 gepland. In een eerdere uitgave is al gebleken dat er op bepaalde punten verschillen zitten tussen AHN 3 en AHN 4. Het werken met AHN 4 heeft dus direct invloed op het hoogtemodel in Tygron. Het is nog niet bekend wat voor effecten dit gaat hebben. Het kan zijn dat hierdoor de intekening van watergangen op de oever nog accurater gaat of dat hoogtemetingen onder bomen verbeterd zijn. Dit kan in Tygron een verbeterend effect hebben op de beperkingen die zijn gevonden in het intekenen van watergangen.

## 6 Conclusie

In dit onderzoek is er geprobeerd om inzicht te creëren in het initialiseren van een model van een bekensysteem in Tygron, de mogelijkheden van een kalibratie op basis van de Manning coëfficiënt en de beperkingen van het simuleren van neerslag-afvoer stroming in dit model. Tygron is een simulatie pakket dat direct gebaseerd is op het actueel hoogte bestand Nederland, het AHN. Dit zorgt ervoor dat Tygron erg realistisch stroming over maaiveld kan simuleren. Neerslag water wordt realistisch geborgen op het maaiveld wat zorgt voor een realistische afstroming naar watergangen. Door de rekenkracht van Tygron kunnen dit soort afstromingsimulaties erg snel worden uitgevoerd.

Er is in Tygron geen functie waarbij simulatieresultaten direct gebruikt kunnen worden als initialisatie voor nieuwe simulaties. Voor modelgebieden met een zeer klein verval, zoals een polder, is dit geen probleem. Bij weinig verhang kan namelijk voor grote vlakken in Tygron eenzelfde initiële waterhoogte worden gespecificeerd. Bij modellen zoals dat van de Chaamse Beken is dit echter niet mogelijk. Een initiële waterstand wordt brekend in het Tygron model. Bij een lage waterstand is het rekenen zonder infiltratie voldoende om een initieel waterniveau te berekenen in het model. Infiltratie treedt op aan de oevers en is daarom noodzakelijk om in te schakelen bij hogere debieten. Doordat Tygron alleen vector bestanden ondersteund om deze resultaten om te zetten naar peilgebieden, is een GIS-programma noodzakelijk en is de nauwkeurigheid van de initialisatie gelimiteerd door dit GIS-pakket. In dit onderzoek is gebleken dat het gebruik van Vonoroi polygonen voor de meest nauwkeurigste resultaten en voor de grootste reductie in rekestijd zorgt. Ook kan hiermee direct de grondwaterstand worden geïnitieerd.

De Manning coëfficiënt voor ruwheid heeft een beduidend grote invloed op de berekening van waterstanden in Tygron. Hoe groter de waarde van de ruwheid, hoe lager de stroomsnelheid en hoe hoger de waterstand in een watergang. De waarden van de ruwheid zijn gebaseerd op het type ondergrond en niet op de hydraulische straal of begroeiing in een watergang. Dit betekent dat de ruwheid in een watergang in Tygron, niet gebaseerd kan worden op gemeten of gesimuleerde waarden in een watergang, uit andere onderzoeken. Hiernaast blijkt uit de resultaten, dat de invloed van de ruwheid groter wordt naarmate het waterpeil hoger wordt. Dit is niet realistisch en zorgt waarschijnlijk voor overschatting van het waterpeil bij hoge debieten en onverwachte resultaten in piekafvoeren door watergangen.

De manier waarop Tygron kunstwerken en watergangen intekent, zorgt ook voor een beperking in het model. Duikers worden niet altijd goed in het hoogtemodel geplaatst en dit wordt ook niet altijd door de software herkend. Dit zorgt ervoor dat het voor een modelleur lastig is om fouten in duikers in het model te herkennen. Zeker als een model veel duikers bevat, kan dit een erg grote invloed hebben op de simulatie resultaten.

Het intekenen van de watergangen in Tygron zorgt voor een nog grotere uitdaging. Het profiel aan oppervlakte bij de oever is vaak erg realistisch ingetekend. Echter zodra het profiel onder water bepaald wordt, ontstaan er op veel plekken fouten. Sommige fouten zijn makkelijk voor een modelleur aan te passen. Zo kunnen meertjes en vennen makkelijk handmatig ingetekend worden tot een realistische berging ontstaat. Echter zijn fouten in watergangen moeilijker op te lossen. Daarnaast is de locatie van watergangen onder bomen aan een bepaalde onzekerheid onderhevig.



Smalle watergangen kunnen niet realistisch worden ingetekend zonder onrealistische waarden voor de “angle of repose” aan te nemen. Ook wordt hierdoor het eventuele effect van een verschillende ondergrond aan beide kanten van een watergang uitgeschakeld. Er kan door middel van watervlakken ook geen verhang in een watergang worden ingetekend. Er kan voor elk watervlak namelijk maar één NAP hoogte worden gespecificeerd.

Als laatste is in dit onderzoek gemerkt dat de invloed van een uitlaat benedenstrooms niet genegeerd kan worden. Er kan wel een minimale waterhoogte worden ingesteld maar geen maximale waterhoogte. Ook is er aangetoond dat het instellen van een vaste waterhoogte grotere invloed heeft naarmate het verschil in instelling en uitgerekende waterhoogte groter wordt.

## 7 Aanbevelingen

Deze bachelor thesis heeft meer inzicht gegeven in het simuleren van waterstroming in een bekensysteem in Tygron. Dit onderzoek heeft echter ook nieuwe vragen opgewekt die niet binnen dit onderzoek beantwoord konden worden.

Zo is in dit onderzoek aangetoond dat de ruwheid coëfficiënt een onverwachte invloed heeft op de berekening van de stroomsnelheid en daarmee de waterstand in een Tygron model. Om deze invloed precies te bepalen is een vervolgonderzoek aanbevolen. Het is aanbevolen om in dit onderzoek te kijken naar het verschil in invloed van de ruwheid bij lagere en hogere waterstanden. Hierin is het aanbevolen om de nadruk te leggen op de reden waardoor de ruwheid bij hogere waterstanden een grotere invloed blijkt te hebben op de waterstand.

Om de potentie van de Tygron software waar te kunnen maken, worden er een paar verbeteringen in de software voorgesteld. Het is aanbevolen om de mogelijkheid tot een Q-h relatie in een uitlaat in te bouwen. Dit geeft meer betrouwbaarheid in de gesimuleerde waterhoogtes benedenstrooms. Op dit moment kunnen initiële waterhoogtes alleen worden bepaald met een NAP waarde. Voor modellen met een groot verval kan het wenselijk zijn om een relatieve waterhoogte te kunnen instellen. Hierdoor zou het gebruik van GIS-programma's achterwege gelaten kunnen worden.

Het is ook wenselijk om het controleren van duikers makkelijker te maken. Dit zou bijvoorbeeld kunnen door een aantal cellen rondom de inlaat cel van de duiker aan te merken als controlegebied. Is er een waterstroming in deze cellen maar is er geen stroming door de duiker, kan er een waarschuwing worden gegeven. Er kan ook een groter gebied voor de inlaat van een duiker worden gespecificeerd. Zeker als er gerekend wordt met een kleine celgrootte, kan dit fouten oplossen. Hierdoor zal een eventuele foute bodemhoogte van een watergang, vlak voor een duiker, bijvoorbeeld minder invloed hebben op de stroming door deze duiker.

Het grootste aandachtspunt is de manier hoe watergangen worden ingetekend in Tygron. Het gebruik van de “angle of repose” is geen slechte theorie en zorgt in veel gevallen voor een zeer realistisch profiel. Echter zorgt dit er ook voor dat er weinig controle is over het profiel wanneer de standaard intekening ontoereikend is. Zeker op plekken waar het AHN minder accuraat is zorgt dit voor fouten. Voor Tygron om een goed te kalibreren model te kunnen opzetten, is het aan te bevelen om meer controle te geven over de locatie, het profiel en het verhang in een watergang. Dit kan bijvoorbeeld door een optie te geven in welke attriboot er leidend is bij de intekening van een watergang, de “angle of repose” of de bodemhoogte.

# 8 Verwijzingen

- Cassan, L., Roux, H., & Dartus, D. (2020, April). Velocity distribution in open channel flow with spatially distributed roughness. *Environ Fluid Mech*, 20, 321-338. doi:<https://doi.org/10.1007/s10652-019-09720-x>
- Eeltink, T. (2021). *Analyse van twee waterbalansen in het Tygron Geodesign Platform*. Bachelor Thesis, University of Twente, Enschede.
- Eigenhuijsen, E., & Luijendijk, J. (2008, June 10). Integrale Gebiedsanalyse Chaamse Beken, Strijkbeekse Beek en Bavelse Leij. Tauw; Waterschap Brabantse Delta.
- Hutchins, M. G., McGrane, S. J., Miller, J. D., Hagen-Zanker, A., Kjeldsen, T. R., Dadson, S. J., & Rowland, C. S. (2016). Integrated Modelling in Urban Hydrology: Reviewing the role of monitoring technology in overcoming the issue of 'big data' requirements. *WIREs Water*, 4(1). doi:10.1002/wat2.1177
- Janssen, L. (2021). *Determining the influence of vegetation on the hydraulic roughness and the variability therein in two streams of Waterschap Rijn & IJssel*. Bachelor Thesis, University of Twente, Enschede.
- Kamsma, J. (2019, maart 8). *Update-kaart-waterschappen-toegevoegd*. Opgehaald van [blog.localfocus](http://blog.localfocus.nl/2019/03/update-kaart-waterschappen-toegevoegd/): <https://blog.localfocus.nl/2019/03/update-kaart-waterschappen-toegevoegd/>
- Knepfle, M. (2020). Implementatie van de grondwatermodule. Opgeroepen op juni 2021, van <https://www.tygron.com/nl/event/tygron-community-of-practice-online-sessie-grondwater/>
- Kurganov, A., & Guergana, P. (2007). A second-order well-balanced positively preserving central-upwind scheme for the saint-venant system. *Communications in Mathematical Sciences*, 5(1), 133-160. doi:1175797625
- Manning, R. (1891). "On the flow of water in open channels and pipes". In *Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland*. (20 ed., pp. 161-207).
- Morris, M. (1991). Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometrics*, 33(2), 161-174. doi:10.2307/1269043
- Paarlberg, A., Dohmen-Janssen, C., Hulscher, S., & Termes, A. (2005). Effect of main channel roughness on water levels. *Publication of the Netherlands Centre for River Studies, 2005*. Opgehaald van ISSN 1568-234X
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., . . . Tarantola, S. (2008). Elementary Effects Method. In *Global Sensitivity Analysis. The Primer* (ISBN 978-0-470-05997-5 ed.). John Wiley & Sons, Ltd.
- Tygron Support. (2021 - a). *Border model*. Opgeroepen op Juli 2021, van Tygron Support Wiki: [https://support.tygron.com/wiki/Border\\_model\\_\(Water\\_Overlay\)](https://support.tygron.com/wiki/Border_model_(Water_Overlay))
- Tygron Support. (2021 - b). *Elevation model*. Opgehaald van Tygron Support Wiki: [https://support.tygron.com/wiki/Elevation\\_model](https://support.tygron.com/wiki/Elevation_model)
- Tygron Support. (2021 - c). *Infiltration Model*. Opgeroepen op Juli 2021, van Tygron Support Wiki: [https://support.tygron.com/wiki/Infiltration\\_model\\_\(Water\\_Overlay\)](https://support.tygron.com/wiki/Infiltration_model_(Water_Overlay))
- Tygron Support. (2021 - d). *Surface Model*. Opgeroepen op Juli 2021, van Tygron Support Wiki: [https://support.tygron.com/wiki/Surface\\_model\\_\(Water\\_Overlay\)](https://support.tygron.com/wiki/Surface_model_(Water_Overlay))
- Tygron Support. (2021 - e). *Water Module Theory*. Opgeroepen op Juli 2021, van Tygron Support Wiki: [https://support.tygron.com/wiki/Water\\_Module\\_theory](https://support.tygron.com/wiki/Water_Module_theory)
- Xiao Chen, C. (2017). *The influence of upstream discharge and hydraulic roughness on high water occurrence in Ems*.

## 9 Bijlagen

# A Elementary Effects Method

De invloed van een parameter wordt in de “Elementary Effects Method” beschreven als het gemiddelde van de elementaire effecten van een parameter. Een parameter kan in een bepaald bereik variëren over  $p$  aantal levels. In dit onderzoek is gekozen voor vier levels,  $p = 4$ . Binnen een bereik van  $[0,1]$  betekent dit dat de levels 0,  $1/3$ ,  $2/3$  en 1 zijn. Er zijn  $k = 3$  parameters die worden onderzocht in dit onderzoek. Als een startwaarde voor elke parameter is gegeven, is een elementair effect van de  $i^e$  parameter als volgt gedefinieerd:

$$EE_i = \frac{[Y(X_1, X_2, \dots, X_{i-1}, X_i + \Delta, \dots, X_k) - Y(X_1, X_2, \dots, X_k)]}{\Delta} \quad (\text{Saltelli et al., 2008})$$

$$\Delta = \{2/(p-1)\} = 2/3$$

$Y$  = modelresultaat bij de gegeven set aan waarden voor elke parameter

$X_i$  = waarde van een parameter

$X_i + \Delta$  = getransformeerde waarde van de  $i^e$  parameter.

De startwaarden van de parameters worden zo gekozen dat voor elke parameter geldt dat  $X+\Delta$  binnen het gekozen bereik valt. Een elementary effect wordt dus bepaald door het verschil in modeluitkomst als één parameter verschuift van het ene level naar het andere. Meerdere elementaire effecten van één parameter kunnen worden uitgerekend door verschillende startwaarden te kiezen. Hierin kan een getransformeerde waarde van een parameter twee levels hoger of twee levels lager liggen ten opzichte van de startwaarde. De transformatiestap blijft altijd gelijk aan  $2/3$ .

Om het kiezen van de gebruikte waarden van de parameters random te laten verlopen, is een bemonstering strategie voorgesteld door Morris (1991). Hierin worden een aantal random trajecten opgebouwd met  $k+1$  punten. Elk traject heeft als resultaat een elementair effect voor elke parameter. Eerdere experimenten hebben bewezen dat goede resultaten worden geboekt met vier levels en tien trajecten (Saltelli et al., 2008). Ieder traject bestaat uit vier punten waarin voor elke parameter een bepaald level is geselecteerd. De levels in het eerste punt in een traject worden random gekozen. In het tweede punt wordt één van de parameters in level gevarieerd. In het derde punt wordt een andere parameter in level gevarieerd en in het vierde punt wordt het level van het laatste punt gevarieerd. Zo is in elk traject elke parameter minstens één keer in level gevarieerd, waardoor er voor elke parameter een elementair effect kan worden berekend.

De technische stappen gaan als volgt. Eerst wordt een basis matrix gemaakt met een dimensie van  $4 \times 3$

$$B = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array}$$

De bemonsteringsmatrix wordt bepaald door de formule:

$$B^* = (J_{k+1,1} X^* + (\Delta/2) [(2B - J_{k+1,k}) D^* + J_{k+1,k}]) P^*, \quad (\text{Saltelli et al., 2008})$$

Hierin is  $J_{k+1,1}$  een  $4 \times 3$  matrix van enen.  $X^*$  is een random bepaalde basis vector met levels.  $D^*$  is een  $3 \times 3$  diagonale matrix met elke element een +1 of -1.  $P^*$  is een  $3 \times 3$  random permutatiematrix met in elke rij één element met de waarde 1. Van boven naar beneden geeft P aan in welke volgorde de levels van de parameter worden veranderd en D geeft aan of het level van een parameter toeneemt of afneemt.

Alle mogelijkheden voor D,P en x zijn gegeven in Tabel 2. Elke mogelijkheid is genummerd. Door met een dobbelsteen te gooien wordt zo random voor elk traject een matrix D, P en x bepaald. Hierdoor ontstaan er 10 random trajecten die weergegeven zijn in Tabel 3. In de tabel wordt voor elk traject de waardes van de parameters in de simulaties weergegeven. Het elementaire effect van een parameter wordt bepaald door het verschil in modelresultaat, als die parameter in een traject is gevarieerd van level. Er worden dus 10 effecten voor elke parameter berekend, waaruit een gemiddelde wordt berekend. Dit gemiddelde representeert de invloed van die parameter.

Tabel 2: Alle mogelijkheden voor D, P en x

| D |        |         |         | P |        |         |         | Startwaardes X |        |         |         |
|---|--------|---------|---------|---|--------|---------|---------|----------------|--------|---------|---------|
|   | Debiet | Ruwheid | Verhang |   | Debiet | Ruwheid | Verhang |                | Debiet | Ruwheid | Verhang |
| 1 | -1     | 0       | 0       | 1 | 1      | 0       | 0       | 1              | 1/3    | 1/3     | 1/3     |
|   | 0      | -1      | 0       |   | 0      | 1       | 0       |                |        |         |         |
|   | 0      | 0       | -1      |   | 0      | 0       | 1       |                |        |         |         |
| 2 | -1     | 0       | 0       | 2 | 1      | 0       | 0       | 2              | 1/3    | 1/3     | 0       |
|   | 0      | -1      | 0       |   | 0      | 0       | 1       |                |        |         |         |
|   | 0      | 0       | 1       |   | 0      | 1       | 0       |                |        |         |         |
| 3 | -1     | 0       | 0       | 3 | 0      | 1       | 0       | 3              | 1/3    | 0       | 0       |
|   | 0      | 1       | 0       |   | 1      | 0       | 0       |                |        |         |         |
|   | 0      | 0       | 1       |   | 0      | 0       | 1       |                |        |         |         |
| 4 | 1      | 0       | 0       | 4 | 0      | 0       | 1       | 4              | 0      | 0       | 0       |
|   | 0      | 1       | 0       |   | 1      | 0       | 0       |                |        |         |         |
|   | 0      | 0       | 1       |   | 0      | 1       | 0       |                |        |         |         |
| 5 | 1      | 0       | 0       | 5 | 0      | 0       | 1       | 5              | 0      | 0       | 1/3     |
|   | 0      | 1       | 0       |   | 0      | 1       | 0       |                |        |         |         |
|   | 0      | 0       | -1      |   | 1      | 0       | 0       |                |        |         |         |
| 6 | 1      | 0       | 0       | 6 | 0      | 1       | 0       | 6              | 0      | 1/3     | 1/3     |
|   | 0      | -1      | 0       |   | 0      | 0       | 1       |                |        |         |         |
|   | 0      | 0       | -1      |   | 1      | 0       | 0       |                |        |         |         |

Tabel 3: Opgebouwde random trajecten

| Trajecten          |         |         |    |                      |         |         |
|--------------------|---------|---------|----|----------------------|---------|---------|
| Waardes van levels |         |         |    | Waardes in simulatie |         |         |
| Debiet             | Ruwheid | Verhang |    | Debiet               | Ruwheid | Verhang |
| 1/3                | 0       | 1       | 1  | 0,4                  | 0,02    | 0,003   |
| 1/3                | 0       | 1/3     |    | 0,4                  | 0,02    | 0,00233 |
| 1                  | 0       | 1/3     |    | 1                    | 0,02    | 0,00233 |
| 1                  | 2/3     | 1/3     |    | 1                    | 0,04    | 0,00233 |
| 0                  | 2/3     | 1       | 2  | 0,1                  | 0,04    | 0,003   |
| 0                  | 2/3     | 1/3     |    | 0,1                  | 0,04    | 0,00233 |
| 0                  | 0       | 1/3     |    | 0,1                  | 0,02    | 0,00233 |
| 2/3                | 0       | 1/3     |    | 0,7                  | 0,02    | 0,00233 |
| 0                  | 1/3     | 1       | 3  | 0,1                  | 0,03    | 0,003   |
| 2/3                | 1/3     | 1       |    | 0,7                  | 0,03    | 0,003   |
| 2/3                | 1       | 1       |    | 0,7                  | 0,05    | 0,003   |
| 2/3                | 1       | 1/3     |    | 0,7                  | 0,05    | 0,00233 |
| 1                  | 2/3     | 2/3     | 4  | 1                    | 0,04    | 0,00267 |
| 1/3                | 2/3     | 2/3     |    | 0,4                  | 0,04    | 0,00267 |
| 1/3                | 2/3     | 0       |    | 0,4                  | 0,04    | 0,002   |
| 1/3                | 0       | 0       |    | 0,4                  | 0,02    | 0,002   |
| 0                  | 1/3     | 0       | 5  | 0,1                  | 0,03    | 0,002   |
| 0                  | 1/3     | 2/3     |    | 0,1                  | 0,03    | 0,00267 |
| 2/3                | 1/3     | 2/3     |    | 0,7                  | 0,03    | 0,00267 |
| 2/3                | 1       | 2/3     |    | 0,7                  | 0,05    | 0,00267 |
| 1                  | 0       | 1       | 6  | 1                    | 0,02    | 0,003   |
| 1/3                | 0       | 1       |    | 0,4                  | 0,02    | 0,003   |
| 1/3                | 0       | 1/3     |    | 0,4                  | 0,02    | 0,00233 |
| 1/3                | 2/3     | 1/3     |    | 0,4                  | 0,04    | 0,00233 |
| 1/3                | 1       | 1/3     | 7  | 0,4                  | 0,05    | 0,00233 |
| 1/3                | 1       | 1       |    | 0,4                  | 0,05    | 0,003   |
| 1                  | 1       | 1       |    | 1                    | 0,05    | 0,003   |
| 1                  | 1/3     | 1       |    | 1                    | 0,03    | 0,003   |
| 1                  | 1/3     | 1       | 8  | 1                    | 0,03    | 0,003   |
| 1                  | 1       | 1       |    | 1                    | 0,05    | 0,003   |
| 1/3                | 1       | 1       |    | 0,4                  | 0,05    | 0,003   |
| 1/3                | 1       | 1/3     |    | 0,4                  | 0,05    | 0,00233 |
| 1                  | 1/3     | 1       | 9  | 1                    | 0,03    | 0,003   |
| 1/3                | 1/3     | 1       |    | 0,4                  | 0,03    | 0,003   |
| 1/3                | 1/3     | 1/3     |    | 0,4                  | 0,03    | 0,00233 |
| 1/3                | 1       | 1/3     |    | 0,4                  | 0,05    | 0,00233 |
| 1                  | 2/3     | 2/3     | 10 | 1                    | 0,04    | 0,00267 |
| 1                  | 2/3     | 0       |    | 1                    | 0,04    | 0,002   |
| 1                  | 0       | 0       |    | 1                    | 0,02    | 0,002   |
| 1/3                | 0       | 0       |    | 0,4                  | 0,02    | 0,002   |



# B Resultaten simulaties gevoeligheidsanalyse

Tabel 4: Resultaten simulaties gevoeligheidsanalyse

| Waterstand in meters   |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                        | Discharge 0,1 m3/s    |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|                        | Verval 0,002 m/m      |                       |                       |                       | Verval 0,002333 m/m   |                       |                       |                       | Verval 0,002667 m/m   |                       |                       |                       | Verval 0,003 m/m      |                       |                       |                       |
|                        | Watergang<br>1m breed | Watergang<br>2m breed | Watergang<br>3m breed | Watergang<br>4m breed | Watergang<br>1m breed | Watergang<br>2m breed | Watergang<br>3m breed | Watergang<br>4m breed | Watergang<br>1m breed | Watergang<br>2m breed | Watergang<br>3m breed | Watergang<br>4m breed | Watergang<br>1m breed | Watergang<br>2m breed | Watergang<br>3m breed | Watergang<br>4m breed |
| Ruwheid 0,01 S/m^(1/3) | 0,232                 | 0,364                 | 0,251                 | 0,184                 | 0,218                 | 0,353                 | 0,239                 | 0,173                 | 0,409                 | 0,357                 | 0,233                 | 0,165                 | 0,365                 | 0,343                 | 0,222                 | 0,156                 |
| Ruwheid 0,02 S/m^(1/3) | 0,387                 | 0,436                 | 0,311                 | 0,228                 | 0,364                 | 0,421                 | 0,298                 | 0,213                 | 0,467                 | 0,429                 | 0,289                 | 0,201                 | 0,435                 | 0,406                 | 0,276                 | 0,188                 |
| Ruwheid 0,03 S/m^(1/3) | 0,512                 | 0,511                 | 0,357                 | 0,262                 | 0,481                 | 0,488                 | 0,342                 | 0,244                 | 0,518                 | 0,496                 | 0,334                 | 0,229                 | 0,489                 | 0,476                 | 0,319                 | 0,214                 |
| Ruwheid 0,04 S/m^(1/3) | 0,627                 | 0,553                 | 0,400                 | 0,288                 | 0,583                 | 0,528                 | 0,379                 | 0,267                 | 0,604                 | 0,537                 | 0,368                 | 0,251                 | 0,565                 | 0,521                 | 0,352                 | 0,235                 |
|                        | Discharge 0,4 m3/s    |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|                        | Verval 0,002 m/m      |                       |                       |                       | Verval 0,002333 m/m   |                       |                       |                       | Verval 0,002667 m/m   |                       |                       |                       | Verval 0,003 m/m      |                       |                       |                       |
|                        | Watergang<br>1m breed | Watergang<br>2m breed | Watergang<br>3m breed | Watergang<br>4m breed | Watergang<br>1m breed | Watergang<br>2m breed | Watergang<br>3m breed | Watergang<br>4m breed | Watergang<br>1m breed | Watergang<br>2m breed | Watergang<br>3m breed | Watergang<br>4m breed | Watergang<br>1m breed | Watergang<br>2m breed | Watergang<br>3m breed | Watergang<br>4m breed |
| Ruwheid 0,01 S/m^(1/3) | 0,425                 | 0,538                 | 0,414                 | 0,348                 | 0,397                 | 0,514                 | 0,402                 | 0,336                 | 1,197                 | 0,670                 | 0,425                 | 0,332                 | 1,190                 | 0,650                 | 0,404                 | 0,320                 |
| Ruwheid 0,02 S/m^(1/3) | 0,706                 | 0,671                 | 0,521                 | 0,424                 | 0,662                 | 0,651                 | 0,503                 | 0,408                 | 1,222                 | 0,735                 | 0,523                 | 0,403                 | 1,223                 | 0,716                 | 0,500                 | 0,387                 |
| Ruwheid 0,03 S/m^(1/3) | 1,322                 | 0,767                 | 0,600                 | 0,488                 | 1,309                 | 0,747                 | 0,577                 | 0,468                 | 1,320                 | 0,785                 | 0,596                 | 0,462                 | 1,256                 | 0,775                 | 0,573                 | 0,444                 |
| Ruwheid 0,04 S/m^(1/3) | 1,378                 | 0,848                 | 0,664                 | 0,540                 | 1,355                 | 0,827                 | 0,639                 | 0,520                 | 1,356                 | 0,852                 | 0,647                 | 0,511                 | 1,337                 | 0,816                 | 0,624                 | 0,492                 |
|                        | Discharge 0,7 m3/s    |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|                        | Verval 0,002 m/m      |                       |                       |                       | Verval 0,002333 m/m   |                       |                       |                       | Verval 0,002667 m/m   |                       |                       |                       | Verval 0,003 m/m      |                       |                       |                       |
|                        | Watergang<br>1m breed | Watergang<br>2m breed | Watergang<br>3m breed | Watergang<br>4m breed | Watergang<br>1m breed | Watergang<br>2m breed | Watergang<br>3m breed | Watergang<br>4m breed | Watergang<br>1m breed | Watergang<br>2m breed | Watergang<br>3m breed | Watergang<br>4m breed | Watergang<br>1m breed | Watergang<br>2m breed | Watergang<br>3m breed | Watergang<br>4m breed |
| Ruwheid 0,01 S/m^(1/3) | 1,274                 | 0,637                 | 0,505                 | 0,416                 | 1,251                 | 0,619                 | 0,487                 | 0,399                 | 1,281                 | 0,747                 | 0,556                 | 0,406                 | 1,264                 | 0,710                 | 0,524                 | 0,389                 |
| Ruwheid 0,02 S/m^(1/3) | 1,381                 | 0,811                 | 0,643                 | 0,527                 | 1,367                 | 0,781                 | 0,620                 | 0,507                 | 1,384                 | 0,863                 | 0,662                 | 0,513                 | 1,360                 | 0,835                 | 0,631                 | 0,493                 |
| Ruwheid 0,03 S/m^(1/3) | 1,471                 | 0,928                 | 0,734                 | 0,606                 | 1,443                 | 0,899                 | 0,713                 | 0,582                 | 1,450                 | 0,932                 | 0,754                 | 0,585                 | 1,427                 | 0,902                 | 0,728                 | 0,566                 |
| Ruwheid 0,04 S/m^(1/3) | 1,544                 | 1,011                 | 0,812                 | 0,670                 | 1,507                 | 0,982                 | 0,788                 | 0,647                 | 1,511                 | 1,019                 | 0,820                 | 0,644                 | 1,485                 | 0,988                 | 0,796                 | 0,622                 |
|                        | Discharge 1,0 m3/s    |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|                        | Verval 0,002 m/m      |                       |                       |                       | Verval 0,002333 m/m   |                       |                       |                       | Verval 0,002667 m/m   |                       |                       |                       | Verval 0,003 m/m      |                       |                       |                       |
|                        | Watergang<br>1m breed | Watergang<br>2m breed | Watergang<br>3m breed | Watergang<br>4m breed | Watergang<br>1m breed | Watergang<br>2m breed | Watergang<br>3m breed | Watergang<br>4m breed | Watergang<br>1m breed | Watergang<br>2m breed | Watergang<br>3m breed | Watergang<br>4m breed | Watergang<br>1m breed | Watergang<br>2m breed | Watergang<br>3m breed | Watergang<br>4m breed |
| Ruwheid 0,01 S/m^(1/3) | 1,344                 | 0,717                 | 0,576                 | 0,480                 | 1,337                 | 0,695                 | 0,557                 | 0,463                 | 1,351                 | 0,905                 | 0,671                 | 0,482                 | 1,345                 | 0,863                 | 0,638                 | 0,462                 |
| Ruwheid 0,02 S/m^(1/3) | 1,474                 | 0,905                 | 0,729                 | 0,607                 | 1,449                 | 0,877                 | 0,704                 | 0,585                 | 1,470                 | 0,969                 | 0,793                 | 0,602                 | 1,440                 | 0,943                 | 0,757                 | 0,578                 |
| Ruwheid 0,03 S/m^(1/3) | 1,571                 | 1,033                 | 0,835                 | 0,699                 | 1,542                 | 1,005                 | 0,811                 | 0,675                 | 1,547                 | 1,240                 | 0,838                 | 0,687                 | 1,522                 | 1,239                 | 0,809                 | 0,663                 |
| Ruwheid 0,04 S/m^(1/3) | 1,649                 | 1,134                 | 0,923                 | 0,771                 | 1,623                 | 1,097                 | 0,894                 | 0,744                 | 1,611                 | 1,493                 | 0,895                 | 0,757                 | 1,587                 | 1,458                 | 0,876                 | 0,730                 |