

2002

MOD 647

125



WATERBOUWKUNDIG
LABORATORIUM

FLANDERS HYDRAULICS

126ERING VAN DE BARBIERBEEK

DEEL 1: TEKST

M



Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap
Departement Leefmilieu en Infrastructuur
Administratie Waterwegen en Zeewezen
Afdeling Zeeschelde en Provincie Oost-Vlaanderen

38287

Model 647

MODELLERING VAN DE BARBIERBEEK

deel 1: TEKST

NOVEMBER 2002

INHOUDSOPGAVE

INHOUDSOPGAVE	i
LIJST VAN DE TABELLEN	iii
LIJST VAN DE FIGUREN	v
1 INLEIDING EN DOELSTELLINGEN	1
2 INVENTARISATIE, HYDROLOGISCHE MODELLERING EN STATISTISCHE FREQUENTIE-ANALYSE	3
2.1 Inventarisatie en controle van de gegevens	3
2.1.1 Algemene informatie	3
2.1.2 Bathymetrie en topografie	4
2.1.3 Hydrologische gegevens	6
2.1.4 Meteorologische gegevens	7
2.2 De opmaak van hydrologische modellen	7
2.2.1 Beschrijving van het hydrologisch model	7
2.2.2 Gebruikte methodologie	9
2.2.3 Voorbereiding van de invoergegevens	11
2.2.4 Kalibratie van het hydrologisch model opwaarts de spoorweg	13
2.2.5 Opmaak van hydrologische modellen voor de niet-bemeten hydrologische bekkens	21
2.3 Statistische frequentie-analyse	22
2.3.1 Gebruikte methodologie	24
2.3.2 Statistische frequentie-analyse in de verschillende hydrologische bekkens	25
2.3.3 Controle aan de hand van resultaten van vroegere studies	27
2.3.4 Opmaak van invoerhydrogrammen met verschillende terugkeerperiode voor scenarioberekeningen	30
2.4 Besluit	33
3 HYDRAULISCHE MODELLERING HUIDIGE TOESTAND	34
3.1 Modelbeschrijving	34
3.1.1 Situering van de Barbierbeek zoals ingebracht in het hydraulisch model	34
3.1.2 Gebruikte modelleringssoftware	34
3.1.3 Opbouw van het netwerkbestand	37
3.1.4 Dwarssecties	37
3.1.5 Kunstwerken	40
3.1.6 Randvoorwaarden voor het hydraulisch model	44
3.1.7 Keuze van de tijdstap en de HD parameters	45
3.2 Kalibratie van het hydraulisch model	46
3.3 Besluit	47

- 4 VALIDATIE EN VERFIJNING VAN HET GEKOPPELD HYDROLOGISCH –
HYDRAULISCH MODEL48
 - 4.1 Eerste validatie van het gekoppeld hydrologisch - hydraulisch model..... 48
 - 4.2 Verfijning van het gekoppeld hydrologisch - hydraulisch model49
 - 4.2.1 Verfijning hydraulisch model – versie mei 200249
 - 4.2.2 Verfijning hydrologisch model – versie mei 200253
 - 4.2.3 Resultaat verfijning54
 - 4.3 Besluit54
- 5 SCENARIO-ANALYSE.....55
 - 5.1 Scenario's55
 - 5.1.1 Inleiding.....55
 - 5.1.2 Randvoorwaarden55
 - 5.1.3 Ingrepen.....58
 - 5.1.4 Overzicht onderzochte combinaties64
 - 5.2 Bespreking resultaten.....66
 - 5.2.1 Normaal getij in de Schelde67
 - 5.2.2 Gevuld GOG n.a.v. een getij/maximale tijhoogte in Antwerpen met een
terugkeerperiode van 20 jaar.....69
 - 5.2.3 Gevuld GOG n.a.v. een getij/maximale tijhoogte in Antwerpen met een
terugkeerperiode van 100 jaar.....70
 - 5.2.4 Verplaatsen van het bergingsgebied van de Barbierbeek.....74
- 6 CONCLUSIES76

LIJST VAN DE TABELLEN

Tabel 1 : Waarden voor de Thiessencoëfficiënten voor de verschillende hydrologische bekkens [-].....	12
Tabel 2 : Beschikbare periodes voor de verschillende gegevensreeksen	13
Tabel 3 : Waarden voor de recessieconstante en v voor de verschillende deelstromen.	15
Tabel 4 : Onafhankelijkheidscriteria voor de POT-analyse op de debietmeetreeks in Temse	16
Tabel 5 : Bepaling van de gebeurtenissen voor basisafvoer door combinatie van verschillende POT-gebeurtenissen	16
Tabel 6 : Waarden voor de parameters U_{max} , L_{max} en TIF in het NAM model	18
Tabel 7 : Waarden voor de parameters CQOF, TOF en TG in het NAM model	18
Tabel 8 : Waarden voor alle parameters in het NAM model.....	19
Tabel 9 : Totale en gerioleerde oppervlakte van de verschillende hydrologische bekkens	21
Tabel 10 : Drempel, drempeldebiet en waarde voor γ in de verschillende hydrologische bekkens	26
Tabel 11 : Debieten [m^3/s] bij verschillende terugkeerperiodes in de verschillende hydrologische bekkens	27
Tabel 12 : Debieten [m^3/s] afwaarts in de Barbierbeek bij verschillende terugkeerperiodes Vergelijking studie IN – resultaten NAM modellen	28
Tabel 13 : Debieten [m^3/s] afwaarts in de Barbierbeek bij $T=1000$ jaar Vergelijking studie Ecorem – resultaten NAM modellen.....	29
Tabel 14 : Debieten [m^3/s] opwaarts in de Barbierbeek bij verschillende terugkeerperiodes - Vergelijking studie SWK – resultaten NAM model hydrologisch bekken 2.....	30
Tabel 15 : Neerslagsommen [mm] per jaar voor de periodes tussen 06/08 en 14/08 en 06/08 en 20/08, gebaseerd op de uurlijkse neerslaggegevens in Deurne	32
Tabel 16 : Hoogte-breedte tabel van de 2 stuwen in de Barbierbeek	40
Tabel 17 : Overzicht van de kunstwerken in het hydraulisch model.....	44
Tabel 18 : Beschikbare periodes voor de verschillende gegevensreeksen	44
Tabel 19 : Berekende combinaties van waarden voor de tijdstap Δt [s] en delta Δ [-]	45
Tabel 20 : Voorbeeld aanpassing van de h/A-relatie door toevoeging additional storage.....	51
Tabel 21 : Overzicht van de belangrijkste informatie over de link channels.....	53
Tabel 22 : Maximale terugkeerperiode (jaar) voor verschillende randvoorwaarden bij totale afhankelijkheid en totale onafhankelijkheid van stormtij en extreme neerslag	57
Tabel 23 : Overzicht situaties waarin de regelbare stuw in werking treedt.....	62
Tabel 24 : Detailregeling van de stuw op basis van gemeten debiet	62
Tabel 25 : Onderzochte waarden voor het stuw-waakpeil (m TAW)	62

Tabel 26 : Overzicht van de werkingsvoorwaarden voor het pompgemaal – versie 1.....63

Tabel 27 : Overzicht van de werkingsvoorwaarden voor het pompgemaal – versie 2.....64

Tabel 28 : Regeling van het pompdebiet i.f.v. het pomp-waakpeil – versie a64

Tabel 29 : Regeling van het pompdebiet i.f.v. het pomp-waakpeil – versie b64

LIJST VAN DE FIGUREN

Figuur 1	Het bekken van de Barbierbeek
Figuur 2	Overstroomde gebieden en (geplande) wachtbekkens
Figuur 3	(Geplande) rioleringsinfrastructuur
Figuur 4	Resultaten van twee onafhankelijke dwarssectiemetingen t.h.v. de Hollebeekhoeve
Figuur 5	Voorbeeld van een kunstwerk-fiche
Figuur 6	Opgemeten gebieden langs de Barbierbeek
Figuur 7	Overzicht van de hydrologische metingen
Figuur 8	Q-H verband ter hoogte van de Hollebeekhoeve en aan de spoorweg
Figuur 9	Vergelijking tussen de metingen ter hoogte van de Hollebeekhoeve en ter hoogte van de spoorweg
Figuur 10	Principeschets hydrologische en hydraulische modellen
Figuur 11	Reservoirs in het "NAM" model
Figuur 12	Hydrologische bekkens
Figuur 13	Thiessen - methode
Figuur 14	Voorbeeld van de schaling van de Thiessen - neerslag aan de uurlijkse neerslag in Deurne
Figuur 15	Vergelijking geregistreerde en gemiddelde PAN evaporatie
Figuur 16	Kalibratie- en validatieperiode Filterresultaten voor de basisafvoer
Figuur 17	Kalibratie- en validatieperiode Filterresultaten voor de hypodermische afvoer
Figuur 18	Kalibratie- en validatieperiode Filterresultaten voor de oppervlakkige afvoer
Figuur 19	Kalibratie- en validatieperiode Filterresultaten voor de drie deelstromen
Figuur 20	Resultaten van de POT - analyse voor de kalibratieperiode
Figuur 21	Scheiding van de hydrogramperiodes voor de basisafvoer
Figuur 22	Basisafvoer en totale afvoer Vorm van het gesimuleerde en het gemeten hydrogram
Figuur 23	Hydrometrische en oppervlakkige afvoer en hypodermische afvoer Vorm van het gesimuleerde en het gemeten hydrogram
Figuur 24	Oppervlakkige afvoer Vorm van het gesimuleerde en het gemeten hydrogram

- Figuur 25 Kalibratieperiode
Neerslagbijdrages tot de basisafvoer van de gemeten en gesimuleerde debietreeks
- Figuur 26 Kalibratieperiode
Neerslagbijdrages tot de hypodermische afvoer van de gemeten en gesimuleerde debietreeks
- Figuur 27 Kalibratieperiode
Neerslagbijdrages tot de oppervlakkige afvoer van de gemeten en gesimuleerde debietreeks
- Figuur 28 Kalibratieperiode
Gecumuleerde basisafvoer van de gemeten en gesimuleerde debietreeks
- Figuur 29 Kalibratieperiode
Gecumuleerde hypodermische afvoer van de gemeten en gesimuleerde debietreeks
- Figuur 30 Kalibratieperiode
Gecumuleerde oppervlakkige afvoer van de gemeten en gesimuleerde debietreeks
- Figuur 31 Kalibratieperiode
Gecumuleerde totale afvoer van de gemeten en gesimuleerde debietreeks
- Figuur 32 Kalibratieperiode
Vergelijking van de gemeten en gesimuleerde hydrogrammaxima
- Figuur 33 Kalibratieperiode
Vergelijking van de gemeten en gesimuleerde hydrogramminima
- Figuur 34 Kalibratie- en validatieperiode
Neerslagbijdrages tot de basisafvoer van de gemeten en gesimuleerde debietreeks
- Figuur 35 Kalibratie- en validatieperiode
Neerslagbijdrages tot de hypodermische afvoer van de gemeten en gesimuleerde debietreeks
- Figuur 36 Kalibratie- en validatieperiode
Neerslagbijdrages tot de oppervlakkige afvoer van de gemeten en gesimuleerde debietreeks
- Figuur 37 Kalibratie- en validatieperiode
Gecumuleerde basisafvoer van de gemeten en gesimuleerde debietreeks
- Figuur 38 Kalibratie- en validatieperiode
Gecumuleerde hypodermische afvoer van de gemeten en gesimuleerde debietreeks
- Figuur 39 Kalibratie- en validatieperiode
Gecumuleerde oppervlakkige afvoer van de gemeten en gesimuleerde debietreeks

Figuur 40	Kalibratie- en validatieperiode Gecumuleerde totale afvoer van de gemeten en gesimuleerde debietreeks
Figuur 41	Kalibratie- en validatieperiode Vergelijking van de gemeten en gesimuleerde hydrogrammaxima
Figuur 42	Kalibratie- en validatieperiode Vergelijking van de gemeten en gesimuleerde hydrogramminima
Figuur 43	Kalibratie- en validatieperiode Vergelijking van de gemeten en gesimuleerde hydrogramminima
Figuur 44	Vorm van een hydrogram afhankelijk van de aard van de neerslag
Figuur 45	Hydrologisch bekken opwaarts Temse Pareto QQ - plot
Figuur 46	Hydrologisch bekken opwaarts Temse Exponentiële QQ - plot
Figuur 47	Hydrologisch bekken opwaarts Temse Weibull QQ - plot
Figuur 48	Hydrologisch bekken opwaarts Temse UH - plot
Figuur 49	Hydrologisch bekken opwaarts Temse Pareto MSE - plot
Figuur 50	Geregistreerde neerslag in Deurne in augustus en september 1998
Figuur 51	Hydrologisch bekken opwaarts Temse Geschaalde debietreeks volgens verhouding van piekdebieten voor verschillende terugkeerperiodes
Figuur 52	Het bekken van de Barbierbeek
Figuur 53	Markers in een dwarssectie in het "Mike 11" model
Figuur 54-1	Kunstwerken die niet in het model werden ingebracht Beeldstraat, Temse - Haasdonkersteenweg, Temse
Figuur 54-2	Kunstwerken die niet in het model werden ingebracht Bergstraat, Kruibeke
Figuur 54-3	Kunstwerken die niet in het model werden ingebracht Kerkstraat, Kruibeke
Figuur 54-4	Kunstwerken die niet in het model werden ingebracht Hollebeekhoeve, Kruibeke
Figuur 54-5	Kunstwerken die niet in het model werden ingebracht Hollebeekhoeve en Barbierstraat, Kruibeke
Figuur 54-6	Kunstwerken in het hydraulisch model
Figuur 55	Overzicht van de hydraulische metingen
Figuur 56	Waterhoogtes Hollebeekhoeve
Figuur 57	Waterhoogtes Temse

- Figuur 58 Overstromingskaart situatie september 1998
Eerste evaluatie van het gekoppeld model
- Figuur 59 Vergelijking opgemaakte overstromingskaarten
(Envico 2001 en GfG 2001 vs. resultaten numeriek model)
- Figuur 60 Principe van overschatting berekende waterhoogtes en overstromingen
- Figuur 61 Ligging van de ingebrachte overstroombare gebieden in het hydraulisch model
- Figuur 62 Overstromingskaart situatie september 1998 na verfijning modellen
- Figuur 63 Overstromingskaart na verfijning modellen: detail thv de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat
Situatie september 1998
- Figuur 64 Overstromingskaart na verfijning modellen: detail thv de Hollebeekhoeve en monding Kleine Pismolenbeek
Situatie september 1998
- Figuur 65 Schematisch overzicht van alle bestudeerde ingrepen
- Figuur 66 Situering bergingsgebied stroomopwaarts ringdijk op basis van de berekende maximale waterstanden
- Figuur 67 Zicht op de boogvormige duikers waar de Barbierbeek onder de Oude Kruibekestraat en de gewestweg N419 stroomt
- Figuur 68 Vergelijking secties duikers met dwarssecties Barbierbeek
- Figuur 69 Locatie van regelbare stuw en extra bedijking
- Figuur 70 Invloed van ingrepen afwaarts op de maximale waterstanden langs de Barbierbeek
- Figuur 71 Huizen langs de Barbierbeek ter hoogte van de gewestweg
- Figuur 72 Invloed van het afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG op de maximale afwaartse waterstanden langs de Barbierbeek (opwaarts debiet 1/25 jaar; normaal getij)
- Figuur 73 Invloed van het verwijderen van de duikers t.h.v. de gewestweg in combinatie met het afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG op de maximale afwaartse waterstanden langs de Barbierbeek (opwaarts debiet 1/25 jaar; normaal getij)
- Figuur 74 Overstromingskaart te Bazel bij het verwijderen van de duikers t.h.v. de gewestweg in combinatie met het afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG (opwaarts debiet 1/25 jaar; normaal getij)
- Figuur 75 Invloed van het verwijderen van de duikers t.h.v. de gewestweg in combinatie met het afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG op de maximale afwaartse waterstanden langs de Barbierbeek (opwaarts debiet 1/50 jaar; normaal getij)
- Figuur 76 Overstromingskaart te Bazel bij het verwijderen van de duikers t.h.v. de gewestweg in combinatie met het afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG (opwaarts debiet 1/50 jaar; normaal getij)

- Figuur 77 Invloed van het verwijderen van de duikers t.h.v. de gewestweg in combinatie met het afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG op de maximale afwaartse waterstanden langs de Barbierbeek (opwaarts debiet 1/25 jaar; getij in Antwerpen 1/20 jaar)
- Figuur 78 Invloed van het voorzien van een bergingsgebied opwaarts van de ringdijk in combinatie met het verwijderen van de duikers t.h.v. de gewestweg, en het afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG op de maximale afwaartse waterstanden langs de Barbierbeek (opwaarts debiet 1/25 jaar; getij in Antwerpen 1/20 jaar)
- Figuur 79 Overstromingskaart te Bazel bij het voorzien van een bergingsgebied opwaarts de ringdijk in combinatie met het verwijderen van de duikers t.h.v. de gewestweg, en het afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG (opwaarts debiet 1/25 jaar; getij in Antwerpen 1/20 jaar) – detail t.h.v. Oude Kruibekestraat en Barbierstraat
79a: geen ophoging van de Oude Kruibekestraat
79b: plaatselijke ophoging van de Oude Kruibekestraat
- Figuur 80 Overstromingskaart te Bazel bij het voorzien van een bergingsgebied opwaarts de ringdijk in combinatie met het verwijderen van de duikers t.h.v. de gewestweg, en het afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG (opwaarts debiet 1/25 jaar; getij in Antwerpen 1/20 jaar) – detail t.h.v. Kemphoekstraat
80a: dijk aan de rechteroever op huidige hoogte
80b: verhoging van de dijk aan de rechteroever
- Figuur 81 Invloed van het voorzien van een bergingsgebied opwaarts van de ringdijk in combinatie met het verwijderen van de duikers t.h.v. de gewestweg, en het afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG op de maximale afwaartse waterstanden langs de Barbierbeek (opwaarts debiet 1/25 jaar; getij in Antwerpen 1/100 jaar)
- Figuur 82 Invloed van het vergroten van het bergingsgebied opwaarts van de ringdijk in combinatie met het verwijderen van de duikers t.h.v. de gewestweg, en het afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG op de maximale afwaartse waterstanden langs de Barbierbeek (opwaarts debiet 1/25 jaar; getij in Antwerpen 1/100 jaar)
- Figuur 83 Mogelijke ligging van de beschermingsdijk rond de Hollebeekhoeve
- Figuur 84 Invloed van het opstuwen van water opwaarts de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat in combinatie met het verwijderen van de duikers t.h.v. de gewestweg, het afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG, en het vergroten van het bergingsgebied opwaarts van de ringdijk op de maximale afwaartse waterstanden langs de Barbierbeek (opwaarts debiet 1/25 jaar; getij in Antwerpen 1/100 jaar)

Figuur 85 Overstromingskaart te Bazel bij het opstuwen van water opwaarts de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat in combinatie met het afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG, het verwijderen van de duikers t.h.v. de gewestweg, en het vergroten van het bergingsgebied opwaarts de ringdijk (opwaarts debiet 1/25 jaar; getij in Antwerpen 1/100 jaar) – detail t.h.v. Barbierstraat en Oude Kruibekestraat

85a: geen ophoging van de Oude Kruibekestraat

85b: plaatselijke ophoging van de Oude Kruibekestraat

Figuur 86 Overstromingskaart te Bazel bij het opstuwen van water opwaarts de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat in combinatie met het afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG, het verwijderen van de duikers t.h.v. de gewestweg, en het vergroten van het bergingsgebied opwaarts de ringdijk (opwaarts debiet 1/25 jaar; getij in Antwerpen 1/100 jaar) – detail t.h.v. Kemphoekstraat

87a: dijk aan de rechteroever op huidige hoogte

87b: verhoging van de dijk aan de rechteroever

Figuur 87 Invloed van het pompen van water uit de Barbierbeek naar het GOG in combinatie met het verwijderen van de duikers t.h.v. de gewestweg, het afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG, het voorzien van een bergingsgebied opwaarts van de ringdijk, en het opstuwen van water opwaarts de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat op de maximale afwaartse waterstanden langs de Barbierbeek (opwaarts debiet 1/25 jaar; getij in Antwerpen 1/100 jaar)

Figuur 88 Overstromingskaart bij het pompen van water uit de Barbierbeek naar het GOG in combinatie met het verwijderen van de duikers t.h.v. de gewestweg, het afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG, het voorzien van een bergingsgebied opwaarts van de ringdijk, en het opstuwen van water opwaarts de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat (opwaarts debiet 1/25 jaar; getij in Antwerpen 1/100 jaar) – Detail t.h.v. Oude Kruibekestraat en Barbierstraat

88a: geen ophoging van de Oude Kruibekestraat

88b: plaatselijke ophoging van de Oude Kruibekestraat

Figuur 89 Overstromingskaart bij het pompen van water uit de Barbierbeek naar het GOG in combinatie met het verwijderen van de duikers t.h.v. de gewestweg, het afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG, het voorzien van een bergingsgebied opwaarts van de ringdijk, en het opstuwen van water opwaarts de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat (opwaarts debiet 1/25 jaar; getij in Antwerpen 1/100 jaar) – Detail t.h.v. Kemphoekstraat

89a: dijk aan de rechteroever op huidige hoogte

89b: verhoging van de dijk aan de rechteroever

1 INLEIDING EN DOELSTELLINGEN

Bij het plannen van de aanleg van het gecontroleerd overstromingsgebied Kruibeke – Bazel – Rupelmonde (GOG KBR) door de Afdeling Zeeschelde, rijst de vraag naar de mogelijkheden voor afwatering van de Barbierbeek, indien het GOG naar aanleiding van een stormtij op de Schelde in gebruik is.

Daarnaast laat de provincie Oost – Vlaanderen, de beheerder van de Barbierbeek, een 'integraal waterbeheerstudie voor het bekken van de Barbierbeek' uitvoeren door Envico. Het gedeelte 'waterkwantiteit' is hierin als een apart onderdeel opgevat en omvat de opmeting van het beekstelsel, gevolgd door een waterkwantiteitsmodellering (hydrologische en hydraulische numerieke modellering). In dit luik moet de mogelijkheid onderzocht worden voor het bufferen van het water van de Barbierbeek langs de rivier bij hoge afvoer gecombineerd met stormtij op de Schelde.

Om op beide vragen in te spelen wordt door de afdeling Waterbouwkundig Laboratorium en Hydrologisch Onderzoek (WLH) een studie uitgevoerd met volgende doelstellingen:

- I. er wordt een numeriek model opgesteld van de Barbierbeek (en de belangrijkste zijbeken). De Barbierbeek wordt gemodelleerd met een eendimensionaal hydraulisch model tussen de spoorweg Sint-Niklaas – Puurs en de monding in de Schelde. Voor het genereren van de opwaartse randvoorwaarden van dit model (debieten in de Barbierbeek ter hoogte van de spoorlijn en in de zijbeken) worden hydrologische modellen opgemaakt;
- II. er worden verschillende mogelijkheden onderzocht om, bij combinatie van hoge afvoer in de Barbierbeek en van stormtij op de Schelde, water te bergen in de vallei van de Barbierbeek. Hierbij worden ook situaties onderzocht waarbij het GOG naar aanleiding van een stormtij op de Schelde in gebruik is.

Het project wordt uitgevoerd in een aantal fasen, zijnde:

fase 1. Inventarisatie en controle van de gegevens

fase 2. Opmaak hydrologische modellen en statistische frequentieanalyse

fase 3. Opmaak hydraulisch model bestaande toestand

fase 4. Doorrekenen van een aantal alternatieve scenario's

Bij de uitvoering van het project wordt zoveel mogelijk gebruik gemaakt van de werkwijze voorgesteld in de 'algemene methodologie voor het modelleren van de waterafvoer in bevaarbare waterlopen in Vlaanderen'⁽¹⁾. In dit rapport, opgesteld door de KU Leuven in

opdracht van WLH, staat een methode beschreven voor het modelleren van waterlopen, die gebaseerd is op een uitgebreide modelleringervaring en op de laatste wetenschappelijke inzichten. Waar het volgen van deze methodologie niet mogelijk blijkt (door de kleinere schaal van de Barbierbeek ten opzichte van de bevaarbare waterlopen, of door de korte beschikbare meetreeksen), worden de beschikbare gegevens zo optimaal mogelijk aangewend in de modellering. Hierbij wordt de gekozen werkwijze geargumenteed, en wordt ook de eventuele beperking van deze werkwijze vermeld.

Het verslag van dit project wordt weergegeven in zes hoofdstukken. De resultaten van fase 1 en fase 2 zijn terug te vinden in hoofdstuk 2, terwijl fase 3 besproken wordt in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 worden de hydrologische en hydraulische modellen getoetst aan historische gebeurtenissen en waar nodig verfijnd.

De uitvoering en de resultaten van fase 4 van de studieopdracht, namelijk het doorrekenen van een aantal alternatieve scenario's worden besproken in hoofdstuk 5.

Hoofdstuk 6 bevat tenslotte de conclusies.

2 INVENTARISATIE, HYDROLOGISCHE MODELLERING EN STATISTISCHE FREQUENTIE-ANALYSE

2.1 Inventarisatie en controle van de gegevens

De inventarisatie van de beschikbare gegevens gebeurde door verschillende partijen. In de opdracht 'integraal waterbeheerstudie voor het bekken van de Barbierbeek', die door het bureau Envico in opdracht van de Provincie Oost-Vlaanderen uitgevoerd wordt, werd in de inventarisatiefase het aspect hydrografie behandeld⁽ⁱⁱ⁾. Een aantal algemene gegevens over het bekken van de Barbierbeek werd uit deze studie overgenomen. Op deze gegevens werd geen extra kwaliteitscontrole uitgevoerd.

Bijkomende gegevens werden in functie van de hier beschreven waterkwantiteitstudie verzameld. Deze gegevens werden telkens gecontroleerd op volledigheid en de juistheid werd waar mogelijk getoetst. In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste gegevens die in functie van de opmaak van de modellen verzameld en gecontroleerd werden.

2.1.1 Algemene informatie

De Barbierbeek is een waterloop van 2^{de} categorie die behoort tot het stroomgebied van de Schelde. De waterloop, met een lengte van 20.7 km, heeft een bekken van 3731 ha. De oorsprong van de Barbierbeek bevindt zich in Sint-Niklaas ter hoogte van het klaverblad van de E17. Iets verder, net opwaarts van de spoorlijn Sint-Niklaas – Puurs, mondt de Pachtgoedbeek erin uit. Andere waterlopen van 2^{de} categorie die in Barbierbeek uitmonden zijn de Burchtse Beek (ter hoogte van de E17 te Haasdonk) en de Kleine Pismolenbeek (te Kruibeke). In het afwaartse deel (Bazel) stroomt de Barbierbeek door de polder, waar een gecontroleerd overstromingsgebied voor de Schelde (GOG) gepland is. Aan de Scheldedijk bevindt zich een uitlaatconstructie met een terugslagklep, die bij laagwater de afwatering van de Barbierbeek in de Schelde mogelijk maakt.

In figuur 1 wordt de ligging van een deel van de Schelde, de Barbierbeek en de zijrivieren van 2^{de} en 3^{de} categorie getoond. De ligging van de assen van deze waterlopen is overgenomen uit de Vlaamse Hydrografische Atlas.

De afbakening van het bekken van de Barbierbeek en de deelbekkens gebeurde in de inventarisatiefase van de opdracht 'integraal waterbeheerstudie voor het bekken van de Barbierbeek'⁽ⁱⁱ⁾. Hiervoor werd de Vlaamse Hydrografische Atlas als basis gebruikt. Deze afbakening werd verder aangepast aan de lokale situatie op basis van de hoogteligging (NGI hoogtebestand) en het bestaand afwateringssysteem (inventarisatie van de grach-

ten in het bekken). De uiteindelijke afbakening van 24 deelbekkens is aangegeven op figuur 1. Deze afbakening werd gebruikt voor de hydrologische modellering.

Gegevens over historische overstromingen werden door Envico verzameld aan de hand van informatie van de verschillende gemeentes. Deze gegevens werden getoetst aan de kaarten met recent overstroomde gebieden (ROG) die door GfG in opdracht van AMINAL Afdeling Water werden opgemaakt. In beide inventarisaties werden de belangrijkste overstromingen langs de Barbierbeek opgenomen, maar de uitgestrektheid ervan verschilt. In het gebied van het toekomstig overstromingsgebied van de Schelde (GOG) is er een groot verschil tussen beide kaarten. Dit komt omdat in de ROG-kaart de overstromingen die door de Barbierbeek veroorzaakt werden afzonderlijk beschouwd werden. In de inventarisatie van Envico werd geen onderscheid gemaakt tussen overstromingen veroorzaakt door water van de Barbierbeek en van de Schelde. Voor de interpretatie van de resultaten van het hydraulisch model werd gebruik gemaakt van beide inventarisaties. In figuur 2 wordt een kaart getoond met de resultaten van beide inventarisaties.

In Sint-Niklaas, net afwaarts van de monding van de Pachtgoedbeek in de Barbierbeek, is een wachtbekken geïnstalleerd dat een volume kan bergen van ongeveer 20.000 m³. Dit dient om het nabijgelegen industriegebied van overstromingen te vrijwaren. Een tweede wachtbekken met een volume van ongeveer 22.250 m³ is gepland in één van de open ruimtes van het klaverblad van de E17 in Sint-Niklaas. De ligging van beide wachtbekkens is aangeduid op figuur 2.

Envico maakte aan de hand van topografische kaarten, urbane zones op de Biologische Waarderingskaart (BWK) en gegevens over gerioleerde of te rioleren strengen, een kaart op met (toekomstige) gerioleerde zones. In het bekken van de Barbierbeek zijn 3 collectoren aanwezig of gepland. Er zijn 3 (voorziene) overstorten in het studiegebied, waarvan er 2 rechtstreeks lozen op de Barbierbeek. Een overzicht van de (geplande) rioleeringsinfrastructuur wordt gegeven in figuur 3.

2.1.2 Bathymetrie en topografie

In opdracht van de provincie Oost-Vlaanderen werd de Barbierbeek opgemeten door BnS Engineering tussen de spoorlijn Sint-Niklaas – Puurs en de geplande dijk van het GOG. Er werd gemiddeld om de 50 m een dwarsprofiel gemeten. De oevers werden opgemeten tot 20 m van de dijk aan elke kant van de beek. Ter plaatse van de Hollebeekhoeve werd een controlemeting uitgevoerd door een onafhankelijk meetbureau (Geo.XYZ bvba). De resultaten van beide opmetingen stemmen goed overeen (figuur 4).

Ook de kunstwerken in de Barbierbeek werden door BnS Engineering opgemeten en in fiches verwerkt. Een voorbeeld van een kunstwerk-fiche is te zien in figuur 5.

Om de bestaande toestand op een goede manier te kunnen modelleren, was ook kennis van de bathymetrie van de Barbierbeek in het geplande GOG nodig. Deze (X,Y,Z)-gegevens werden opgemeten door de afdeling Zeeschelde. De opmetingen leveren o.a. volgende lijnen op:

- het verloop van de thalweg van de Barbierbeek;
- het verloop van de laagste punten van zowel linker- als rechteroever van de Barbierbeek;
- het verloop van de hoogste punten van zowel linker- als rechteroever van de Barbierbeek;
- het verloop van de laagste punten van zowel linker- als rechterdijk langs de Barbierbeek;
- het verloop van de hoogste punten van zowel linker- als rechterdijk langs de Barbierbeek;

Enkel ter hoogte van de Kruibeekse Kreek ontbraken de lijnen voor de thalweg en de laagste oeverpunten. Op deze plaats werd het verloop van de lijnen geïnterpoleerd tussen de bestaande lijnen stroomopwaarts en stroomafwaarts.

Dwarssecties werden bepaald met een onderlinge afstand van gemiddeld 40 m. Elke dwarssectie is genomen van de kruin van de dijk aan de linkeroever van de Barbierbeek tot de kruin van de dijk aan de rechteroever. Beide dijkkruinen hebben een hoogte van ongeveer 4 m TAW.

De dwarssecties werden manueel afgeleid uit de (X,Y,Z)-gegevens. Hierbij werd als volgt te werk gegaan:

- De (X,Y,Z)-gegevens werden geprojecteerd op een vlak dat op $Z = 0$ m TAW ligt, door van alle punten de Z-waarde op 0 te stellen. In dit vlak worden ook de gewenste dwarssecties getekend. De snijpunten van de dwarssectiepunten met de opgemeten lijnen leveren de (X,Y)-ligging van de dwarssectiepunten;
- Op deze snijpunten worden fictieve verticalen geconstrueerd;
- Via 3D-zicht in Autocad worden de snijpunten van deze verticalen met de originele lijnen bepaald. Deze snijpunten leveren de Z-coördinaten van de dwarssectiepunten.

Bij scenarioberekeningen was het nodig om de overstroombare gebieden op een goede manier in het model in te brengen. Hiervoor is een ruimere kennis van de topografie in de vallei nodig. De enige beschikbare data hiervoor was het digitaal terreinmodel van het NGI (Nationaal Geografisch Instituut), dat vervaardigd werd door scanning, vectorisatie en identificatie van de hoogtelijnen op de kaart 1:50 000. Dit DTM heeft in hoogte een nauwkeurigheid van 3.8 m in Laag-België, en dit met een betrouwbaarheid van 90%. (bron: www.ngi.be/NL/NL1-5-5.asp). Daarom werd een meer nauwkeurige meetcampagne van delen van de Barbierbeekvallei uitgevoerd door BnS in opdracht van de Provincie Oost-Vlaanderen. De punten werden opgemeten met een dichtheid van 1 punt per 16 m². De afbakening van deze opgemeten gebieden gebeurde op basis van een terreinbe-

zoek, gegevens over historische overstromingen en gegevens over de hoogteligging in het gebied (NGI digitaal terreinmodel).

In figuur 6 wordt een overzicht gegeven van de locaties waar de verschillende metingen werden uitgevoerd.

2.1.3 Hydrologische gegevens

Er zijn weinig hydrologische gegevens beschikbaar in de Barbierbeekvallei (figuur 7). In Bazel werden in 1997 de eerste waterstandmetingen uitgevoerd. De gegevens van 1997 tot eind 1998 zijn echter van twijfelachtige kwaliteit. In december 1998 werd het meettoestel verplaatst naar de huidige locatie nabij de Hollebeekhoeve. Vanaf dit ogenblik zijn betrouwbare registraties beschikbaar. Op basis van debietmetingen is er een Q-h relatie opgesteld, zodat ook debieten beschikbaar zijn (figuur 8). In deze meetreeks zitten periodes (o.a. rond 28/02/01) waarin de gegevens later aangevuld werden. Dit komt doordat de vlotter van de limnigraaf door de lage waterstanden drooggevalen was. Er waren dus geen metingen beschikbaar. De meetreeks werd daarom aangevuld door correlatie met naburige meetposten in bekkens met gelijkaardige eigenschappen (vb. De Kleine Molbeek te Liezele).

In november 2000 werd opwaarts in de Barbierbeek (Temse, afwaarts van de spoorlijn Sint-Niklaas – Puurs) een Starflow debietmeter geïnstalleerd. Sinds 5 december 2000 zijn hier debietmetingen beschikbaar. In de winter van 2001 werd regelmatig een handmatige meting uitgevoerd ter controle van de Starflow debietmeter. De resultaten van deze controle zijn vrij bevredigend. Een overzicht van de controlepunten en van het Q-h verband dat uit de metingen kon gehaald worden wordt gegeven in figuur 8.

De debieten die in de twee meetposten geregistreerd werden, werden ook onderling vergeleken. Hieruit blijkt dat het verloop van de twee reeksen gelijkaardig is. Periodes met hoge waarden ter hoogte van de ene meetpost, tonen voor dezelfde periode ook hoge waarden in de tweede post. Het gemiddelde debiet te Bazel is voor de periode december 2000 tot april 2001 zo'n 4 keer groter dan het debiet te Temse. Dit komt overeen met de verhouding in de afstromende oppervlakte die opwaarts van de meetposten liggen. Figuur 9 geeft een aantal vergelijkende grafieken voor de twee meetposten.

In de Schelde worden door de afdeling Maritieme Toegang van AWZ waterstandmetingen uitgevoerd. De dichtstbijzijnde meetposten bij de monding van de Barbierbeek bevinden zich in Hemiksem en in Schelle. Doordat de tijpost in Schelle gegevens van mindere kwaliteit levert, werden de gegevens van Hemiksem voor de modellering gebruikt.

Hier zijn reeds meetgegevens van tientallen jaren beschikbaar in analoge vorm (op papierrollen). De tijdstippen van hoogwater en laagwater en bijhorende waterhoogtes werden door de afdeling Maritieme Toegang gedigitaliseerd. Tussen deze punten werd een curve met sinusoidaal verloop geïnterpoleerd.

Door WLH werd een model opgemaakt van de Schelde⁽ⁱⁱⁱ⁾, waarmee de effecten van het GOG KBR op de waterstanden in de Schelde en in het GOG berekend kunnen worden.

Voor de berekening van mogelijke scenario's, waarbij het GOG in werking is, werden de resultaten van dit model als afwaartse randvoorwaarden opgelegd (zie hoofdstuk 5).

2.1.4 Meteorologische gegevens

Door het KMI werden neerslaggegevens geleverd van volgende stations:

Sint-Niklaas Waas	dagelijks	01/12/1998 tot 30/09/2001
Valk (Beveren)	dagelijks	01/12/1998 tot 30/09/2001
Bornem	dagelijks	01/12/1998 tot 30/09/2001
Wintam	dagelijks	01/12/1998 tot 30/09/2001
Deurne	uurlijks	01/01/1976 tot 31/03/2001

Daarnaast werden ook gegevens van potentiële evaporatie te Ukkel voor de periode 1998-1999 bekomen.

In figuur 7 is de ligging van deze meetposten aangeduid. Op al deze gegevens werd door het KMI een kwaliteitscontrole uitgevoerd.

2.2 De opmaak van hydrologische modellen

Hydrologische modellen beschrijven het verband tussen de gevallen neerslag in het afwateringsgebied en de afvoer in de rivier. De resultaten van deze hydrologische modellen kunnen dienen als opwaartse randvoorwaarden voor het eendimensionaal hydraulisch model, dat de stroming van het water in de rivier en eventueel buiten de oevers beschrijft. Figuur 10 geeft een principeschets met het verschil tussen hydrologische en hydraulische modellen.

2.2.1 Beschrijving van het hydrologisch model

De opmaak van de hydrologische modellen van het opwaartse deel van de Barbierbeek en van de zijrivieren is gebeurd met het softwarepakket NAM (DHI). Het NAM model is een conceptueel, gebiedsgemiddeld, continu model. Hiermee wordt bedoeld:

Conceptueel: het model is gebaseerd op een vereenvoudigd concept voor de beschrijving van het neerslag – afvoer proces. Conceptuele modellen trachten de functionele relaties tussen invoer en uitvoer te beschrijven aan de hand van semi-empirische vergelijkingen. De fysische betekenis van het neerslag – afvoer proces is echter onvoldoende beschreven opdat de parameters uit directe metingen kunnen worden afgeleid. De waarden van de parameters moet volgen uit kalibratie (ijking).

Gebiedsgemiddeld: in een model gelden dezelfde parameterwaarden voor het hele bekken. Deze waarden kunnen dan worden geïnterpreteerd als gemiddelde waarden voor dat bekken.

Continu: het model genereert continu tijdsreeksen van afvoer op basis van continue tijdsreeksen van neerslag, potentiële evaporatie en eventueel van temperatuur.

Het model is opgebouwd uit vier onderling verbonden bergingen (of reservoirs) die fysische elementen van het stroombekken voorstellen. Tijdens de berekening wordt continu de vochttoestand in de verschillende bergingen bijgehouden. Deze reservoirs zijn voorgesteld in figuur 11.

1. het sneeuwreservoir

Hierin wordt de regen tijdelijk opgeslagen als de temperatuur onder het vriespunt daalt. Als de temperatuur terug stijgt zal de sneeuw smelten en in het oppervlaktereservoir terechtkomen. Omdat sneeuwval in Vlaanderen niet vaak voorkomt, en meestal niet de grote oorzaak van problemen met wateroverlast is, werd in de op te maken modellen de temperatuur steeds op een constante waarde (>0) ingesteld.

2. het oppervlaktereservoir

Hierin komt de neerslag terecht als de temperatuur boven het vriespunt gelegen is. Wanneer dit reservoir vol is, zal alle bijkomende neerslag gedeeltelijk in de grond dringen (naar de onverzadigde zone en het grondwater) en gedeeltelijk rechtstreeks naar de rivier stromen (oppervlakkige afstroming). Hoeveel water afstroomt en rechtstreeks in de grond dringt, wordt bepaald door in te stellen parameters. Daarnaast kan het reservoir zijn vochtinhoud verliezen via (potentiële) evapotranspiratie en via de hypodermische stroming. Dit is de stroming in het bovenste gedeelte van de onverzadigde zone.

3. de onverzadigde zone

dit reservoir wordt gevoed door infiltratie. Ook kan het water vanuit het grondwaterreservoir in de onverzadigde zone terecht komen door capillaire opstijging. Dit gebeurt van zodra het oppervlaktereservoir leeg is. De snelheid waarmee dit gebeurt is meestal kleiner dan de potentiële evapotranspiratie en hangt af van de verzadigingsgraad van de grond.

4. het grondwaterreservoir

Een gedeelte van het water dat in de ondergrond dringt komt in het grondwaterreservoir terecht. Het kan daaruit verdwijnen door capillaire opstijging en door de grondwaterstroming naar de rivier. Ook is het in het model mogelijk grondwater op te pompen.

De oppervlakkige afstroming en de hypodermische stroming worden samen gestuurd door twee lineaire reservoirs in serie, terwijl de grondwaterstroming door een lineair reservoir wordt gestuurd.

2.2.2 Gebruikte methodologie

Er zijn hydrologische modellen opgemaakt voor de Barbierbeek (opwaarts de spoorlijn tussen Sint-Niklaas en Puurs), voor de 2^{de} categorie zijbeken (Burchtse Beek en Kleine Pismolenbeek) en voor de rest van de vallei die afstroomt naar de Barbierbeek.

Op figuur 12 is aangegeven waar de verschillende hydrologische bekkens gelegen zijn. De afbakening van het hydrologisch bekken opwaarts van de spoorlijn tussen Sint-Niklaas en Puurs is manueel gebeurd. Vanuit het punt waar de limnigraaf ligt, werden de grenzen getekend loodrecht op de hoogtelijnen van het NGI digitaal hoogtebestand. De afbakening van de hydrologische bekkens van de Burchtse Beek en de Kleine Pismolenbeek werd overgenomen uit de inventarisatie van Envico⁽ⁱⁱ⁾. De rest van de vallei werd opgedeeld in 4 grote delen. De resultaten van de hydrologische modellen van het gebied opwaarts de spoorweg, de Burchtse Beek en de Kleine Pismolenbeek werden als een puntinvoer (op één plaats) in het hydraulisch model ingegeven. De resultaten van de 4 andere hydrologische bekkens werden verspreid als zijdelingse instroming langs de lengte van de waterloop ingegeven (een punt om de 500 m).

Aangezien de rioleringsinfrastructuur in het bekken van de Barbierbeek (collectoren en overstorten) vooral in de toekomst geïnstalleerd zal worden, werd er voor de huidige toestand van de hydrologische modellen (kalibratiefase) geen rekening mee gehouden, en werd de afstroming van het volledige hydrologische bekken globaal met het hydrologisch model berekend. Voor de berekening van toekomstige situaties werden de gerioleerde zones wel in rekening gebracht. In het model werd de neerslag, die op deze zones valt, onmiddellijk ingebracht in de rivier ter plaatse van de geplande overstorten.

Het op te maken model opwaarts van de spoorweg kon gekalibreerd worden aan de meetgegevens van de Starflow-debietmeter in Temse (afwaarts van de spoorlijn Sint-Niklaas – Puurs, zie figuur 7). De debietmeter in Temse registreert metingen sinds 5 december 2000. Op het moment van de aanvang van de studie was er dus maar een zeer beperkte tijdreeks van debieten (3 maanden) beschikbaar in Temse. Daarom was het voor de Barbierbeek moeilijk om volledig de methode voor het opstellen en calibreren van een hydrologisch model te volgen die in de 'algemene methodologie voor het modelleren van de waterafvoer in bevaarbare waterlopen in Vlaanderen'⁽ⁱ⁾ wordt voorgesteld. Met de zeer korte periode van gegevens om het model te ijken, was het niet mogelijk om een model op te maken dat voor alle periodes en omstandigheden geschikt is. Tijdens de beschikbare periode hebben zich immers maar een beperkt aantal "extreme" gebeurtenissen voorgedaan in de rivier. Op basis van deze beperkte tijdreeks kunnen ook geen extrapolaties naar hoge terugkeerperiodes gedaan worden, die nodig zijn om het effect van maatregelen te kunnen begroten.

Om de beschikbare gegevens zo goed mogelijk aan te wenden, is voor de kalibratie van het hydrologische model van de Barbierbeek opwaarts de spoorweg als volgt te werk gegaan.

De kalibratie van het model gebeurde zoveel mogelijk fysisch gebaseerd. Hiervoor is, zoals beschreven in de 'algemene methodologie voor het modelleren van de waterafvoer in bevaarbare waterlopen in Vlaanderen'⁽ⁱ⁾, de debietmeetreeks opgesplitst in drie deelstromen: de oppervlakkige afstroming, de stroming in de onverzadigde zone en de grondwaterstroming. Deze filtering wordt beschreven in 2.2.4.1. Door deze opsplitsing is het mogelijk de resultaten van de verschillende deelreservoirs in het NAM-model (zie figuur 11) afzonderlijk te vergelijken aan de meetreeksen, en zo de parameters voor de verschillende reservoirs te ijken.

Voor de neerslaginvoer van het NAM-model werden gegevens aangevraagd bij het KMI van de pluviometers (dagwaarden) van Sint-Niklaas en Beveren (Valk). Uit deze dagwaarden werden uurlijkse gegevens gegenereerd door de tijdreeks de vorm te geven van de urengegevens van Deurne voor dezelfde periode. Input voor evapotranspiratie waren gegevens van Ukkel.

In eerste instantie werd er bij de kalibratie voor gezorgd dat de vorm van het gesimuleerde hydrogram overeenstemde met de werkelijkheid. Deze vorm werd per deelstroom bepaald door de snelheid waarmee het water kan afstromen. Op die manier werd in het model de 'recessieconstante' of tijdsconstante van een deelstroom bepaald (zie 2.2.4.3).

Nadien werd veel aandacht besteed aan de juistheid van de gesimuleerde volumes. Hiervoor werd per deelstroom nagegaan of de gesimuleerde neerslaginput die de deelstroom veroorzaakt, ook overeenstemde met de werkelijke neerslaginvoer voor die deelstroom. Waar nodig werden enkele parameters van het model aangepast (zie 2.2.4.4).

Tot slot werd nagegaan of de gesimuleerde minimale en maximale debieten overeenstemden met de werkelijke, en werd het model in functie hiervan nog lichtjes bijgestuurd.

Bij de kalibratie werd dus in eerste instantie meer belang gehecht aan de juistheid van de volumes dan aan de juistheid van de hoogte van de pieken. Dit komt omdat vooral de te bergen volumes een grote rol zullen spelen bij situaties met wateroverlast. Indien de maximum bergingscapaciteit van het bekken opgebruikt is, kan een lagere piek aanleiding geven tot grotere problemen dan een hogere piek in een situatie waarin er nog voldoende bergingscapaciteit beschikbaar is.

Voor de 2^{de} categorie zijbeken (Burchtse Beek en Kleine Pismolenbeek) en voor de rest van de vallei die afstroomt naar de Barbierbeek waren geen debietmetingen beschikbaar om de hydrologische modellen te ijken. Deze modellen werden opgemaakt door het gekozen model opwaarts de spoorweg te schalen volgens de oppervlakte van de hydrologische bekkens.

Om extrapolaties naar hoge terugkeerperiodes te kunnen doen, is een vijftientigjarige tijdreeks (1976 tot 2001) van neerslag te Deurne (uurlijkse gegevens) met de hydrologische modellen doorgerekend om een lange tijdreeks van debieten ter plaatse van de spoorlijn tussen Sint-Niklaas en Puurs te genereren. Op deze tijdreeks werd een statistische analyse uitgevoerd (zie 2.3). Op basis van de resultaten van deze statistische ana-

lyse wass het mogelijk om het effect van maatregelen te begroten bij verschillende terugkeerperiodes.

2.2.3 Voorbereiding van de invoergegevens

Als invoer voor een NAM-model zijn drie soorten gegevens nodig: neerslag, temperatuur en potentiële evapotranspiratie.

In de buurt van het bekken van de Barbierbeek bevinden zich 4 pluviometers van het KMI (Sint-Niklaas, Beveren (Valk), Bornem en Wintam). Op deze plaatsen wordt dagelijks de neerslag geregistreerd, die tijdens de laatste 24 uren viel. Per hydrologisch bekken werd de neerslaghoeveelheid die in het hydrologisch model wordt ingegeven, bepaald aan de hand van de zogenaamde 'Thiessen methode'. Met deze methode wordt de globale neerslag voor een gebied bepaald door aan elk punt van het hydrologisch bekken de meest nabije meetpost te koppelen. De berekende 'Thiessen-neerslag' is dan de gewogen som van de neerslag in de verschillende meetposten. De gewichtcoëfficiënt wordt per meetpost bepaald door de oppervlakte van het deel van het hydrologisch bekken dat eraan gekoppeld werd (zie figuur 13). Een overzicht van de Thiessencoëfficiënten per hydrologisch bekken wordt gegeven in tabel 1.

Met deze Thiessen-neerslag is een inschatting gemaakt van de dagelijkse hoeveelheid neerslag die in het hydrologisch bekken gevallen is. Deze neerslag valt echter niet gelijkmatig verdeeld over een volledige dag. Op bepaalde momenten van de dag komen pieken voor in de intensiteit van de neerslag. Om de uurlijkse verdeling van de Thiessen-neerslag te reconstrueren, wordt gebruik gemaakt van de dichtstbijzijnde pluviograaf, die uurlijks de gevallen neerslag registreert. Voor het bekken van de Barbierbeek is dit de pluviograaf van Deurne. De berekende Thiessen-neerslag werd in de tijd verdeeld volgens de vorm van de uurlijkse waarden in Deurne, met behoud van het Thiessen-dagvolume. Een voorbeeld van deze schaling wordt gegeven in figuur 14.

Indien er dagoverschrijdende neerslag was (neerslag gedurende de scheidingsduur tussen 2 dagen), gebeurde de schaling voor de 2 dagen samen.

Ter voorbereiding van de opmaak van de hydrologisch modellen gebeurde deze verwerking voor de neerslag in Sint-Niklaas, Beveren (Valk), Bornem, Wintam en Deurne tussen 05/12/2000 en 31/03/2001 voor de verschillende hydrologische bekkens.

Na de opmaak van de hydrologische modellen (najaar 2001) werden van het KMI nog dagelijkse neerslaggegevens ontvangen van Sint-Niklaas, Beveren (Valk) en Bornem tussen april 2001 en september 2001. Deze gegevens werden gebruikt om de waarde van het hydrologisch model opwaarts de spoorweg te toetsen (zie 4.4.7).

Dagelijkse neerslag in Wintam en uurlijkse neerslag in Deurne waren voor deze periode niet beschikbaar. Aangezien de Thiessencoëfficiënt voor Wintam nul is in het gebied opwaarts de spoorweg (tabel 1), kon de test zonder deze neerslaggegevens gebeuren.

Doordat er bij de nieuwe gegevens van het KMI geen gegevens voor Deurne waren, kon de dagelijkse Thiessenneerslag niet herschaald worden. De dagelijkse gegevens werden daarom gelijkmatig verdeeld over 24 uur verondersteld.

Hydrologisch bekken	Oppervlakte [km]	Sint-Niklaas	Beveren (Valk)	Bornem	Wintam
Opwaarts spoorweg	8.207	0.750	0.249	0	0
Kleine Pismolenbeek	3.084	0.066	0	0.849	0.085
Burchtse beek	3.287	0.420	0	0	0.58
Hydrologisch bekken 1	7.008	0.870	0	0.092	0.038
Hydrologisch bekken 2	6.248	1	0	0	0
Hydrologisch bekken 3	2.052	0	0	0	1
Hydrologisch bekken 4	7.132	0	0	0.186	0.814

Tabel 1 : Waarden voor de Thiessencoëfficiënten voor de verschillende hydrologische bekkens [-]

In het hydrologisch model moet de temperatuur ingegeven worden. Deze heeft enkel invloed op het model indien ze daalt tot negatieve waarden. De gevallen neerslag wordt op dat ogenblik als sneeuw gestockeerd, en pas in het model als afvoer meegerekend wanneer de temperatuur opnieuw boven het nulpunt stijgt. Het regime van de rivier ondervond tijdens de korte kalibratieperiode geen invloed van sneeuwval. Ook voor de berekening van scenario's werd de sneeuwval niet als de bepalende factor voor de mogelijke problemen beschouwd. Daarom werd in het model een constante temperatuur van 15° C ingegeven, zodat de invloed van sneeuwval uitgesloten werd.

De potentiële evapotranspiratie wordt bepaald op basis van de PAN evaporatie of de verdamping uit open water E_0 . De PAN evaporatie wordt door het KMI voor een aantal stations geregistreerd. De potentiële evapotranspiratie E_p kan hieruit bepaald worden aan de hand van volgende formule:

$$E_p = \alpha \cdot E_0$$

In België kan α gelijk gesteld worden aan 0.6 à 0.8 ^(iv). In deze studie werd 0.7 als waarde voor α genomen.

Van het KMI werden registraties van PAN evaporatie te Ukkel ontvangen voor de periode van 1998 tot 1999. Een vergelijking van deze registraties met de gemiddelde waarden voor 20 jaar^(v) van de PAN evaporatie te Ukkel is getoond in figuur 15. Tijdens de nattere periodes van het jaar (september tot april) zijn er geen significante verschillen tussen de geregistreerde en de gemiddelde waarden. Precies deze periode werd ook voor de kalibratie van het hydrologisch model gebruikt wordt. Voor latere scenarioberekeningen met het model was ook deze (natte) periode het meest interessant. Daarom is als invoer voor

de potentiële evaporatie in het NAM model in deze studie gebruik gemaakt van de gemiddelde waarden te Ukkel.

2.2.4 Kalibratie van het hydrologisch model opwaarts de spoorweg

De kalibratie van het hydrologisch model opwaarts de spoorweg gebeurde aan de hand van de geregistreerde neerslag en debieten van 05/12/2000 tot 31/03/2001. Dit is een zeer korte periode voor de ijking van een hydrologisch model (zie ook 2.2.2). De kalibratieperiode ligt in het nattere gedeelte van het jaar, waarin de bodem meer verzadigd is. Tijdens de kalibratieperiode zijn geen extreme neerslaggebeurtenissen voorgekomen.

Na de opmaak van het model leverde het KMI meer recente neerslaggegevens. Deze werden gebruikt als invoer voor het model en de resultaten werden getoetst aan de gemeten debieten ter validatie van het model (zie 2.2.4.7). Verder in dit hoofdstuk zal daarom steeds gesproken worden over de kalibratieperiode (05/12/2000 tot 31/03/2001) en de validatieperiode (31/03/2001 tot 30/09/2001) van het hydrologisch model.

Bij het uitvoeren van een simulatie met het hydrologisch model voor deze periodes werd ook steeds een extra periode van een jaar voordien doorgerekend. Voor deze periode waren enkel neerslaggegevens beschikbaar. De resultaten konden dus niet vergeleken worden met debietmetingen. Met zo'n jaar extra simulatie wordt de situatie (beginvoorwaarden) waarmee het model de kalibratieperiode ingaat, niet lukraak door de modelleerder bepaald, maar door een simulatie van de voorgeschiedenis. Dit vermijdt extra fouten in het model.

In tabel 2 wordt een overzicht gegeven van de beschikbare periodes voor de verschillende meetreeksen die gebruikt zijn voor de kalibratie en de validatie.

Soort en plaats van de gegevens	Datum start gegevens	datum stop gegevens
Debiet Bazel	dec/98	okt/02
Debiet Temse	dec/00	okt/02
Neerslag Sint-Niklaas	dec/98	okt/02
Neerslag Valk	dec/98	okt/02
Neerslag Wintam	dec/98	apr/02
Neerslag Bornem	dec/98	okt/02
Neerslag Deurne	dec/98	apr/02
Evaporatie Ukkel	Gemiddelde	gemiddelde

Tabel 2 : Beschikbare periodes voor de verschillende gegevensreeksen

Voor het kalibreren van het model werd tewerk gegaan in verschillende stappen, zoals beschreven in de algemene methodologie. In dit hoofdstuk van het rapport wordt elke stap kort beschreven. Het is meestal een vrij technische beknopte beschrijving, die als

achtergrond wordt meegegeven. Om echter een volledig beeld van de gebruikte werkwijze te bekomen, is het aangeraden om ook de algemene methodologie⁽ⁱ⁾ erbij te lezen.

Per stap worden ook de resultaten van de kalibratie en de validatie in dit deel van het rapport besproken.

2.2.4.1 Filtering in deelstromen

De gemeten debietreeks wordt gefilterd in verschillende deelstromen (oppervlakkige afvoer, hypodermische afvoer en basisafvoer) met de numerieke filter van Nathan en McMahon, zoals beschreven wordt in de algemene methodologie⁽ⁱ⁾. Deze filter wordt gebruikt om een deelstroom $b(t)$ met een recessieconstante K uit de tijdreeks van het totale debiet $y(t)$ te filteren. Hierin is $f(t)$ het overblijvende deel van het totale debiet $y(t)$. De filtering gebeurt aan de hand van volgende formules:

$$f(t) = a \cdot f(t-1) + b \cdot (y(t) - \alpha \cdot y(t-1))$$

$$b(t) = y(t) - f(t) = \alpha \cdot b(t-1) + c \cdot (1 - \alpha) \cdot (f(t) + f(t-1))$$

$$a = \frac{(2 + v) \cdot \alpha - v}{2 + v - v \cdot \alpha}$$

$$b = \frac{2}{2 + v - v \cdot \alpha}$$

$$c = 0.5 \cdot v$$

$$\alpha = \exp\left(-\frac{1}{K}\right)$$

De parameter v staat voor de gemiddelde fractie van het totale debiet dat bijdraagt tot de gefilterde deelstroom. α , a , b en c zijn coëfficiënten die afhankelijk zijn van de waarde van K en v .

De recessieconstante of tijdsconstante K en de parameter v worden per deelstroom door de modelleerder visueel bepaald door de meetreeks en de resultaten van de filtering in een grafiek uit te zetten tegenover een logaritmische as. De recessieconstante K is dan de helling van de te filteren deelstroom, de parameter v bepaalt mee de hoogte van de gefilterde deelstroom. Dit gebeurt voor de basisafvoer en de hypodermische afstroming. De oppervlakkige afstroming wordt dan bepaald door deze twee deelstromen van de totale afvoer af te trekken. Voor de oppervlakkige afvoer wordt visueel ook wel een waarde voor K bepaald, die dan later gebruikt wordt bij het bepalen van de POT-waarden en bij hetijken van het model (zie 2.2.4.2 en 2.2.4.3).

Voor de bepaling van K en v voor de filtering van de basisafvoer wordt vooral gekeken naar langere periodes zonder neerslag, waarin het aandeel van de basisafvoer in het totaal debiet belangrijk wordt.

Tabel 3 geeft een overzicht van de resultaten voor K en v voor de drie deelstromen. In figuur 16, 17 en 18 worden de uiteindelijke resultaten van de gefilterde deelstromen voor basisafvoer, hypodermische afvoer en oppervlakkige afvoer gegeven uitgezet tegenover een logaritmische schaal. In figuur 19 wordt de totale afvoer gegeven voor de volledige beschikbare periode (kalibratie- en validatieperiode) samen met de resultaten voor de drie deelstromen.

Deelstroom	K [uur]	v [-]
Basisafvoer	600	0.25
Hypodermische afvoer	85	0.22
Oppervlakkige afvoer	14	

Tabel 3 : Waarden voor de recessieconstante en v voor de verschillende deelstromen

2.2.4.2 Scheiding van de hydrogramperiodes

Om in een latere stap van het kalibratieproces de neerslagbijdrage aan de verschillende deelstromen te kunnen inschatten, wordt de tijdreeks van debieten opgedeeld in verschillende ‘gebeurtenissen’. Bij die scheiding moet er van uitgegaan worden dat de neerslagbijdrage aan een deelstroom binnen een gebeurtenis ook binnen de periode van diezelfde gebeurtenis resulteert in afvoer in de deelstroom.

Voor de oppervlakkige afstroming en de hypodermische afstroming zijn de recessieconstantes relatief klein (zie tabel 3). Dit betekent dat een druppel neerslag die bijdraagt tot deze deelstromen, na een vrij korte tijd resulteert in een bijdrage aan het debiet in de rivier. Voor deze deelstromen volstaat het daarom om de onafhankelijke pieken in de debietmeetreeks te bepalen. De minima tussen deze pieken geven de grenzen tussen de verschillende gebeurtenissen aan.

Deze onafhankelijke pieken worden bepaald door een POT-analyse (Peak over Threshold) op de debietmeetreeks door te voeren. Er wordt hierbij rekening gehouden met een aantal in te stellen onafhankelijkheidscriteria:

- De piek moet groter zijn dan een in te geven minimale drempelwaarde.
- De recessieconstante van de oppervlakkige afvoer wordt opgelegd als minimale duur tussen 2 pieken.
- Daarnaast moet de meetreeks sinds de vorige geselecteerde piek gedaald zijn tot een in te geven percentage van deze piek, voor er een nieuwe mag geselecteerd worden.

Toepassing van de POT-analyse voor de kalibratiemeetreeks in Temse met de waarden voor de onafhankelijkheidscriteria uit tabel 4 leverde 14 POT-waarden op, en dus evenveel gebeurtenissen voor oppervlakkige en hypodermische afstroming. In figuur 20 worden de resultaten van de POT-analyse getoond voor de volledige kalibratieperiode.

Minimale drempelwaarde [m³/s]	0.1
Recessieconstante oppervlakkige afvoer [uur]	14
Percentage verhouding t.o.v. piek [%]	37

Tabel 4 : Onafhankelijkheidscriteria voor de POT-analyse op de debietmeetreeks in Temse

Voor de basisafvoer is de scheiding van de meetreeks in gebeurtenissen niet mogelijk met deze POT-analyse. De tijd die een regendruppel nodig heeft voor hij als bijdrage aan de basisafvoer in het debiet terecht komt, is namelijk veel groter dan de recessieconstante van de oppervlakkige afvoer, die als onafhankelijkheidscriterium voor de POT-analyse wordt gebruikt (zie tabel 3). Daarom werden in de meetreeks verschillende POT-periodes samen genomen, die werden afgesloten met een langdurige periode zonder neerslag (figuur 21). Dit resulteerde voor de kalibratieperiode in 5 gebeurtenissen, die de POT-gebeurtenissen bevatten die in tabel 5 worden gegeven.

Deze langere gebeurtenissen werden beschouwd voor de neerslagbijdrage aan de basisafvoer, en de totale bijdrage over deze periode wordt dan gelijkmatig verdeeld over de verschillende POT-periodes. Deze verdere verwerking van deze gebeurtenissen wordt besproken in 2.2.4.4 (Sluiten van de waterbalans).

Gebeurtenis voor basisafvoer	Volgnr. 1 ^{ste} POT-piek	Volgnr. Laatste POT-piek
1	1	1
2	2	4
3	5	6
4	7	9
5	10	14

Tabel 5 : Bepaling van de gebeurtenissen voor basisafvoer door combinatie van verschillende POT-gebeurtenissen

2.2.4.3 Modelleren van de vorm van de gesimuleerde hydrogrammen

De parameters die de vorm van het hydrogram bepalen, worden als eerste gekalibreerd in het NAM-model. Een inschatting van de waarde van deze parameters kan snel gebeuren, aangezien ze bepaald worden door de recessieconstanten van de verschillende deelstromen, zoals ze bepaald werden in 2.2.4.1 (Filtering in deelstromen).

De oppervlakkige afvoer en de hypodermische afstroming worden in het NAM-model gestuurd door 2 reservoirs in serie. Aan elk van deze reservoirs wordt een tijdsconstante (CK1 en CK2) gegeven die de helft is van de tijdsconstante van de oppervlakkige afstroming (zie tabel 3). De hypodermische afstroming wordt daarenboven nog gestuurd

door een lineair reservoir met tijdsconstante CKIF. CKIF wordt bepaald door de waarden van CK1 en CK2 af te trekken van de recessieconstante voor de hypodermische afstroming (tabel 3). De tijdsconstante voor het reservoir waardoor de basisafvoer wordt gestuurd (CKBF) wordt tenslotte gelijk genomen aan de recessieconstante voor basisafvoer (tabel 3).

Gebruik van deze vier parameters (CK1, CK2, CKIF en CKBF) gaf goede resultaten voor de drie deelstromen, en dus ook voor de vorm van het gesimuleerde hydrogram. Ter illustratie worden in figuur 22, 23 en 24 de kalibratieresultaten voor de drie deelstromen getoond.

2.2.4.4 Sluiten van de waterbalans

In deze stap van de kalibratie werden de parameters bepaald die invloed hebben op de juistheid van de gesimuleerde volumes. Voor de hypodermische afvoer en de basisafvoer werd nagegaan of de gesimuleerde neerslaginput die voor de deelstroom verantwoordelijk is, ook overeenstemt met de werkelijke gemeten neerslaginvoer voor die deelstroom.

In stap 2.2.4.2 werd de tijdreeks van debieten per deelstroom opgedeeld in verschillende gebeurtenissen. Bij die scheiding werd er van uitgegaan dat de neerslagbijdrage aan een deelstroom binnen een gebeurtenis ook binnen de periode van diezelfde gebeurtenis resulteert in afvoer in de deelstroom.

Voor elke gebeurtenis werd de totale neerslagbijdrage aan een deelstroom bepaald. Deze totale bijdrage is het cumulatief volume, bepaald door de som van de debieten over de lengte van de gebeurtenis te nemen. Voor de langere gebeurtenissen (basisafvoer) werd de totale bijdrage over deze periode dan gelijkmatig verdeeld over de verschillende hydrogramperiodes, zoals ze door de POT-analyse (zie 2.2.4.2) werden opgedeeld.

Op dezelfde manier werden de hypodermische afvoer en de basisafvoer, die met het NAM-model gesimuleerd werden, in gebeurtenissen opgedeeld. Per gebeurtenis werden opnieuw de totale neerslagbijdrages aan beide deelstromen bepaald.

De overeenstemmende neerslagbijdrages aan de gemeten en de gesimuleerde reeks werden voor de hypodermische afstroming en de basisafvoer met elkaar vergeleken. De coëfficiënten in NAM die bepalend zijn voor de berging in de ondergrond (U_{max} , L_{max} , TIF) werden aangepast tot de resultaten van de simulatie voldoende met de werkelijkheid overeenstemden. Tabel 6 geeft een overzicht van de uiteindelijke waarden die voor deze parameters werden bekomen. Figuur 25 en 26 geven de kalibratieresultaten voor de twee deelstromen.

Umax [mm]	2.3
Lmax [mm]	3350
TIF [-]	0

Tabel 6 : Waarden voor de parameters Umax, Lmax en TIF in het NAM model

2.2.4.5 Modelling van de afvoercoëfficiënten

Als laatste stap in de kalibratie worden de overblijvende NAM-parameters bepaald. De parameters CQOF en TOF hebben effect op de hoeveelheid neerslag die bijdraagt tot de oppervlakkige afstroming. Op dezelfde manier als in 2.2.4.4 werden per gebeurtenis de bijdrages aan de oppervlakkige afstroming van de gesimuleerde en de gemeten debietreeks tijdens de kalibratieperiode met elkaar vergeleken (zie figuur 27).

Om de laatste parameter (TG) juist te bepalen, werden opnieuw de neerslagbijdrages aan de basisafvoer in de gemeten en de gesimuleerde reeks met elkaar vergeleken (zie figuur 25). Aangezien deze resultaten al werden afgeijkt in stap 2.2.4.4, levert de kalibratie van deze laatste parameter slechts een kleine extra verbetering aan het model. In tabel 7 worden de uiteindelijke waarden voor de laatste drie parameters gegeven.

CQOF [-]	0.3
TOF [-]	0.25
TG [-]	0.6

Tabel 7 : Waarden voor de parameters CQOF, TOF en TG in het NAM model

2.2.4.6 Extra controleplots

Ter aanvulling werden nog een aantal plots gemaakt die extra inzicht geven in de kwaliteit van de uitgevoerde kalibratie.

De gesimuleerde cumulatieve volumes werden voor verschillende deelstromen vergeleken met de cumulatieve volumes van de metingen. Hiertoe werd per deelstroom het totaal volume bepaald dat op een bepaald moment reeds door het model stroomde. Dit gebeurde door alle debieten tot dat ogenblik te sommeren. Aan de hand van deze vergelijking kan nagegaan worden of het model ook over een langere periode de volumes behoudt. Indien er een systematische afwijking is, betekent dit dat de volumebalans van het model verkeerd is, en er dus steeds te veel of te weinig afvoer wordt berekend.

De resultaten voor elke deelstroom afzonderlijk en voor het totale volume tijdens de kalibratieperiode worden getoond in figuur 28, 29, 30 en 31.

De hydrogrammaxima, zoals ze bepaald werden uit de POT-analyse (zie 2.2.4.2) werden vergeleken voor de gesimuleerde en de gemeten debietreeks. Ook de minima, die bepaald werden als de kleinste waarde tussen twee opeenvolgende POT-waarden, werden vergeleken voor de gesimuleerde en de gemeten reeks. Deze plots zijn voor de kalibratieperiode gegeven in figuur 32 en 33. In de figuren zijn ook de gemiddelde afwijking en de standaardafwijking gegeven. De hydrogramminima komen goed overeen. De hoogste hydrogrammaxima worden in het hydrologisch model onderschat. Dit komt omdat er vooral aandacht werd besteed aan de juistheid van de gesimuleerde volumes, die bepalend zijn voor de hoeveelheid te bergen water. Pas in tweede instantie werd de juistheid van de hoogtes van de pieken gecontroleerd.

Normaal gezien wordt er bij de kalibratie van een hydrologisch model ook een statistische analyse gedaan op de metingen en op de resultaten van de simulatie van een lange neerslagreeks. Voor de Barbierbeek gebeurde dit niet, aangezien er slechts een meetreeks van enkele maanden beschikbaar was. Op zo'n korte periode heeft het uitvoeren van een statistische analyse weinig zin.

Dit wijst nogmaals op de eerder vermelde beperking van het opgemaakt hydrologisch model. Door de zeer korte kalibratieperiode, is het model geijkt voor een beperkt bereik aan gebeurtenissen. Gebeurtenissen die sterk verschillen van diegenen die zich in de kalibratieperiode voordeden, zullen niet met zekerheid correct gesimuleerd worden met het afgeijkte model.

2.2.4.7 Simulatie voor de validatieperiode

De volledige cyclus voor de kalibratie van het hydrologisch model (2.2.4.1 t.e.m. 2.2.4.6) werd een aantal keer doorlopen, totdat een parameterset voor NAM bekomen werd die voor de verschillende controleplots een zo optimaal mogelijk resultaat leverde. Een overzicht van de waarden van deze parameters wordt nog eens gegeven in tabel 8.

Umax [mm]	2.3
CKIF [UUR]	70
LMAX [MM]	3350
CQOF [-]	0.3
CKBF [UUR]	600
CK1,2	7
TIF [-]	0
TOF [-]	0.25
TG [-]	0.6

Tabel 8 : Waarden voor alle parameters in het NAM model

Toen na de kalibratie van het hydrologisch model meer recente neerslaggegevens werden geleverd door het KMI, werden deze gebruikt om het model te valideren. Deze validatieperiode loopt van 31/03/2001 tot 30/09/2001. Ze dient om te controleren of het mo-

del zich tijdens een andere natte periode dan de kalibratieperiode inderdaad wel gedraagt zoals er werd gemeten. Daarnaast kan ook de juistheid van het model voor het simuleren van de overgang van een nattere periode naar een drogere periode, van de drogere periode en van de overgang van de drogere periode terug naar een nattere periode getoetst worden.

De figuren 34 t.e.m. 42 geven voor het hydrologisch model opwaarts van de spoorlijn dezelfde plots als de figuren 25 t.e.m. 33, ditmaal echter voor de kalibratie en de validatieperiode.

Uit de resultaten blijkt dat de gesimuleerde volumes voor de winter en het voorjaar vrij goed overeenstemmen met de metingen. In de zomerperiode geven de resultaten van het model een overschatting van de gemeten debieten. Bij het begin van de herfst, wanneer de nattere periode opnieuw begint, stemmen de gesimuleerde en de gemeten bergingsvolumes terug beter overeen (de lijnen in figuren 37, 38 en 39 gaan opnieuw evenwijdig lopen).

De maxima en de minima werden tijdens de volledige kalibratie- en validatieperiode met een gelijkaardige nauwkeurigheid gesimuleerd.

Uit deze resultaten blijkt opnieuw dat het hydrologisch model werd gekalibreerd voor een beperkte periode. Naar aanleiding van bovenvermelde resultaten kunnen 2 pistes be- gaan worden. Een eerste mogelijkheid is een herkalibratie van het hydrologisch model op basis van de kalibratie- en de validatieperiode. Dit zou betekenen dat het model beter zal aangepast zijn aan de globale periode (uitgemiddeld), maar daarom geen betere resultaten voor de nattere periode zal garanderen.

Een tweede optie is het behouden van het huidig model, dat is afgeijkt voor de nattere periode. Aangezien vooral deze periodes interessant zijn voor het doel van deze studie, is gekozen voor deze tweede mogelijkheid.

Er wordt dus verondersteld dat het hydrologisch model is opgemaakt voor de nattere periode van het jaar, wanneer de bodem sterk verzadigd is (november/december tot april/mei). Om deze stelling te toetsen, en er dus zeker van te zijn dat het model voor deze nattere periodes kan gebruikt worden, is in figuur 43 een bijkomende vergelijking getoond. Het hydrologisch model werd opnieuw doorgerekend voor een gebied met een oppervlakte gelijk aan het stroomgebied opwaarts van de Hollebeekhoeve. De resultaten hiervan werden vergeleken met de debieten die ter hoogte van de Hollebeekhoeve werden geregistreerd. In figuur 43 wordt het cumulatief volume van de gemeten en de berekende debieten getoond. De waarde voor metingen en berekeningen begin november werden voor elk jaar aan elkaar gelijkgesteld. Dit verklaart de sprongen in de grafiek. Op de figuur is duidelijk te zien dat de berekeningen goed gelijk lopen met de metingen voor de winterperiode. Vanaf april/mei zijn de simulatieresultaten hoger dan de metingen, zoals ook al tijdens de validatieperiode te zien was.

Hieruit kan besloten worden dat het hydrologisch model enkel voldoet voor natte periodes waarin het vochtgehalte van de bodem vrij hoog is. Aangezien het precies deze pe-

riodes zijn die interessant zijn voor het doel van deze studie, kan het opgemaakte model hiervoor gebruikt worden.

2.2.5 *Opmaak van hydrologische modellen voor de niet-bemeten hydrologische bekkens*

Het hydrologisch model van het gebied opwaarts de spoorweg kon gekalibreerd worden aan een (weliswaar korte) debietmeetreeks. De andere hydrologische bekkens waarvoor een toevoer van debieten in het hydraulisch model nodig is (zie figuur 12), worden echter niet bemeten. Het was dus niet mogelijk om voor deze hydrologische bekkens een hydrologisch model op te stellen zoals hierboven omschreven. Om de debieten die van deze hydrologische bekkens afstromen in te schatten, moeten echter ook hydrologische modellen gebruikt worden. Voor deze modellen werden daarom de parameters overgenomen van het model opwaarts van de spoorweg (zie tabel 8). De oppervlakte van het hydrologisch bekken werd wel steeds aangepast. Tabel 9 geeft een overzicht van de oppervlakte van de verschillende hydrologische bekkens.

Hydrologisch bekken	Totale oppervlakte [km²]	Gerioleerde oppervlakte [km²]
Opwaarts de spoorweg	8.207	Niet beschouwd
Kleine Pismolenbeek	3.084	Niet beschouwd
Burchtse Beek	3.287	Niet beschouwd
Hydrologisch bekken 1	7.008	0.687
Hydrologisch bekken 2	6.248	0.790
Hydrologisch bekken 3	2.052	0
Hydrologisch bekken 4	7.132	0.698

Tabel 9 : Totale en gerioleerde oppervlakte van de verschillende hydrologische bekkens

Aangezien de rioleringsinfrastructuur in het deel afwaarts van de spoorlijn Sint-Niklaas – Puurs (collectoren en overstorten) vooral in de toekomst gebouwd zal worden, werd er voor de huidige toestand van de hydrologische modellen (kalibratiefase) geen rekening mee gehouden, en werd de afstroming van elk volledige hydrologisch bekken globaal met het hydrologisch model berekend. Voor de berekening van toekomstige situaties, werden de gerioleerde zones wel in rekening gebracht. In het hydraulisch model werd de neerslag, die op deze zones valt, ter plaatse van de geplande overstorten rechtstreeks ingebracht in de rivier. De vertraging tussen het moment van het vallen van de neerslag en het moment dat ze als debiet in de rivier komt, waarmee in het hydrologisch model rekening gehouden wordt, is voor de gerioleerde zones dus als verwaarloosbaar klein beschouwd.

In tabel 9 wordt de grootte gegeven van de gerioleerde oppervlaktes waarmee rekening gehouden werd. Per hydrologisch bekken werd er 80% van de gevallen neerslag in de gerioleerde zones op bovenvermelde manier versneld in het hydraulisch model gevoerd. In de hydrologische bekkens van de Burchtse Beek en de Kleine Pismolenbeek behoort

er slechts een zeer gering deel van de oppervlakte tot de gerioleerde zones. Daarom is in deze hydrologische bekkens de invloed van de rioleringen niet afzonderlijk meegenomen.

Het gebied opwaarts van de spoorlijn Sint-Niklaas – Puurs, de Burchtse Beek en de Kleine Pismolenbeek werden als een puntinvoer (op één plaats) in het hydraulisch model ingegeven. De resultaten van de 4 andere hydrologische bekkens werden verspreid als zijdelingse instroming langs de lengte van de waterloop ingegeven (een punt om de 500 m). In figuur 12 worden de plaatsen getoond waar de resultaten van de hydrologische modellen als input in het hydraulisch model gebracht worden.

Voor een simulatie die is gebaseerd op historische gegevens, werd de neerslaginvoer voor de verschillende hydrologische bekkens voorbereid zoals beschreven staat in 2.3.4. Op die manier is de invoer voor elk hydrologisch bekken gebaseerd op de gegevens van de dichtstbijzijnde neerslagpost.

2.3 Statistische frequentie-analyse

Om het effect van een ingreep te kunnen nagaan, werd een gebeurtenis met extreem hoge afvoeren met het hydraulisch model berekend. De resultaten van het model van de huidige toestand werden vergeleken met de resultaten van een berekening waarbij een aantal ingrepen op het terrein zijn ingevoegd. Zo was het mogelijk om maatregelen te bepalen om het gebied beter te beveiligen tegen deze extreme gebeurtenissen. Om voeling te krijgen met de kans van voorkomen van deze extreme gebeurtenissen, werd het begrip 'terugkeerperiode' gebruikt.

Door het uitvoeren van een statistische analyse op de piekdebieten van een meetreeks, kan ingeschat worden hoe vaak een piek met een bepaalde waarde zich kan voordoen. Hieraan wordt een 'terugkeerperiode' gekoppeld. Zo kan een piek met een terugkeerperiode van 25 jaar, zich bvb. gemiddeld 3 keer in een mensenleven voordoen.

Er moeten bij het gebruik van deze terugkeerperiodes echter wel een aantal bedenkingen gemaakt worden.

De terugkeerperiode wordt bepaald voor de situatie waarin gemeten werd. Dit betekent dat er bijvoorbeeld geen rekening gehouden wordt met toekomstige ingrepen in het hydrologisch bekken die een grote invloed hebben op de afvoer. Voorbeelden hiervan zijn bijkomende verhardingen en aanleg van wachtbekkens opwaarts van het hydraulisch model. Ook factoren buiten het bekken van de Barbierbeek, zoals eventuele klimaatwijzigingen en de invloed daarvan op de neerslaghoeveelheden en de hoogte van de zeespiegel, worden niet meegerekend. Het is dus mogelijk dat door een verandering van deze factoren de terugkeerperiode van een bepaald piekdebiet wijzigt.

Waar mogelijk werd dit opgevangen door de gekende toekomstplannen in het bekken van de Barbierbeek zoveel mogelijk in het model op te nemen. Zo werd de invloed van toekomstige rioleringsinfrastructuur in de hydrologische modellen opgenomen (zie 2.2.5).

Ook de invloed van het geplande gecontroleerd overstromingsgebied voor de Schelde, ter hoogte van het afwaartse deel van de Barbierbeek, werd in de berekeningen opgenomen.

De invloed van het bestaande wachtbekken opwaarts van de spoorlijn Sint-Niklaas – Puurs werd impliciet in het hydrologisch model meegenomen. De metingen waaraan dit model werd gekalibreerd zijn namelijk pas aangevangen nadat het wachtbekken in werking trad. Het wachtbekken dat nog meer opwaarts gepland is, is niet in het model opgenomen. Dit bekken heeft echter een relatief beperkte invloed op het afwaartse debiet van de Barbierbeek. Dit wachtbekken komt namelijk helemaal opwaarts langs de Barbierbeek te liggen, terwijl het grootste deel van het afstromend debiet afwaarts ervan in de beek komt. Door weglaten van dit wachtbekken zal de aanpak in de studie eerder aan de veilige kant zijn. De aanwezigheid van dit wachtbekken zal de resultaten van de studie echter zeer weinig veranderen.

Veranderingen die niet gepland of niet te voorzien zijn, werden uiteraard niet mee opgenomen in het model. Daarom is het zeer belangrijk dat het begrip terugkeerperiode gekoppeld blijft aan de situatie op middellange termijn.

Een tweede aspect dat bij het uitvoeren van een statistische analyse voor de Barbierbeek van zeer groot belang is, is de afwaartse randvoorwaarde die bepaald wordt door het getij op de Schelde. De Barbierbeek mondt uit in de Schelde langs een kunstwerk, dat bestaat uit twee parallelle kokers. Aan het afwaartse uiteinde van de kokers zitten 2 terugslagkleppen. Door dit kunstwerk loost de Barbierbeek enkel water in de Schelde indien de waterstand in de Schelde lager is dan in de Barbierbeek. In de periode tussen december 2000 en maart 2001 bedroeg het hoogste hoogwater te Hemiksem 6.61 m TAW. Het laagste laagwater bedroeg -0.87 m TAW.

Bij stormtij op de Schelde zijn de waterstanden in de Schelde zo hoog, dat de lozing van de Barbierbeek in de Schelde in het gedrang komt. Stormtij op de Schelde is het gevolg van een zeer sterke noordwestenwind op zee, die zich voordoet bij springtij.

Het verband tussen het voorkomen van een stormtij op de Schelde en een periode van extreem hoge afvoer in de rivieren ten gevolge van neerslag is niet eenduidig bepaald. Het Instituut voor Natuurbehoud ging de afhankelijkheid van deze twee gebeurtenissen na^(vi). Hiervoor werden gegevens gebruikt van de Kleine Molenbeek in Liezele en van het getij op de Schelde. Uit de test bleek dat de aanname van een totale onafhankelijkheid met een risico van minder dan 5% verworpen kon worden. Er bleek dus een zekere afhankelijkheid tussen het voorkomen van een buitengewoon stormtij (met een hoogwaterstand op de Schelde van 7 m TAW of meer) en een extreem debiet in de Kleine Molenbeek. Het gemiddelde debiet in de Kleine Molenbeek op het moment van een stormtij is vergelijkbaar met een debiet met een terugkeerperiode van ongeveer 1 jaar. Het gemiddeld debiet tijdens een stormtij is dus wel hoger maar lang niet zo hoog als een extreem debiet.

Omgekeerd werd ook aangetoond dat er geen totale afhankelijkheid is tussen het voorkomen van stormtij op de Schelde en een extreem debiet op de Kleine Molenbeek. Als

het debiet op de Kleine Molenbeek hoger is dan $1 \text{ m}^3/\text{s}$, is er niet noodzakelijk een stormtij op de Schelde.

Op het gecombineerd voorkomen van beide randvoorwaarden wordt verder ingegaan in hoofdstuk 5.

Door een statistische analyse uit te voeren op de piekdebieten gebeurt er een inschatting van de kans op voorkomen van slechts één gebeurtenis, namelijk het voorkomen van de piek in het hydrogram. Twee gebeurtenissen, waarmee eenzelfde maximale afvoer gepaard gaat, kunnen twee volledig verschillende hydrogrammen veroorzaken. Een van beide kan veroorzaakt worden door een langdurige, matig intense bui, waardoor de bodem langzaam verzadigd raakt, en er een piek in de afvoer ontstaat. De vorm van het hydrogram zal breed zijn, en gedurende de volledige periode zal er een vrij groot volume afgevoerd worden. Een tweede gebeurtenis, die het gevolg is van een korte hevige bui, kan aanleiding geven tot eenzelfde piekafvoer. De vorm van het hydrogram zal echter veel steiler zijn, en er zal dus een veel kleiner volume water door de rivier stromen. Een voorbeeld hiervan is gegeven in figuur 44. Bij het uitvoeren van een statistische analyse wordt echter enkel rekening gehouden met de grootte van de piekafvoer.

Voor de studie van de Barbierbeek was het niet zinvol om een statistische analyse uit te voeren op de korte beschikbare meetreeks (3 maanden). Daarom is met het hydrologisch model een uurlijkse neerslagreeks van 25 jaren doorgerekend. De invoer was de geregistreerde neerslag in Deurne van 1976 tot 2001. Op die manier werd voor elk hydrologische bekken een debietreeks van 25 jaar gecreëerd. Op die debietreeksen kon een statistische analyse uitgevoerd worden.

Er werd gekozen om de meetreeks van Deurne te gebruiken, aangezien dit het meest nabij gelegen station is waar uurlijkse neerslag wordt geregistreerd. Er zal enig verschil zitten op waarden van de metingen te Deurne en de neerslag die werkelijk in het bekken van de Barbierbeek viel. Het ogenblikkelijk verschil tussen de neerslaghoeveelheden op beide plaatsen is hier echter niet van belang. Voor de statistische analyse is het gedrag op lange termijn belangrijk. Hiervoor kan de neerslagreeks te Deurne als representatief genomen worden.

In 2.2.4.6 werd reeds opgemerkt dat het hydrologisch model geijkt werd voor een beperkt bereik aan gebeurtenissen omwille van de zeer korte kalibratieperiode. Gebeurtenissen die sterk verschillen van diegenen die zich in de kalibratieperiode voordeden, zullen niet met zekerheid correct gesimuleerd worden met het afgeijkte model. Daarom moeten ook de gecreëerde 25-jarige meetreeksen en de statistische analyse die erop gebeurden, niet als een absolute grootheid beschouwd worden. Het is een inschatting van de grootte-orde van mogelijke gebeurtenissen, waarbij zo maximaal mogelijk gebruik gemaakt werd van de beschikbare gegevens in het bekken van de Barbierbeek.

2.3.1 Gebruikte methodologie

In de algemene methodologie⁽¹⁾ wordt beschreven hoe de statistische analyse op tijdreeksen van debieten uitgevoerd kan worden. Ter voorbereiding wordt een POT-analyse

op de te verwerken gegevensreeks uitgevoerd (zie 2.2.4.2). De maxima die zo uit de tijdreeks gehaald worden, worden gebruikt om een statistische analyse op toe te passen.

Op basis van de geselecteerde POT-waarden kan er gezocht worden welke statistische verdeling op de te analyseren reeks kan toegepast worden. De gekozen verdeling is bepalend voor het staartgedrag van de gegevensreeks. Dit staartgedrag beschrijft de trend van de hoge gegevens. Daarom is de keuze van de juiste verdeling van groot belang.

Eens de verdeling vastligt, worden de parameters eigen aan de verdeling bepaald, zodat de verdeling zo goed mogelijk samenvalt met de geselecteerde POT-waarden. Aan de hand van de afgeijkte verdeling kan de extrapolatie van de gegevens gebeuren naar een terugkeerperiode die groter is dan de lengte van de oorspronkelijke tijdreeks.

In de meer klassieke aanpak voor het uitvoeren van een statistische analyse op gegevensreeksen wordt vaak een Gumble-verdeling (of exponentiële verdeling) op de pieken in de meetreeks gefit. Door standaard deze verdeling aan te nemen, kan het zijn dat er een grote fout gemaakt wordt in de staart van de verdeling (en dus bij de extrapolatie naar grotere waarden). In de methode die in deze studie werd toegepast, is de mogelijkheid van een Gumble-verdeling vervat. Daarnaast zijn er nog andere verdelingen mogelijk.

Een meer gedetailleerde beschrijving van de gebruikte methode wordt gegeven in de algemene methodologie⁽ⁱ⁾.

2.3.2 Statistische frequentie-analyse in de verschillende hydrologische bekkens

Op de resultaten van de 25 jaar debieten die voor de verschillende hydrologische bekkens werden berekend, werd telkens een statistische analyse uitgevoerd. Aangezien de parameters van de NAM-modellen voor al deze hydrologische bekkens gelijk genomen zijn, en de resultaten enkel afhankelijk zijn van de oppervlakte van de hydrologische bekkens, zijn ook de resultaten van de statistische analyse van deze hydrologische bekkens gelijkaardig. Daarom wordt enkel voor het meest opwaartse hydrologisch bekken (opwaarts van de spoorlijn Sint-Niklaas – Puurs) een volledige beschrijving gegeven van de gevolgde stappen. Voor de andere hydrologische bekkens gaf de analyse volledig analoge resultaten, en worden enkel de eindresultaten beschreven.

Bij het zoeken naar de geschikte verdeling bleek de Pareto-verdeling geschikt voor deze debietreeks. Vergelijking van de plot van de POT-waarden volgens de verschillende verdelingen (Pareto, exponentiële en Weibull-verdeling), toont immers dat voor de Pareto-verdeling de plot het best naar een rechte evolueert voor hogere debieten (zie figuur 45, 46 en 47).

Dit wordt ook bevestigd bij het maken van een eerste inschatting van de parameters (de zogenaamde 'UH-schatting'), waar met een minimale kleinste-kwadratenfout een stabiele waarde voor γ wordt bekomen van 0.253 (figuur 48). Deze positieve waarde voor γ is opnieuw een indicatie om voor een Pareto verdeling te kiezen.

Bij het schatten van de parameter γ van de Pareto-verdeling, wordt bij een minimale kleinste-kwadratenfout een waarde voor γ bekomen van 0.287 (zie figuur 49). Hierbij hoort een drempel $t = 150$, en een drempeldebiet $Q_t = 0.486 \text{ m}^3/\text{s}$.

Dit betekent dat de verdeling geldt voor de 150 hoogste geselecteerde POT-waarden in de geanalyseerde reeks, die groter of gelijk zijn aan het drempeldebiet van $0.486 \text{ m}^3/\text{s}$. De Pareto-verdeling die vanaf deze drempel geldt, wordt beschreven met volgende formule:

$$Q(T) = Q_t \cdot \left(\frac{T \cdot t}{n} \right)^\gamma$$

Hierbij is:

- T

[jaar]

terugkeerperiode
- $Q(T)$

$[\text{m}^3/\text{s}]$

piekdebiet dat hoort bij een terugkeerperiode T
- Q_t

$[\text{m}^3/\text{s}]$

drempeldebiet
- t

[-]

drempel
- n

[-]

aantal jaren
- γ

[-]

parameter van de Pareto-verdeling

Op een gelijkaardige manier werden voor de andere hydrologische bekkens de parameters t , Q_t en γ van de Pareto-verdeling bepaald. Een overzicht van de resultaten voor de verschillende hydrologische bekkens is gegeven in tabel 10. Een overzicht van de piekdebieten die per hydrologisch bekken met verschillende terugkeerperiodes overeenstemmen is gegeven in tabel 11.

Hydrologisch bekken	drempel [-]	drempeldebiet $[\text{m}^3/\text{s}]$	γ [-]
Opwaarts de spoorweg	150	0.486	0.258
Kleine Pismolenbeek	59	0.240	0.283
Burchtse Beek	59	0.250	0.273
Hydrologisch bekken 1	59	0.500	0.283
Hydrologisch bekken 2	58	0.440	0.283
Hydrologisch bekken 3	57	0.160	0.273
Hydrologisch bekken 4	55	0.500	0.286

Tabel 10 : Drempel, drempeldebiet en waarde voor γ in de verschillende hydrologische bekkens

Hydrologisch bekken	T=1j	T=2j	T=5j	T=10j	T=25j	T=50j	T=100j
Opwaarts de spoorweg	0.804	0.982	1.276	1.558	2.027	2.474	3.019
Kleine Pismolenbeek	0.303	0.368	0.478	0.581	0.753	0.917	1.115
Burchtse Beek	0.313	0.378	0.486	0.587	0.754	0.911	1.101
Hydrologisch bekken 1	0.631	0.767	0.995	1.211	1.569	1.909	2.324
Hydrologisch bekken 2	0.555	0.675	0.875	1.065	1.381	1.680	2.045
Hydrologisch bekken 3	0.200	0.242	0.312	0.378	0.488	0.591	0.717
Hydrologisch bekken 4	0.623	0.760	0.989	1.206	1.568	1.913	2.334

Tabel 11 : Debieten [m³/s] bij verschillende terugkeerperiodes in de verschillende hydrologische bekkens

2.3.3 Controle aan de hand van resultaten van vroegere studies

Zoals reeds eerder in dit rapport werd vermeld, is er weinig zekerheid over het extrapolerend karakter van het opgestelde NAM-model (waarde van de resultaten voor extreme gebeurtenissen). Er is gepoogd om met de gegevens die momenteel beschikbaar zijn een inschatting te maken van de voorkomende debieten in het bekken van de Barbierbeek.

In het verleden zijn reeds een aantal studies uitgevoerd voor er hydrologische metingen op de Barbierbeek werden geregistreerd. Debieten werden bepaald door correlatie met metingen in andere stroombekkens of aan de hand van gebiedseigenschappen. De resultaten van deze studies werden hier gebruikt om de grootte-orde te toetsen van de debieten die met de opgestelde NAM-modellen werden berekend.

Een eerste studie voor het bekken van de Barbierbeek werd uitgevoerd door het Instituut voor Natuurbehoud in 1998^(vi).

In deze studie werden de debieten afwaarts in de Barbierbeek geschat door de gemeten debieten in de Kleine Molenbeek te schalen naar de afwaterende oppervlakte van de Barbierbeek. Deze werkwijze is te verantwoorden aangezien de gebiedseigenschappen van beide stroombekkens gelijklopend zijn.

Ter vergelijking werden per terugkeerperiode de debieten opgeteld, die met de NAM-modellen van de hydrologische deelbekkens werden bekomen. In de realiteit worden de pieken die van verschillende deelstroomgebieden komen, wat afgevlakt naar afwaarts toe (dus meer verspreid in de tijd en met een minder steile piek). Daarom is met deze aanpak een lichte overschatting van de werkelijke debieten afwaarts in de Barbierbeek te verwachten. Deze overschatting wordt ook bevestigd in de resultaten van de vergelijking (tabel 12). Uit de berekeningen met het hydraulisch model (hoofdstuk 3) blijkt dat deze tijdsverschuiving en afvlakking op de Barbierbeek klein is.

Terugkeerperiode [jaar]	Debiet [m³/s] studie IN	Debiet [m³/s] Som resultaten statistische analyse voor de hydrologische debekkens (op basis van de NAM-modellen)
2	-	4.17
2.5	3.51	-
5	4.22	5.41
10	4.98	6.59
20	5.71	-
25	-	8.54
50	6.66	10.40
100	7.36	12.65

*Tabel 12 : Debieten [m³/s] afwaarts in de Barbierbeek bij verschillende terugkeerperiodes
Vergelijking studie IN – resultaten NAM modellen*

Een tweede studie waaraan de resultaten van de NAM-modellen getoetst kunnen worden, is de Hydrologische modellering van de Barbierbeek en studie opvang Barbierbeekwater als invulling van de leemte in de kennis in het MER “Gecontroleerd overstromingsgebied Kruibeke – Bazel – Rupelmonde”, uitgevoerd door Ecorem in opdracht van de Afdeling Zeeschelde in 1998^(vii).

In deze studie werd een hydrologisch model opgesteld, dat op basis van de gebiedseigenschappen het afstromende debiet in het bekken van de Barbierbeek berekent. Het model werd niet geijkt aan meetreeksen, maar gebruikt zoveel mogelijk fysische wetmatigheden en meetbare eigenschappen van het gebied. Het is een bruikbaar middel indien geen meetgegevens voor een waterloop beschikbaar zijn. In deze studie werden debieten afwaarts in de Barbierbeek geschat met een terugkeerperiode van 1000 jaar. Dit gebeurde door een neerslaggebeurtenis met een kans op voorkomen van 1X op 1000 jaar te gebruiken. Hierbij werd onderscheid gemaakt tussen een zomerneerslag (kort, intens) en een winterneerslag (langdurig, gelijkmatiger verdeeld in de tijd).

Om de resultaten te vergelijken werden op basis van de NAM-berekeningen de resultaten van de statistische analyse met terugkeerperiode 1000 jaar voor alle hydrologische bekkens opgeteld. Ook hier gelden dezelfde opmerkingen in verband met het verwaarlozen van de (voor de Barbierbeek kleine) afvlakking en de tijdsverschuiving van de pieken en de lichte overschatting van de debieten daardoor.

De resultaten van de vergelijking zijn voorgesteld in tabel 13. Hierbij dient wel de bedenking gemaakt dat een terugkeerperiode van 1000 jaar een enorm grote extrapolatie is van de gebruikte tijdreeks van 25 jaar. Er is absoluut geen zekerheid of de extrapolatie voor zo'n grote terugkeerperiode wel echt de aangenomen verdeling heeft. Elke kleine verandering in de modelresultaten of in de parameters voor de statistische verdeling zal bovendien een grote verandering in de resultaten geven.

Tot slot is de terugkeerperiode van een neerslaggebeurtenis niet noodzakelijk dezelfde als de terugkeerperiode van het debiet in de rivier dat eraan gekoppeld is. Een lange, intense bui zonder extreme neerslaghoeveelheden kan immers even hoge debieten in de rivier veroorzaken als een korte hevige neerslagbui met een hoge piek (zie figuur 44).

Om al deze redenen wordt aan de waarde van onderstaande vergelijking relatief weinig waarde gehecht.

Terugkeerperiode [jaar]	Debiet [m³/s] studie Ecorem	Debiet [m³/s] Som resultaten statistische analyse voor de hydrologische bekkens (op basis van de NAM-modellen)
1000	Zomer: 35 Winter: 15	24.32

*Tabel 13 : Debieten [m³/s] afwaarts in de Barbierbeek bij T=1000 jaar
Vergelijking studie Ecorem – resultaten NAM modellen*

Een derde studie waarmee vergeleken wordt is de hydrodynamische studie Barbierbeek – Pachtgoedbeek, uitgevoerd door S.W.K. in opdracht van Stadsbestuur Sint-Niklaas in 1999^(viii).

Deze methode is gebaseerd op het werk van M. Voet^{(ix),(x)}. Door correlatie met bemeten stroombekkens in Oost-Vlaanderen kan een schatting gemaakt worden van de te verwachten piekdebieten en de te verwachten runoff-hoeveelheden voor verschillende terugkeerperiodes. De invoer voor deze correlatieformules zijn gekende fysische eigenschappen van het stroombekken.

De hoogwaterdebieten werden afzonderlijk bepaald voor de Barbierbeek en de Pachtgoedbeek ter hoogte van de mondingen van de 2 waterlopen aan het gerealiseerde wachtbekken (figuur 2). De afstromende oppervlakte van beide delen samen is 5.70 km².

De plaatsen van beide debietsberekeningen liggen vlakbij elkaar (waar de Pachtgoedbeek in de Barbierbeek uitmondt). Daarom is de afvlakking en tijdsverschuiving voor beide debieten op de plaats waar ze samenkomen verwaarloosbaar. Door beide debieten op te tellen zal dus geen overschatting gemaakt worden.

Voor de vergelijking werden de resultaten gebruikt van de NAM-berekeningen voor het hydrologisch bekken 2 (zie figuur 12). De parameters van dit model zijn immers overgenomen van het geijkte NAM-model opwaarts de spoorweg. Het gebied dat in de studie van SWK werd beschouwd is een deel van dit hydrologisch bekken. De oppervlakte van hydrologisch bekken 2 (zonder rioleringen) is 5.62 km², en dus zeer goed vergelijkbaar met de grootte van het gebied dat door SWK werd beschouwd.

Een vergelijking van de resultaten voor verschillende terugkeerperiodes is gegeven in tabel 14. Hieruit blijkt dat de overeenkomst voor kleine terugkeerperiodes zeer goed is.

De verschillen zijn van een grootte-orde 10%. Voor grotere terugkeerperiode worden de verschillen groter (20% voor T=25 jaar, tot bijna 50% voor T=100 jaar). Hieruit blijkt opnieuw dat de keuze van een statistische verdeling en de bijhorende parameters een zeer grote invloed op de extrapolaties naar grote terugkeerperiodes heeft. Er moet dus erg voorzichtig omgesprongen worden met het hanteren van zeer grote terugkeerperiodes.

Terugkeerperiode [jaar]	Debiet [m³/s] studie SWK	Debiet [m³/s] Resultaten statistische analyse voor hydrologisch bekken 2 (op basis van de NAM-modellen)
2	0.62	0.68
5	0.80	0.88
10	0.92	1.07
25	1.07	1.38
50	1.19	1.68
100	1.30	2.04

Tabel 14 : Debieten [m³/s] opwaarts in de Barbierbeek bij verschillende terugkeerperiodes - Vergelijking studie SWK – resultaten NAM model hydrologisch bekken 2

Als besluit kan gesteld worden dat de grootte-orde van de resultaten van de verschillende studies vergelijkbaar zijn. Vergeleken met de resultaten van het Instituut voor Natuurbehoud resulteren de resultaten van deze studie systematisch in een veiligere aanpak. Vergelijking met de resultaten van Ecorem geeft vrij goede resultaten. Omwille van de zeer hoge terugkeerperiode die hier werd gebruikt, wordt aan deze vergelijking echter weinig waarde gehecht. De vergelijking met de resultaten van SWK geeft goede resultaten voor lage terugkeerperiodes. Voor hoge terugkeerperiodes is de benadering, die met de NAM-modellen gemaakt wordt, veiliger dan de benadering in de studie van SWK.

De vergelijking van deze studies is steeds een relatieve vergelijking. Voor geen van deze studies was een voldoende lange meetreeks beschikbaar om een volledig beeld van de hydrologie in het bekken van de Barbierbeek te krijgen. Er werden steeds een aantal vereenvoudigende aannames gemaakt. Om deze aannames meer absoluut te kunnen staven, is een herkalibratie van het opgemaakt NAM-model nodig wanneer er een debietmeetreeks van 5 jaar of meer beschikbaar is.

2.3.4 Opmaak van invoerhydrogrammen met verschillende terugkeerperiode voor scenarioberekeningen

Om effecten van ingrepen te bekijken, werden met het hydraulisch model gebeurtenissen met grote debieten doorgerekend voor de huidige toestand en voor de toestand met de ingrepen. Om deze grote debieten te kiezen, wordt gebruik gemaakt van het begrip terugkeerperiode. Hiermee kan de kans op voorkomen van een gebeurtenis ingeschat worden.

Voor de waterlopen van 1^{ste} categorie, die in het beheer zijn van AMINAL Afdeling Water, wordt een bescherming van het valleigebied gezocht tegen piekdebieten met een terugkeerperiode van 25 jaar. Ook in deze studie is een terugkeerperiode van 25 jaar als streefdoel gesteld.

Om de effecten bij andere hogere terugkeerperiodes te kennen, zijn ook piekdebieten met een terugkeerperiode van 50 jaar gebruikt. De grootte van deze debieten stemt ongeveer overeen met de grootte van de debieten die berekend werden op basis van de neerslagmetingen van september 1998. Zoals in 2.3.3 reeds werd aangehaald, moet het gebruik van de hogere terugkeerperiodes met de nodige voorzichtigheid gebeuren.

In deze studie wordt gebruik gemaakt van de statistische analyse die gebeurde op de piekdebieten. Om voor het hydraulisch model een debietinvoer te creëren, die overeenstemt met de berekende terugkeerperiodes, werd als volgt te werk gegaan:

Uit de 25-jarige berekende debietreeksen werd per hydrologisch deelbekken de gebeurtenis met het hoogste piekdebet genomen. Dit deed zich voor in september 1998. De periode er rond werd uit de meetreeksen geselecteerd. Deze periode ligt niet in de natte winterperiode met sterk verzadigde bodem, waarvoor het NAM-model is opgesteld (november/december tot april/mei, zie 2.2.4.7). Door de neerslaghoeveelheden die geregistreerd werden in Deurne na te gaan (zie tabel 15), blijkt duidelijk dat in de laatste 25 jaar tijdens de periode van begin augustus tot half september in 1998 het meest neerslag viel. De neerslaghoeveelheden die geregistreerd werden zijn tot 2.5 keer de gemiddelde neerslagregistraties. In figuur 50 is te zien dat deze neerslag zich nogal verspreid in de tijd heeft voorgedaan vanaf 20 augustus 1998.

Daarom wordt voor 1998 aangenomen dat de maand september beschouwd kan worden als een periode met een grote verzadigingsgraad van de ondergrond, en dat de opgestelde NAM-modellen dus gebruikt kunnen worden.

De verhouding tussen het piekdebet, dat met het hydrologisch model voor deze periode werd berekend, en het piekdebet dat bij de verschillende terugkeerperiodes hoort, werd bepaald. De berekende periode tussen 13 september 1998 (aanvang van de piek) en 4 oktober 1998 (opnieuw normale toestand in de rivier) werd verschaald aan de hand van deze coëfficiënt. De overgang tussen de verschaalde periode en de periode ervoor en erna werd geleidelijk gemaakt. Op die manier werden voor de verschillende hydrologische bekkens debietijdreeksen met verschillende terugkeerperiodes bepaald. Een voorbeeld voor de afvoer van het gebied opwaarts de spoorweg wordt gegeven in figuur 51.

Jaar	Neerslagsom tussen 06/08 en 14/09 [mm]	Neerslagsom tussen 06/08 en 20/09[mm]
1976	25.8	34.8
1977	73.7	73.7
1978	51.6	53.3
1979	39.3	40.3
1980	72.3	74.3
1981	28.3	59.7
1982	65.5	65.7
1983	33	45.8
1984	132.6	162.6
1985	78.5	90.2
1986	91.7	118.1
1987	87.1	87.6
1988	79.8	90.8
1989	79.4	93.8
1990	76.3	85.1
1991	7.6	13.6
1992	200.5	201.9
1993	44.2	67.4
1994	112.3	179.5
1995	51	54.6
1996	218	218
1997	68	68.1
1998	222.7	248.6
1999	45.3	57
2000	61.3	124.8
Gemiddeld	81.832	96.372

Tabel 15 : Neerslagsommen [mm] per jaar voor de periodes tussen 06/08 en 14/08 en 06/08 en 20/08, gebaseerd op de uurlijkse neerslaggegevens in Deurne

Deze debietreeksen werden gebruikt voor de berekeningen van de verschillende scenario's.

In 2.3 werd reeds besproken welke beperkingen er zijn op de statistische analyse. Bijkomend moet volgende opmerking gemaakt worden: De volledige periode tussen 13 september 1998 en 4 oktober 1998 werd geschaald met eenzelfde coëfficiënt. Deze co-

efficiënt geeft enkel de verhouding tussen de piekdebieten (dus op één enkel moment in die periode) weer.

Om alle bovenvermelde redenen moet het begrip terugkeerperiode als indicatief gebruikt worden. Bij de berekeningen was het van groot belang om hiermee rekening te houden en om vooral ook de relatieve effecten van scenario's tegenover de huidige situatie te bekijken.

2.4 Besluit

In hoofdstuk 2 wordt de opmaak en ijking van de hydrologische modellen in het bekken van de Barbierbeek beschreven. Er zijn voor dit bekken slechts een zeer beperkt aantal gegevens beschikbaar. Bij de opmaak van het model werden deze gegevens zo optimaal mogelijk aangewend. Toetsing van de resultaten van de bekomen modellen aan resultaten van andere studies geeft bevredigende resultaten.

Ook de resultaten van het uitvoeren van een statistische analyse op een berekende meetreeks van 25 jaar komen aan bod. Op basis van de resultaten werden debietreeksen opgesteld met pieken met verschillende terugkeerperiodes. Deze debietreeksen werden gebruikt om met het hydraulisch model scenario's te berekenen. Uit de gemaakte vereenvoudigingen blijkt dat het begrip terugkeerperiode voor de Barbierbeek niet als absoluut gegeven kan gebruikt worden, maar veeleer een indicatieve waarde voor een gebeurtenis is. Extrapolaties naar zeer grote terugkeerperiodes moeten zeer voorzichtig toegepast worden.

3 HYDRAULISCHE MODELLERING HUIDIGE TOESTAND

3.1 Modelbeschrijving

3.1.1 *Situering van de Barbierbeek zoals ingebracht in het hydraulisch model*

De Barbierbeek is een waterloop van 2^{de} categorie die behoort tot het stroomgebied van de Schelde. De waterloop, met een lengte van 20.7 km, heeft een bekken van 3731 ha. De oorsprong van de Barbierbeek bevindt zich in Sint-Niklaas ter hoogte van het klaverblad van de E17. Iets verder, net opwaarts van de spoorlijn Sint-Niklaas – Puurs, mondt de Pachtgoedbeek erin uit. Andere waterlopen van 2^{de} categorie die in Barbierbeek uitmonden zijn de Burchtse Beek (ter hoogte van de E17 te Haasdonk) en de Kleine Pismolenbeek (te Kruibeke). In het afwaartse deel (Bazel) stroomt de Barbierbeek door de polder, waar een GOG voor de Schelde gepland is. Aan de Scheldedijk bevindt zich een uitlaatconstructie met terugslagkleppen, die bij laagwater de afwatering van de Barbierbeek in de Schelde mogelijk maakt. In figuur 52 wordt de ligging van een deel van de Schelde, de Barbierbeek en de zijrivieren van 2^{de} en 3^{de} categorie getoond. De ligging van de assen van deze waterlopen is overgenomen uit de Vlaamse Hydrografische Atlas.

Een hydraulisch model beschrijft wat zich afspeelt in de rivier, en maakt het mogelijk om, bij opgelegde opwaartse en afwaartse randvoorwaarden, waterstanden en debieten te berekenen op verschillende plaatsen in de rivier. Aan elke rand van het model worden gemeten of berekende randvoorwaarden opgelegd. De stroomopwaartse rand van het hydraulisch model van de Barbierbeek ligt in Temse, aan de duiker net stroomafwaarts van de spoorweg Sint-Niklaas – Puurs. De stroomafwaartse rand is de monding van de Barbierbeek in de Schelde.

De belangrijkste zijbeken (Burchtse Beek en Kleine Pismolenbeek) werden in het hydraulisch model opgenomen over een lengte van 25 m. Aan de opwaartse rand werden berekende debieten in het model ingevoerd. Deze debieten werden berekend met de hydrologische modellen die voor het bekken van de Barbierbeek opgesteld werden (zie Hoofdstuk 2). Ook langsheen de Barbierbeek werden op regelmatige afstand debieten in het model ingevoerd, die overeenstemmen met de afstroming van de zijdelingse gebieden langs de rivier. Het gemodelleerde deel van de Barbierbeek is te zien in figuur 52.

3.1.2 *Gebruikte modelleringsoftware*

De opmaak van het hydraulisch model gebeurde met de software MIKE11 versie 2000B (Danish Hydraulic Institute). Voor de opbouw van het hydraulisch model werd gebruik gemaakt van de module HD (hydrodynamica). Voor het inbouwen van de overstroomba-

re gebieden en de visualisatie van de overstromingsresultaten werd gebruik gemaakt van de module MIKE11 GIS, die geïntegreerd is met de GIS-software Arcview versie 3.2 van ESRI.

3.1.2.1. De module HD

Met het MIKE11 softwarepakket kan een vertakt rivierennetwerk gesimuleerd worden. De basis voor de berekeningen zijn de eendimensionale de Saint Venant-vergelijkingen die het behoud van massa en het behoud van beweging uitdrukken:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{g|Q|Q}{C^2 AR} = 0$$

Hierin zijn:

- x: ruimtelijke coördinaat volgens de as van de rivier [m]
- t: de tijd [s]
- Q: het debiet [m³/s]
- A: de natte oppervlakte [m²]
- q: een laterale in- of uitstroming [m³/s/m]
- C: de Chézycoëfficiënt [m^{1/2}/s]
- R: de hydraulische straal [m] = A/P
- P: natte omtrek [m]
- α: een coëfficiënt om rekening te houden met het niet uniform verdeeld zijn van de snelheid over de dwarsdoorsnede

Met de Chézycoëfficiënt C wordt de ruwheid van de bedding uitgedrukt. Een alternatieve parameter voor de omschrijving van de bodemruwheid is de Manningcoëfficiënt n. Verder in dit rapport zal de ruwheid steeds beschreven staan door middel van de Manningcoëfficiënt n, of een equivalent daarvan (zie 3.2. Kalibratie). De relatie tussen Chézy- en Manningcoëfficiënt is als volgt:

$$C = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{n}$$

met:

C: de Chézycoëfficiënt [$\text{m}^{1/2}/\text{s}$]

R: de hydraulische straal [m]

n: de Manningcoëfficiënt [$\text{s}/\text{m}^{1/3}$]

De HD module is het hart van de modelleringssoftware MIKE11, waarmee de eigenlijke berekeningen gebeuren.

Met deze module is het ook mogelijk om overstroombare gebieden te modelleren. Dit kan bijvoorbeeld door ze als een soort bergingsreservoir (floodcell) aan de hoofdrivier in het model te koppelen. De floodcell en de hoofdrivier worden met elkaar verbonden door overlaten die de stroming over de dijk voorstellen.

Invoergegevens voor het hydraulisch model zijn de geometrie van de waterloop, van de vallei (indien overstroombare gebieden gemodelleerd moeten worden) en van de kunstwerken. Aan de opwaartse en de afwaartse randen van het hydraulisch model worden gekende randvoorwaarden opgelegd onder vorm van tijdreeksen.

In MIKE11 zijn als invoerbestanden voor een berekening met een hydraulisch model 5 soorten bestanden nodig: *.xns11, *.nwk11, *.bnd11, *.hd11 en *.sim11-bestanden.

In een *.xns11-bestand worden alle gegevens bewaard over de geometrie van het opgemaakte model. Hierin komen de dwarssecties in de rivier, de ligging en hoogte van de oevers en de ligging en hoogte van de overstroombare gebieden.

Het *.nwk11-bestand koppelt alle informatie uit de *.xns11-bestand aan een locatie op het terrein (nl. de afstand langs de as van de waterloop), duidt de plaats van de rekenpunten aan en bewaart ook de gegevens over ligging, geometrie en werking van de kunstwerken in de waterloop.

Alle informatie over de randvoorwaarden van het model wordt bewaard in het *.bnd11-bestand.

Het *.hd11-bestand dient voor het instellen van de hydraulische parameters die van belang zijn bij de berekening en van de beginwaarden voor een berekening.

Wanneer een berekening of simulatie moet gebeuren, wordt alle informatie over de berekening in een *.sim11-bestand ingegeven. In dit bestand staat welke *.xns11, *.nwk11, *.bnd11 en *.hd11-bestanden voor de berekening gebruikt moeten worden, maar ook tussen welke tijdstippen de berekening zal lopen en hoe de resultaten opgeslagen worden.

Een meer gedetailleerde beschrijving van de wiskundige achtergrond en de werking van de MIKE11 software wordt beschreven in de MIKE11 handleiding^{(xi),(xii)}.

In eerste instantie wordt de bestaande toestand (anno 2001) in het model gebracht. Dit betekent de Barbierbeek met afwaarts de monding in de Schelde zoals ze nu bestaat (met uitwateringssluis) en een deel van de Burchtste Beek en de Pismolenbeek (zie figuur 52).

3.1.2.2. De module MIKE11 GIS

De module MIKE11 GIS dient als hulp bij de opmaak van het hydraulisch model. Aan de hand van gegevens over de hoogteligging en de oppervlakte van de gebieden langs de rivier kan de overstroombare vallei met MIKE11 GIS in het hydraulisch model ingebracht worden.

MIKE11 GIS wordt ook gebruikt om de resultaten van de berekeningen te visualiseren. Aan de hand van de berekende waterhoogtes en het digitaal hoogtemodel van de vallei kan een overstromingskaart (met aanduiding van de waterdieptes op verschillende plaatsen) opgemaakt worden.

De MIKE11 GIS module is geïntegreerd in de Arcview GIS software van ESRI. Meer gedetailleerde informatie is te vinden in de MIKE11 GIS handleiding^(xiii).

3.1.3 Opbouw van het netwerkbestand

In het netwerkbestand werd de Barbierbeek ingevoerd met een realistische lengte. Dit gebeurde op basis van het opgemeten verloop van de Barbierbeek (zie 2.1.2). Alle (sterk) meanderende stukken zijn hierin dus ook opgenomen. De stroomopwaartse rand van het model bevindt zich ter hoogte van de duiker aan de spoorweg tussen Sint-Niklaas en Puurs. De stroomafwaartse rand bevindt zich aan de monding van de Barbierbeek in de Schelde. De totale lengte van het deel van de Barbierbeek dat zo werd gemodelleerd is 17,16 km.

In figuur 52 wordt de ligging van het netwerk van de Barbierbeek gegeven.

3.1.4 Dwarssecties

3.1.4.1. Opmeten van de dwarssecties

In opdracht van de provincie Oost-Vlaanderen werd de Barbierbeek opgemeten door BnS Engineering tussen de spoorlijn Sint-Niklaas – Puurs en de geplande dijk van het GOG. Er werd gemiddeld om de 50 m een dwarsprofiel gemeten. De dwarssecties werden opgemeten tot 20 m buiten de oever aan elke kant van de beek. Stroomopwaarts en stroomafwaarts van elk kunstwerk werd een extra dwarssectie gemeten. Daarnaast werd voor de volledige waterloop het lengteprofiel opgemaakt, met aanduiding van de thalweg (de lijn van de diepste punten in de waterloop) en de linker- en rechterdijkkruinen (de hoogste punten langs de oevers).

Om de bestaande toestand op een goede manier te kunnen modelleren, was ook kennis van de bathymetrie van de Barbierbeek in het geplande GOG nodig. Deze (X,Y,Z)-gegevens werden opgemeten door de afdeling Zeeschelde. De opmetingen leverden o.a. volgende lijnen op:

- het verloop van de thalweg van de Barbierbeek;
- het verloop van de laagste punten van zowel linker- als rechteroever van de Barbierbeek;
- het verloop van de hoogste punten van zowel linker- als rechteroever van de Barbierbeek;
- het verloop van de laagste punten van zowel linker- als rechterdijk langs de Barbierbeek;
- het verloop van de hoogste punten van zowel linker- als rechterdijk langs de Barbierbeek;

Enkel ter hoogte van de Kruibeekse Kreek ontbraken de lijnen voor de thalweg en de laagste oeverpunten. Op deze plaats werd het verloop van de lijnen geïnterpoleerd tussen de bestaande lijnen stroomopwaarts en stroomafwaarts.

Dwarssecties werden bepaald met een onderlinge afstand van gemiddeld 40 m. Elke dwarssectie is genomen van de kruin van de dijk aan de linkeroever van de Barbierbeek tot de kruin van de dijk aan de rechteroever. Beide dijkkruiden hebben een hoogte van ongeveer 4 m TAW.

De dwarssecties werden manueel afgeleid uit de (X,Y,Z)-gegevens. Hierbij werd als volgt te werk gegaan:

- De (X,Y,Z)-gegevens werden geprojecteerd op een vlak dat op $Z = 0$ m TAW ligt, door van alle punten de Z-waarde op 0 te stellen. In dit vlak worden ook lijnen getekend waarop de gewenste dwarssecties liggen. De snijpunten van de dwarssectiepunten met de opgemeten lijnen leveren de gezochte (X,Y)-ligging van de dwarssectiepunten;
- Op deze snijpunten worden fictieve verticalen geconstrueerd;
- Via 3D-zicht in Autocad worden de snijpunten van deze verticalen met de originele lijnen bepaald. Deze snijpunten leveren de gezochte Z-coördinaten van de dwarssectiepunten.

3.1.4.2. Inbrengen van de dwarssecties in het hydraulisch model

Een tweede stap bij de opmaak van het hydraulisch model was het inbrengen van de 402 opgemeten dwarssecties in MIKE11. De dwarssecties worden genummerd van stroomopwaarts naar stroomafwaarts.

Bij het opmaken van het dwarssectiebestand moet een keuze gemaakt worden voor een radius-type. Een eerste mogelijkheid is gebruik te maken van de klassieke 'hydraulische radius' R (hydraulische straal), zoals ze in de de Saint Venant-vergelijkingen gedefinieerd wordt (zie 3.1.2.1).

Een tweede mogelijkheid is het gebruik van een 'resistance radius'. De resistance radius R^* wordt net zoals de hydraulic radius R berekend op basis van de waterhoogte en de geometrie aan de hand van volgende formule:

$$\sqrt{R^*} = \frac{1}{A} \int_0^B h^{\frac{2}{3}} db$$

met:

A: natte sectie [m^2]

B: breedte aan het wateroppervlak [m]

h: lokale waterdiepte [m]

In de MIKE11 Reference Manual^(xii) wordt het gebruik van de hydraulische straal R aanbevolen voor diepe, smalle en uniforme secties. Het gebruik van de 'resistance radius' R^* wordt aanbevolen voor rivieren met belangrijke variaties in de vorm (zoals de overgang van de smallere rivier naar de bredere overstromingsvlaktes). Om stabiele berekeningen bij overstromingen van de oever te realiseren is er bij de studie van de Barbierbeek voor gekozen om overal een 'resistance radius' te gebruiken. Een meer gedetailleerde beschrijving van de verschillende radius-types wordt gegeven in de MIKE11 Reference Manual^(xii).

In MIKE11 worden per dwarssectie automatisch 'markers' geplaatst op het laagste punt in de rivier en de hoogste punten aan linker- en rechteroever (zie figuur 53). Deze markers bakenen het stroomvoerende deel van de waterloop af waarmee gerekend wordt. Indien deze markers op de oevers er niet waren, zouden lager gelegen delen van de vallei meegenomen worden in de berekening. In gevallen waarbij het waterpeil in de beek niet hoger komt dan de oever, en er dus geen overstromingen optreden, zou er volgens de berekeningen dus onterecht water stromen in de lager gelegen delen van de vallei. Manueel werd er een controle uitgevoerd naar de juiste positionering van de markers.

Een indicator voor een goede ligging van de markers, is de waarde van de conveyance K in functie van de hoogte. Hierbij is de conveyance gedefinieerd als:

$$K = AR^{\frac{2}{3}}$$

met A de natte oppervlakte en R de hydraulic radius of de resistance radius.

Als K niet monotoon stijgt in functie van de hoogte, is de kans op instabiliteiten groter. Bij het aanpassen van de markers werd dus rekening gehouden met het verloop van de conveyance.

In eerste instantie werd een model opgebouwd waarin wel de dwarssecties ingevoegd zijn, maar waarin nog geen kunstwerken zijn ingebracht. Met dit model werd een eerste berekening gemaakt. In de resultaten waren enkele instabiliteiten merkbaar (hevige schommelingen van de waterstand rond een bepaald waterpeil). Deze instabiliteiten zijn het gevolg van grote en/of bruuske veranderingen tussen opeenvolgende dwarssecties. Om dit op te lossen werden een zestal secties vervangen door interpolatie van aangrenzende dwarssecties of door een lichte aanpassing van de geometrie. Hierdoor verloopt de overgang tussen opeenvolgende dwarssecties minder bruusk. Aan de andere opgemeten dwarssecties werd niets gewijzigd.

3.1.5 Kunstwerken

Ook de kunstwerken in de Barbierbeek werden door BnS Engineering opgemeten en in fiches verwerkt. Een voorbeeld van een kunstwerk-fiche is te zien in figuur 5.

In de Barbierbeek zijn er 3 types kunstwerken: bruggen (19), overwelvingen (28) en stuwen (2). Ze werden ingebracht in het model via het netwerkbestand, gekoppeld aan een bepaalde chainage (de afstand langs de as van de rivier).

3.1.5.1. Stuwen

Stuwen worden ingebracht als "broadcrested weir" of overlaat met brede drempel¹. De geometrie ervan wordt opgegeven in een breedte-hoogte tabel (zie tabel 16). De factoren die de wrijvingsverliezen in rekening brengen werden ingesteld op de standaardwaarden.

Stuw 301		Stuw 331	
Hoogte [mTAW]	Breedte [m]	Hoogte [mTAW]	Breedte [m]
17.7	0	18.56	0
17.71	1.14	18.57	1.08
19.07	4.04	18.98	1.40
19.08	4.06	19.16	1.44
20.08	4.06	19.87	3.07
		19.88	3.42
		20.20	4.05

Tabel 16 : Hoogte-breedte tabel van de 2 stuwen in de Barbierbeek

¹ In MIKE11 is het ook mogelijk om overlaten te modelleren als overlaten met "dunne wand", maar dan is er kennis nodig over de bijhorende debietscoëfficiënt Cd. Aangezien deze kennis niet voorhanden is voor de 2 stuwen op de Barbierbeek, werden ze gemodelleerd als brede overlaten. Als coëfficiënt voor intrede- en uittredeverlies werden de standaardwaarden gebruikt (namelijk inflow = 0.5, outflow = 1, free overflow =1).

3.1.5.2. Bruggen en overwelvingen

Bruggen en overwelvingen worden ingebracht als combinatie van een “culvert” (duiker) voor het deel onder het brugdek en een “weir” (stuw) voor het deel boven het brugdek. Een culvert laat enkel water door via de opening van de duiker, terwijl er pas water over de weir stroomt als het waterpeil in de beek boven een ingegeven niveau stijgt. Door de twee kunstwerken op eenzelfde plaats parallel in te brengen, kunnen ook de meer extreme gebeurtenissen (waarbij water zowel door als over het kunstwerk stroomt) gesimuleerd worden.

Bij het inbrengen van de duiker moeten volgende gegevens ingebracht worden:

- in / uitlaatniveau
- aantal parallelle duikers
- lengte van de duiker
- ruwheid (Manningcoëfficiënt n)².
- verliescoëfficiënten voor intrede, uittrede, bochten, ...
- de geometrie van de dwarssectie van de duiker (cirkelvormig, rechthoekig of onregelmatige vorm)
- eventuele regeling door middel van kleppen (bijvoorbeeld terugslagkleppen die bepalend zijn voor toegelaten stromingsrichtingen)

3.1.5.3. Inbrengen van de kunstwerken in MIKE11

Het invoeren van de kunstwerken is stelselmatig uitgevoerd, beginnend met de meest stroomafwaartse constructie (de uitwateringssluys aan de monding van de Barbierbeek in de Schelde), en dan verdergaand in stroomopwaartse richting. In tabel 17 zijn alle opgemeten kunstwerken weergegeven.

De nummering van de kunstwerken gebeurde van stroomafwaarts naar stroomopwaarts. Afhankelijk van het type kunstwerk dat in het model werd ingebracht begint de naam van het kunstwerk met de letter c (culvert) of de letter w (weir).

Op die manier werd alle informatie per kunstwerk toegevoegd aan het netwerkbestand. Een volgende stap is het koppelen van het netwerkbestand aan het dwarssectiebestand. Met de MIKE11 HD module wordt dan voor elk kunstwerk een Qh-verband berekend op basis van dichtstbijzijnde stroomopwaartse en stroomafwaartse dwarssecties, afhankelijk

² standaardwaarde voor de Manningcoëfficiënt van duikers in MIKE11 is $n = 0,013 \text{ s/m}^{1/3}$

van het optredende stromingstype. Meer achtergrond hierover is te vinden in de MIKE11 Reference Manual^(xii).

Bij het invoeren van de duikers bleken er moeilijkheden te zijn voor bepaalde kunstwerken. Daarom zijn er een aantal aanpassingen gebeurd aan de oorspronkelijke invoergegevens zoals ze door BnS Engineering in fiches werden opgetekend.

Een aantal opgemeten 'kunstwerken', die niet veel meer zijn dan een plank die over de waterloop ligt en dus ook (bijna) geen ladingsverlies in de rivier teweeg brengen, werden niet ingevoerd. Het invoeren van deze 'kunstwerken' in het model gaf stabiliteitsproblemen in de berekeningen. Het bleek meer correct om hun aanwezigheid en hun minimaal effect in de rivier te negeren. Figuur 54.1 t.e.m. 54.5 tonen de foto's van de kunstwerken die niet ingevoerd werden. In figuur 54.6 wordt een overzicht gegeven van de ligging van de kunstwerken die in het model werden ingevoerd.

De berekeningsmethode van de HD module van MIKE11 gaat er voor elk kunstwerk van uit dat er een ladingsverlies zal optreden in de overgang van de dwarssectie in de rivier naar het kunstwerk. Dit betekent dat de oppervlakte van de sectie moet vernauwen of de ruwheid van de bedding moet vergroten. Daarom moesten in de dwarssectie van de kunstwerken kleine aanpassingen gebeuren aan de geometrie. Deze aanpassingen gebeurden door vergelijking van de oppervlakte-hoogte-relatie van de kunstwerk- en rivierdwarssecties. Er is steeds voor gewaakt dat deze aanpassingen minimale verschillen in de bergingscapaciteit van de dwarssectie teweeg brachten en ook geen beduidende invloed op de verhanglijn hebben.

Een laatste stap bij het invoeren van de kunstwerken is het instellen van de verliescoëfficiënten en de Manningcoëfficiënt voor de duikers. Waar mogelijk werden de standaardwaarden gebruikt die in MIKE11 worden opgegeven. Enkel voor de Manningcoëfficiënten moest hiervan soms afgeweken worden opdat de berekeningen numeriek stabiel zouden zijn. Er werd bij het invullen van de Manningcoëfficiënten steeds voor gewaakt dat de waarden overeenstemden met fysisch realistische grootheden^(xiv).

Tabel 17 geeft een overzicht van alle kunstwerken zoals ze uiteindelijk zijn ingevoerd. Bij een aantal kunstwerken staat onder 'Omschrijving' de vermelding 'opwaarts modelbereik'. Deze kunstwerken bevinden zich op het deel van de Barbierbeek tussen de spoorweg Sint-Niklaas – Puurs (= stroomopwaartse grens van het hydraulisch model) en de meetpost in Temse (= stroomopwaartse randvoorwaarde) die zich in één van de duikers bevindt van het Barbierbeek-traject langs Eigenlo in Temse. Deze meetpost is tevens ook de plaats waar de bovenafvoer in het model wordt gebracht. Aangezien de kunstwerken zich bevinden op het gedeelte van de Barbierbeek waar (in het model) geen water door stroomt, zijn ze ook niet van belang bij de berekeningen, en werden ze niet in het model ingebracht.

Kunstwerknr.	Omschrijving	Ingevoerd als:		Manning-coëfficiënt voor de duiker n [s/m ^{1/3}]
		Culvert	Weir	
461	Opwaarts modelbereik	(-)	(-)	(-)
451	Opwaarts modelbereik	(-)	(-)	(-)
441	Opwaarts modelbereik	(-)	(-)	(-)
431	Opwaarts modelbereik	(-)	(-)	(-)
421	Opwaarts modelbereik	(-)	(-)	(-)
411	Opwaarts modelbereik	(-)	(-)	(-)
401	Opwaarts modelbereik	(-)	(-)	(-)
391	Opwaarts modelbereik	(-)	(-)	(-)
381	Opwaarts modelbereik	(-)	(-)	(-)
371	Opwaarts modelbereik	(-)	(-)	(-)
361	Opwaarts modelbereik	(-)	(-)	(-)
351	Opwaarts modelbereik	(-)	(-)	(-)
341	Brug	C-3109/341	W-3109/341	0.013
331	Stuw	(-)	W-3109/331	(-)
321	Brug	C-3109/321	W-3109/321	0.013
311	Brug	C-3109/311	W-3109/311	0.013
301	Stuw	(-)	W-3109/301	(-)
291	Kunstwerk niet ingevoerd	(-)	(-)	(-)
281	Brug	C-3109/281	W-3109/281	0.04
271	Brug	C-3109/271	W-3109/271	0.04
261	Brug	C-3109/261-RO	W-3109/261	0.04
		C-3109/261-LO		0.04
251	Kunstwerk niet ingevoerd	(-)	(-)	(-)
241	Brug	C-3109/241-LO	W-3109/241	0.04
		C-3109/241-RO		0.04
231	Brug	C-3109/231	W-3109/231	0.013
221	Brug	C-3109/221	W-3109/221	0.04
211	Brug	C-3109/211	W-3109/211	0.04
201	Brug	C-3109/201	W-3109/201	0.04
191	Brug	C-3109/191	W-3109/191	0.06
181	Brug	C-3109/181	W-3109/181	0.05
171	Brug	C-3109/171	W-3109/171	0.04
161	Brug	C-3109/161	W-3109/161	0.04

151	Brug	C-3109/151	W-3109/151	0.04
141	Brug	C-3109/141	W-3109/141	0.04
131	Kunstwerk niet ingevoerd	(-)	(-)	(-)
121	Kunstwerk niet ingevoerd	(-)	(-)	(-)
111	Brug	C-3109/111	W-3109/111	0.04
101	Duiker	C-3109/101	(-)	0.04
91	Kunstwerk niet ingevoerd	(-)	(-)	(-)
81	Kunstwerk niet ingevoerd	(-)	(-)	(-)
71	Brug	C-3109/071	W-3109/071	0.04
61	Brug	C-3109/061	W-3109/061	0.04
51	Kunstwerk niet ingevoerd	(-)	(-)	(-)
41	Kunstwerk niet ingevoerd	(-)	(-)	(-)
31	Vernauwde dwarssectie	(-)	(-)	(-)
21	Kunstwerk niet ingevoerd	(-)	(-)	(-)
11	Brug	C-3109/011	W-3109/011	0.04
1	Brug	C-3109/001	W-3109/001	0.05
0	Duiker	uitwateringssluis	(-)	0.013

Tabel 17 : Overzicht van de kunstwerken in het hydraulisch model

3.1.6 Randvoorwaarden voor het hydraulisch model

Aan elke rand van het model werden gemeten of berekende randvoorwaarden opgelegd. De beschikbare meetreeksen zijn het debiet in Temse (stroomopwaartse rand) en het getij op de Schelde in Hemiksem (stroomafwaartse rand).

Voor de overige modelranden zijn geen meetreeksen beschikbaar, en werden aan de hand van het hydrologisch model dus berekende tijdreeksen opgelegd. Dit is het geval aan de stroomopwaartse randen van de Burchtse Beek en de Kleine Pismolenbeek en ook op verscheidene punten langsheen de Barbierbeek (zie figuur 52).

Om het model te ijken werden meetgegevens gebruikt ter plaatse van de Hollebeekhoeve (meetpost Bazel). In figuur 55 worden de verschillende meetposten aangeduid.

Tabel 18 geeft een overzicht van de digitaal beschikbare gegevens op de randen en in het model.

Soort en plaats van de gegevens	datum start gegevens	datum stop gegevens
Debiet Bazel	dec/98	okt/02
Debiet Temse	dec/00	okt/02
Waterstand Hemiksem	jan/98	dec/01

Tabel 18 : Beschikbare periodes voor de verschillende gegevensreeksen

3.1.7 Keuze van de tijdstap en de HD parameters

De keuze van de tijdstap Δt (tijdsverschil tussen twee opeenvolgende berekeningen in een simulatie) is bepalend voor de benodigde rekentijd om een bepaalde simulatieperiode door te rekenen. Een grotere tijdstap zorgt voor een kortere rekentijd. Een te grote tijdstap kan echter instabiliteiten en onnauwkeurigheden in de modelresultaten met zich meebrengen.

Een aantal parameters die bepalend zijn voor de simulatie kunnen in het *.hd11-bestand ingesteld worden. Eén van deze parameters is de waarde delta (Δ), die bepaalt hoe het

numeriek schema voor de term $gA \frac{\partial h}{\partial x}$ uit de de Saint Venant-vergelijkingen (zie 3.1.2.1)

in de tijd wordt verdeeld. Een gedetailleerde toelichting hierbij wordt gegeven in de MIKE11 Reference Manual^(xiii). De waarde van Δ kan variëren tussen 0 en 1. Standaard staat de waarde voor Δ ingesteld op 0.5. Door deze waarde aan te passen varieert ook de maximale tijdstap waarvoor de berekeningen stabiel zijn.

Om tot een optimale combinatie van waarden voor Δt en Δ te komen, werden een aantal berekeningen uitgevoerd met verschillende combinaties van waarden (zie tabel 19).

De resultaten van deze berekening werden beoordeeld op basis van instabiliteiten die voorkwamen. Daarnaast werd ook de nauwkeurigheid van de berekeningen aan de randen van het model gecontroleerd.

De beste combinatie is die met een maximale waarde voor Δt (en dus de kortste rekentijd), waarvoor geen instabiliteiten voorkomen en er een goede overeenkomst is tussen metingen en berekeningen. Op die manier werd gekozen om volgende waarden te gebruiken:

$\Delta = 0.6$ en $\Delta t = 30$ seconden

Voor de andere parameters in het *.hd11-bestand werden de standaardwaarden binnen MIKE11 gebruikt.

Tijdstap Δt [s] ►	5	10	30	60	120
Delta Δ [-] ▼					
0.5	X	X	X	X	X
0.6	X	X	X	X	X
0.7	X	X	X	X	X

Tabel 19 : Berekende combinaties van waarden voor de tijdstap Δt [s] en delta Δ [-]

3.2 Kalibratie van het hydraulisch model

Voor de kalibratie of ijking van het hydraulisch model werd de periode gebruikt waarvoor een maximale hoeveelheid gegevens beschikbaar waren (zie tabel 18). Dit was voor het geval tussen december 2000 en april 2001 (kalibratieperiode).

Om het model te ijken werd zoveel mogelijk gebruik gemaakt van de opgemeten gegevens. Opwaarts werden de metingen in Temse als randvoorwaarde ingegeven. De zijdelingse instroming in de zijbeken en langsheen de rivier werd ingegeven op basis van de debietmetingen in Temse. Hiervoor werd van de debieten in Basel het debiet te Temse afgetrokken. Dit verschil werd evenredig met de afstromende oppervlakte verdeeld over de verschillende hydrologische bekkens opwaarts de Hollebeekhoeve. Ook afwaarts de Hollebeekhoeve werd een waterhoeveelheid in het model gevoerd evenredig met de gemeten debieten in Basel. Op die manier was het volume water dat in het model werd ingegeven gelijk aan de gemeten hoeveelheden.

De ijking van het hydraulisch model gebeurde door vergelijking van de met het hydraulisch model berekende waterstanden met de gemeten waarden van de limnograaf in Basel (aan de Hollebeekhoeve). Anderzijds werden ook de gemeten en berekende waterstanden opwaarts aan de meetpost in Temse met elkaar vergeleken. De ruwheid van de bedding (Manningcoëfficiënt n) werd zo ingesteld, dat een maximale overeenstemming tussen metingen en berekeningen bekomen werd.

Op die manier werd ervoor gekozen om langsheen de volledige loop van de Barbierbeek een Manningwaarde n van $0.09 \text{ s/m}^{1/3}$ te gebruiken. Deze waarde is op het eerste zicht erg hoog (zeer ruwe bedding). Dit komt omdat gekozen werd om te rekenen met een 'resistance radius' (zie 3.1.4.2). Omdat niet met de klassieke hydraulische straal werd gewerkt, is ook de waarde van de Manningcoëfficiënt voor de dwarssecties niet zoals in de literatuur beschreven. Om te toetsen of de bekomen waarde fysisch relevant is, werden enkele vergelijkende berekeningen uitgevoerd. Voor een deel van de Barbierbeek afwaarts van de Hollebeekhoeve werden de dwarssecties ingegeven met de klassieke hydraulische straal. Er werden berekeningen uitgevoerd met verschillende waarden voor de Manningcoëfficiënt in deze zone. In de rest van de Barbierbeek stonden de Manningwaarden ingesteld zoals voor het gekalibreerd model. Deze resultaten werden vergeleken met de ijkingsresultaten. Hieruit blijkt dat een waarde voor de Manningcoëfficiënt van $0.09 \text{ s/m}^{1/3}$ bij een 'resistance radius' voor de Barbierbeek overeenstemt met een waarde voor de Manningcoëfficiënt van $0.075 \text{ s/m}^{1/3}$ bij een 'hydraulic radius'. Uit literatuurgegevens^(xiv) blijkt deze laatste waarde fysisch realistisch voor een beek zoals de Barbierbeek.

De vergelijking tussen metingen en berekeningen zijn voor de kalibratieperiode gegeven voor de twee meetposten. In Basel is er een goede overeenkomst voor beide tijdreeksen (zie figuur 56).

Ter hoogte van de meetpost in Temse was het niet mogelijk om een directe vergelijking tussen meting en berekening te maken. De meetpost ligt namelijk in een duiker. De resultaten in MIKE11 worden weergegeven in elk knooppunt waar een dwarssectie is ingegeven. Dit is dus net opwaarts en net afwaarts van de duiker. Afwaarts van de duiker waarin de debietmeetpost is geplaatst is een plotse daling van zo'n 10 cm in het bodem-

peil van de rivier. Bij lage waterstanden zal het verloop van de verhanglijn ongeveer deze daling volgen, en zullen de berekende resultaten ook lager zijn dan de metingen. Bij hoge waterstanden zal deze bodemdaling (bijna) geen invloed meer hebben op de verhanglijn. De kalibratie ter hoogte van Temse kon dus enkel gebeuren voor de hogere waterhoogtes (vanaf 19.15 mTAW). Voor de debieten is er eveneens een goede overeenkomst tussen metingen en berekeningen. De resultaten in Temse zijn gegeven in figuur 57. Hierbij zijn de berekende reeksen in de legende aangeduid met de vermelding "BARBIERBEEK xxx.xx".

3.3 Besluit

Met behulp van de HD- en MIKE11 GIS-modules van de MIKE11-software werd een hydraulisch model voor de Barbierbeek opgemaakt. Dit hydraulisch model bevat alle terreingebonden informatie i.v.m. het traject van de beek, de helling, de dwarssecties, de ligging van de oevers, aanwezige kunstwerken, ..., en is een weergave van de huidige toestand (anno 2000) van de Barbierbeek. Bij het invoeren van al deze informatie in het model werden een aantal kleine aanpassingen uitgevoerd, met de bedoeling om het hydraulisch model stabiele berekeningen te laten uitvoeren.

Met het hydraulisch model werden een aantal kalibratieberekeningen uitgevoerd, waarbij voor twee punten op de beek, nl. de meetposten in Temse en Bazel, de gelijkheid werd onderzocht tussen de berekende en gemeten waarden voor de waterstanden en de debieten. Voor deze kalibratie werd de volledige periode gebruikt waarvoor meetgegevens beschikbaar zijn. De kalibratie toonde aan dat het hydraulisch model met een bevredigende nauwkeurigheid rekt.

4 VALIDATIE EN VERFIJNING VAN HET GEKOPPELD HYDROLOGISCH – HYDRAULISCH MODEL

4.1 Eerste validatie van het gekoppeld hydrologisch - hydraulisch model

Op het moment dat de eerste versie van het hydraulisch model afgerond werd (mei 2002), waren de digitaal beschikbare meetgegevens in de Barbierbeek beperkt tot de periode december 2000 – april 2001. Al deze beschikbare gegevens werden gebruikt voor de kalibratie van het hydraulisch model. Om toch te kunnen voldoen aan het principe dat de validatie van een hydraulisch model moet gebeuren aan de hand van gegevens die verschillen van de kalibratiegegevens, werd een aangepaste werkwijze toegepast om de juistheid van het gekalibreerde model te valideren.

De rekenresultaten van de hydrologische modellen zijn gebruikt als opwaartse randvoorwaarden (in de Barbierbeek en in de zijbeken) voor het hydraulisch model. Als afwaartse randvoorwaarden werden de geregistreerde waterstanden in de Schelde te Hemiksem gebruikt. Zoals reeds gezegd waren er voor de Barbierbeek nog geen metingen beschikbaar die buiten de kalibratieperiode gelegen waren, en waaraan de juistheid van de berekeningen kon getoetst worden. Daarom werd ervoor gekozen om de periode van september 1998 door te rekenen. In deze periode deden zich in de Barbierbeek uitgestrekte overstromingen voor.

Doordat de hoogte van een deel van het terrein langs de Barbierbeek nauwkeurig opgemeten is door BnS Engineering (zie hoofdstuk 2, paragraaf 2.1.2), kan met de software MIKE11 GIS (DHI) een overstromingskaart opgemaakt worden. Dit gebeurde door de berekende waterhoogtes, die binnen de bedding optraden, te vergelijken met de hoogtes van de omliggende gebieden. Deze laatste werden afgeleid uit een digitaal terreinmodel (DTM), dat werd opgemeten in de zomer van 2001 (zie hoofdstuk 2). Het verschil tussen het waterpeil en het bodempeil levert de waterdiepte op die op een bepaald punt in de vallei voorkomt. Deze overstromingskaart geeft een eerste inschatting van de uitgestrektheid van de berekende overstromingen (zie figuur 58). Deze kaart kan in een latere fase, wanneer de overstroombare gebieden in het model gebracht zijn, nog gedetailleerder opgemaakt worden (zie 4.2.1).

Tijdens de inventarisatiefase⁽ⁱⁱⁱ⁾ werd door Envico een overstromingskaart gemaakt, die gebaseerd is op informatie die bij de gemeenten verzameld werd. Onafhankelijk daarvan werd in 2001 door GfG in opdracht van AMINAL Afdeling Water een kaart opgemaakt met Recent Overstroomde Gebieden (ROG). Een vergelijking van de berekende overstromingskaart met beide inventarisaties wordt gegeven in figuur 59. Hieruit blijkt in dat de inventarisatie die door Envico is gebeurd vooral de gebieden zijn aangeduid die re-

gelmatig onder water komen. Op de ROG kaart zijn eerder de gebieden opgenomen die in extreme omstandigheden overstromen. Uit een gedetailleerdere analyse van al dan niet overstroomde woningen en straten bleek dat deze kaart een globaal beeld geeft van de overstroomde gebieden, en niet echt de details nauwkeurig weergeeft.

Daarom zijn de resultaten van de MIKE11 modellering nog eens getoetst bij de technische diensten van de gemeentes Kruibeke, Beveren en Temse. In grote lijnen komen de modelresultaten overeen met de beschikbare overstromingskaarten. Op de meeste plaatsen bleek door het model eerder een onderschatting van de overstroomde oppervlakte gemaakt te worden.

In de getoetste versie van het model zijn echter nog geen overstroombare gebieden langsheen de Barbierbeek ingebouwd. Het water in het model kan dus nog niet overlopen naar de vallei op momenten waarop het berekende waterpeil hoger waren dan het lokale oeverpeil. Een gevolg hiervan was dat alle water zich dus in de bedding van de Barbierbeek zelf bevond, waardoor de berekende waterhoogtes in feite een overschatting waren van de werkelijke optredende waterhoogtes (zie figuur 60). Het spreekt voor zich dat de overschatting die aanwezig is in de berekende waterhoogtes zich ook zal doorzetten in de uitgestrektheid van de overstroomde gebieden en de waterdieptes bij overstroming.

In een volgende stap werden ook de overstroombare zones in het model ingebracht. Zo was de opmaak van een meer gedetailleerde overstromingskaart mogelijk. De verschillen in overstroomde oppervlakte tussen berekeningen en werkelijkheid konden zo nog gereduceerd worden.

4.2 Verfijning van het gekoppeld hydrologisch - hydraulisch model

4.2.1 Verfijning hydraulisch model – versie mei 2002

Het hydraulisch model – versie mei 2002 werd uitgebreid met een hele reeks overstroombare gebieden. Figuur 61 toont een overzicht van alle overstroombare gebieden die in het hydraulisch model zijn aangekoppeld. De opmeting van deze gebieden wordt omschreven in hoofdstuk 2. Het softwarepakket Mike 11 voorziet verschillende mogelijkheden voor het inbouwen van overstroombare gebieden:

- plaatselijk verbreden van de dwarssectie: naast de bedding van de rivier wordt ook het deel van de dwarssectie dat zich daarbuiten bevindt in het model opgenomen. Vaak is dit deel van de sectie reeds aanwezig in het model, maar wordt het niet gebruikt bij de berekeningen – *i.e.* er stroomt tijdens de berekeningen geen water door – als gevolg van de kunstmatige begrenzing van de rivierbedding m.b.v. zogenaamde *markers* (zie hoofdstuk 3 – pt. 3.1.4.2). Het plaatselijk verbreden houdt dus een verplaatsing van deze *markers* in. Deze methode levert echter maar betrouwbare resultaten in rivieren waarbij opeenvolgende dwarssecties quasi-evenwijdig lopen. In het geval van sterk meanderende rivieren, waarbij het opmeten van kort op elkaar volgende en dus niet quasi-evenwijdige dwarssecties noodzakelijk is om het verloop van de rivier nauwkeurig weer te geven, is deze methode

minder betrouwbaar omdat de berekening van de beschikbare bergingsvolumes niet nauwkeurig genoeg gebeurt. Het gevaar bestaat namelijk dat bepaalde volumes met elkaar overlappen of dat sommige volumes niet worden meegerekend. Om deze reden werd de methode dan ook niet toegepast voor de Barbierbeek;

- lokaal toevoegen van “extra berging” (*additional storage*): bij deze methode blijven de *markers* als begrenzing van de rivierbedding behouden. De relatie die het verband weergeeft tussen de waterhoogte en de bijhorende oppervlakte van de dwarssectie wordt aangepast: aan elke waterhoogte *h* wordt een grotere oppervlakte *A* gekoppeld. Dit is te zien in tabel 20. Door deze kunstgreep kan er virtueel meer water geborgen worden in deze dwarssectie, terwijl de watervoerende breedte in het model niet verandert. Deze methode werd gebruikt voor het overstroombare gebied op de rechteroever van de Barbierbeek, net stroomafwaarts van de gewestweg;

Waterhoogte <i>h</i> (m TAW)	Oppervlakte <i>markers</i> (m²)	binnen	Toegevoegde oppervlakte (m²)		Totale oppervlakte <i>A</i> (m²)
			zonder	met	
0,88	0,0		0,0	0,0	0,0
1,08	0,2		0,0	0,0	0,2
1,28	0,5		0,0	0,0	0,5
1,48	1,0		0,0	0,0	1,0
1,68	1,6		0,0	0,0	1,6
1,88	2,3		0,0	0,0	2,3
2,08	3,0		0,0	0,0	3,0
2,29	3,8		0,0	0,0	3,8
2,49	4,7		0,0	0,0	4,7
2,69	5,8		0,0	1.024,0	1.029,8
2,89	7,4		0,0	3.584,0	3.591,4
3,09	9,2		0,0	13.312,0	13.321,2
3,29	11,2		0,0	26.880,0	26.891,2
3,49	13,3		0,0	34.560,0	34.573,3
3,69	15,3		0,0	39.680,0	39.695,3
3,89	17,4		0,0	40.960,0	40.977,4
4,09	19,5		0,0	43.008,0	43.027,5
4,29	21,5		0,0	44.800,0	44.821,5
4,49	23,6		0,0	47.104,0	47.127,6
4,69	25,7		0,0	48.384,0	48.409,7
4,90	27,8		0,0	48.896,0	48.923,8
5,10	29,8		0,0	49.920,0	49.949,8
5,30	31,9		0,0	50.688,0	50.719,9

5,50	34,0	0,0	50.944,0	50.978,0
5,70	36,1	0,0	51.968,0	52.004,1
5,90	38,1	0,0	52.736,0	52.774,1
6,10	40,2	0,0	52.992,0	53.032,2
6,30	42,3	0,0	53.248,0	53.290,3

Tabel 20 : Voorbeeld aanpassing van de h/A-relatie door toevoeging additional storage

- aankoppelen van overstromingsgebieden via link channels: op bepaalde plaatsen kan een eenvoudige verbinding of *link channel* gemaakt worden tussen de rivier en de vallei. Deze *link channels* functioneren als een eenvoudige overlaat en worden gekenmerkt door volgende parameters:
 - drempelniveau van de overlaat. Op het moment waarop het waterpeil in de rivier dit niveau overstijgt, stroomt er water naar de vallei;
 - lengte;
 - coëfficiënten voor wrijvingsverliezen, o.a. bodemruwheid;
 - geometrie. De geometrie wordt als uniform beschouwd voor de volledige lengte van de *link channel*;
 - Q/h-relatie van de overlaat, berekend op basis van voorgaande informatie.

In realiteit zal een rivier bij hoge waterstanden op een bepaalde plaats overstromen, waardoor de aangrenzende vallei vanaf dat punt gevuld wordt. Eenmaal de hoogwatersituatie voorbij is, zal het water uit de vallei langzaam terugstromen naar de rivier. Dit gebeurt echter niet noodzakelijk via het zelfde punt als waar de overstroming optrad. Vaak stroomt het water terug in de rivier via een laag gelegen punt dat zich meer stroomafwaarts bevindt. In het hydraulisch model wordt om deze reden elk overstromingsgebied aangekoppeld via **twee link channels**. Bij de naamgeving wordt de meest stroomopwaartse *link channel* aangeduid met een “a”, terwijl de meest stroomafwaartse wordt aangeduid met een “b”. Om de doorstroming in het hydraulisch model te verzekeren, wordt elk *a-link channel* verbonden met het bijhorende *b-link channel*. In tabel 21 is voor elk *link channel* de belangrijkste informatie aangegeven (verbindingspunt met de Barbierbeek, verbinding met andere *link channels*). Er wordt een standaardlengte van 50 m gebruikt, en de overlaten zijn 5 m breed. De drempelhoogte van de overlaat wordt bepaald door op een lengteprofiel van de oevers van de Barbierbeek manueel het laagste punt op te zoeken.

Om de berging van een bepaald volume water in de vallei te simuleren wordt aan het stroomafwaartse uiteinde van elk *a-link channel* een bepaald bergingsvolume toegekend onder vorm van een h/A-relatie. Dergelijke relatie, die de overstroomba-

re oppervlakte (A) weergeeft bij toenemende hoogteligging (h), wordt afgeleid uit het DTM dat voor de overstroombare gebieden werd opgemeten.

In tabel 21 is te zien dat het meest stroomafwaartse overstroombare gebied (nl. het GOG) aan de Barbierbeek gekoppeld wordt via de *link channels* “link_1_links_a” en “link_1_links_b” (Kruibekepolder) en “link_1_rechts_a” en “link_1_rechts_b” (Bazelpolder). In de scenario’s met een gevuld GOG (zie verder, hoofdstuk 5) werden deze beide *b-link channels* weggelaten, waardoor er in het hydraulisch model een open verbinding ontstaat tussen de Barbierbeek en het GOG. Deze verbinding werd terug gesloten door het opleggen van een afwaartse randvoorwaarde (een tijdreeks) waarin het verloop van de waterstand in het GOG wordt weergegeven.

Het overgrote deel van de overstroombare gebieden die in het hydraulisch model zijn opgenomen, zijn op deze manier ingebracht.

Naam	SOW ⁽³⁾	SOW <i>chainage</i> ⁽³⁾	SAW ⁽³⁾	SAW <i>chainage</i> ⁽³⁾
link_1_links_a	Barbierbeek	15660	link_1_links_b	50
link_1_links_b	Barbierbeek	16088		
link_1_rechts_a	Barbierbeek	16357	link_1_rechts_b	50
link_1_rechts_b	Barbierbeek	16864		
link_2_links_a	Barbierbeek	14148	link_2_links_b	50
link_2_links_b	Barbierbeek	14277		
link_2_rechts_a	Barbierbeek	14192	link_2_rechts_b	50
link_2_rechts_b	Barbierbeek	14330		
link_3_links_a	Barbierbeek	13268	link_3_links_b	50
link_3_links_b	Barbierbeek	13653		
link_3_rechts_a	Barbierbeek	13268		
link_3_rechts_b	Barbierbeek	13798	link_3_rechts_a	50
link_4_links_a	Barbierbeek	10930		
link_4_links_b	Barbierbeek	11591	link_4_links_a	50
link_4_rechts_a	Barbierbeek	10971	link_4_rechts_b	50
link_4_rechts_b	Barbierbeek	11465		
link_5_rechts_a	Barbierbeek	10064	link_5_rechts_b	50
link_5_rechts_b	Barbierbeek	10161		
link_6_rechts_a	Barbierbeek	9663	link_6_rechts_b	50
link_6_rechts_b	Barbierbeek	9775		

⁽³⁾ SOW = stroomopwaarts uiteinde *link channel*; SAW = stroomafwaarts uiteinde *link channel*; chainage = cumulatieve afstand (in m) vanaf meest stroomopwaartse punt hydraulisch model

link_7_links_a	Barbierbeek	7795	link_7_links_b	50
link_7_links_b	Barbierbeek	7998		
link_7_rechts_a	Barbierbeek	8352	link_7_rechts_b	50
link_7_rechts_b	Barbierbeek	8836		
link_8_links_a	Barbierbeek	6874		
link_8_links_b	Barbierbeek	6634	link_8_links_a	50
link_8_rechts_a	Barbierbeek	6683	link_8_rechts_b	50
link_8_rechts_b	Barbierbeek	6880		

Tabel 21 : Overzicht van de belangrijkste informatie over de link channels

Op deze manier werd dus het hydraulisch model – inclusief de overstroombare gebieden, vanaf nu kortweg *het hydraulisch model* genoemd, aangemaakt.

Berekeningen met het hydraulisch model leveren dus lagere waterstanden op in vergelijking met het model – versie mei 2002, omdat een deel van het watervolume aan de Barbierbeek wordt onttrokken om in de vallei geborgen te worden. De bijhorende overstromingskaarten moeten dus een realistischer beeld geven. De resultaten van deze modelberekeningen werden besproken met de Technische Diensten en/of Milieudiensten van de gemeentes Beveren, Temse en Kruibeke. De gemeente Kruibeke stelde ook een reeks foto's ter beschikking van de overstromingen, zoals ze zich voordeden in september 1998.

4.2.2 Verfijning hydrologisch model – versie mei 2002

Een vergelijking van de overstromingen, berekend met het hydraulisch model, en de terreinvaringen en de foto's toonde aan dat er op een aantal plaatsen nog steeds verschillen waren in overstroomde oppervlakte. Meer bepaald waren de berekende waterdieptes niet groot genoeg, en dus de overstromingen niet uitgestrekt genoeg. Dit wees erop dat het hydrologisch model, dat de input van water aan de stroomopwaartse randen van het hydraulisch model berekent, te weinig water door het hydraulisch model stuurde.

Bij de opmaak van het hydrologisch model (zie hoofdstuk 2) werd het model eerst zo geijkt, dat de volumes water in het model zo goed mogelijk met de realiteit overeenstemden. In tweede instantie werd gezorgd dat de hoogte van de pieken van berekeningen en metingen zo goed mogelijk waren. In de resultaten was te zien dat de gesimuleerde piekhoogtes lager waren dan de gemeten piekdebieten. Het fenomeen, dat bij het maken van de overstromingskaart gemerkt werd (te weinig water in het model), kan hierdoor verklaard worden.

Om dit probleem op te lossen werd de output van het hydrologisch model verhoogd. Uit een vergelijking van de berekeningen met de metingen ter hoogte van de Hollebeekhoeve, kon vastgesteld worden dat de verhouding tussen de hoogtes van de pieken

gemiddeld 2,25 is. Daarom werden de hydrologische resultaten voor september 1998 ook met die factor vermenigvuldigd in de periode waarin de piek zich voordeed. De overstromingskaart die op basis van deze invoer werd bekomen, stemt zeer goed overeen met de overstromingen die zich in werkelijkheid voordeden (zie 4.2.3).

Om die redenen werden voor alle verdere berekeningen ook alle invoerhydrogrammen (per terugkeerperiode en per hydrologisch bekken) in de periode waarin de piek zich voordeed met een factor 2,25 vermenigvuldigd.

4.2.3 Resultaat verfijning

De aanpassing van zowel het hydraulisch model als de resultaten van het hydrologisch model zorgde ervoor dat de berekende overstromingen heel wat beter overeenkwamen met de vastgestelde overstromingen op het terrein. In figuur 62, figuur 63 en figuur 64 worden de algemene overstromingskaart en enkele details eruit voorgesteld, die voor de situatie 1998 berekend werden met de verfijnde modellen. Voor deze berekeningen werd ook de bres, die in de zuidelijk dijk van de Barbierbeek in het GOG werd gemaakt, mee gesimuleerd.

4.3 Besluit

De geijkte hydraulische en hydrologische modellen werden gekoppeld getoetst en verder verfijnd. Het hydraulisch model werd uitgebreid met de overstroombare gebieden langs de vallei. De hydrogrammen en piekhoogtes die met het hydrologisch model worden berekend, werden verbeterd.

De resultaten die met deze gekoppelde definitieve modellentrein worden bekomen, stemmen zeer goed overeen met de situatie die op het terrein is voorgekomen.

5 SCENARIO-ANALYSE

5.1 Scenario's

5.1.1 Inleiding

Om de huidige problemen met wateroverlast op te lossen en om de effecten van de werking van het GOG KBR op het afvoerregime van de Barbierbeek te kennen, werden in deze studie een aantal scenario's doorgerekend. Enerzijds werd daarbij gevarieerd in de opgelegde randvoorwaarden aan de randen van de Barbierbeek-model. Anderzijds werd ook onderzocht welke kunstmatige ingrepen konden doorgevoerd worden om de wateroverlast, die in bepaalde situaties kan optreden, te voorkomen. In dit hoofdstuk wordt een uitvoerige omschrijving gegeven van zowel de randvoorwaarden als de ingrepen.

5.1.2 Randvoorwaarden

5.1.2.1 Opwaartse randvoorwaarden

Voor de opwaartse randvoorwaarden (neerslaginvoer) werd uitgegaan van de norm die door de Provincie Oost-Vlaanderen en ook door AMINAL Afdeling Water wordt vooropgesteld voor de beveiliging van waterlopen van 1^{ste} en 2^{de} categorie. Er werd een debietaanvoer ingegeven waarvan de piekhoogte een terugkeerperiode van 25 jaar heeft. De vorm van de piek is gebaseerd op de gebeurtenis van september 1998. Het extreme karakter van deze gebeurtenis werd mee veroorzaakt door de duur ervan: er werden 3 dagen van aanhoudende neerslag genoteerd.

Daarnaast werden een aantal scenario's ook eens doorgerekend met een opwaartse piekhoogte met een terugkeerperiode van 50 jaar. De hoogte van deze piek stemt goed overeen met de piekhoogte die voor de periode van september 1998 met de hydrologische modellen werd berekend.

Er werd ook rekening gehouden met de (toekomstig) gerioleerde zones in het bekken, zoals voorgesteld in hoofdstuk 2. Hierdoor komt de neerslag die op deze gerioleerde zones valt, onmiddellijk in de gemodelleerde rivier terecht. Op die manier werden er rioleringsoverstorten aan het model gekoppeld in Haasdonk en Kruikeke. Een overzicht van deze gerioleerde zones wordt gegeven in hoofdstuk 2 (2.1.1).

5.1.2.2 Afwaartse randvoorwaarden

Als afwaartse randvoorwaarde in de Schelde en het GOG werden 5 situaties gesimuleerd:

- I. normaal getij op de Schelde waarbij er geen Scheldewater in het GOG komt. Er is dus een normale afvoer van Barbierbeekwater naar de Schelde tijdens laagwater;
- II. gevuld GOG n.a.v. een getij/maximale tijhoogte in Antwerpen met een terugkeerperiode van 20 jaar;
- III. gevuld GOG n.a.v. een getij/maximale tijhoogte in Antwerpen met een terugkeerperiode van 50 jaar;
- IV. gevuld GOG n.a.v. een getij/maximale tijhoogte in Antwerpen met een terugkeerperiode van 100 jaar;
- V. gevuld GOG n.a.v. een getij/maximale tijhoogte in Antwerpen met een terugkeerperiode van 500 jaar.

Om de afwaartse randvoorwaarde (de waterstand in het GOG) te kunnen bepalen bij verschillende stormcondities was een berekening met een ander model nodig, dat het effect van de Schelde op het GOG kan berekenen. Hiervoor werd gebruik gemaakt van het bestaande numeriek model van de Schelde, dat opgemaakt werd door het Waterbouwkundig Laboratorium. Dit model werd in 2002 geactualiseerd⁽ⁱⁱⁱ⁾.

Er is gebruik gemaakt van de werking die voor de Barbierbeek de minst gunstige gevolgen had: voor de situaties met een gevuld GOG werd uitgegaan van een stormtij met een duur van 3 opeenvolgende tijcycli. Dit is de maximum duur die in 100-jarige meetreeks werd geregistreerd. Een stormtij met zo'n lange duur deed zich in de laatste 100 jaar 4 keer voor. Door de langdurige vulling van het GOG is de natuurlijke afvoer van de Barbierbeek naar het GOG gedurende een lange periode niet of slechts beperkt mogelijk.

De hoogte van het laagwater na de eerste piek is 3 m TAW. Een laagwater met dergelijke hoogte deed zich slechts 1 keer voor in de 100-jarige meetreeks (2 februari 1953). Dit betekent dat er ook bij laagwater geen afwatering naar de Schelde mogelijk is.

De kruin van de overloopdijken langs de Schelde bevindt zich op 6,80 m TAW.

De afwaartse randvoorwaarden zijn dus extreem gekozen, niet enkel omwille van de hoge hoogwaterstanden, maar ook omwille van de lange duur van het opgelegde stormtij en omwille van het hoge laagwater.

5.1.2.3 Gezamenlijke kans van voorkomen

Door combinaties van opwaartse en afwaartse randvoorwaarden, die elk een bepaalde terugkeerperiode hebben, treden gebeurtenissen op waarvan de gezamenlijke terugkeerperiode kan verschillen van de terugkeerperiode van de afzonderlijke gebeurtenissen. Deze gezamenlijke terugkeerperiode wordt bepaald door de graad van afhankelijkheid van de twee afzonderlijke gebeurtenissen. In het geval beide gebeurtenissen volledig on-afhankelijk zijn, wordt de gezamenlijke terugkeerperiode gevormd door het

produkt van de twee afzonderlijke terugkeerperiodes. Bij gedeeltelijke afhankelijkheid zal de gezamenlijke terugkeerperiode zich 'ergens' tussen de afzonderlijke terugkeerperiodes van elke gebeurtenis en het product van beide situeren. Deze theoretische beschouwingen worden voor het geval van de Barbierbeek geïllustreerd in tabel 22.

Randvoorwaarden	Afzonderlijke terugkeerperiode	Volledig onafhankelijk
Neerslaginvoer 1/25 jaar	25 jaar	25 x 20 = 500 jaar
Stormtij in Antwerpen 1/20 jaar	20 jaar	
Neerslaginvoer 1/25 jaar	25 jaar	25 x 50 = 1250 jaar
Stormtij in Antwerpen 1/50 jaar	50 jaar	
Neerslaginvoer 1/25 jaar	25 jaar	25 x 100 = 2500 jaar
Stormtij in Antwerpen 1/100 jaar	100 jaar	
Neerslaginvoer 1/25 jaar	25 jaar	25 x 500 = 12500 jaar
Stormtij in Antwerpen 1/500 jaar	500 jaar	

Tabel 22 : Maximale terugkeerperiode (jaar) voor verschillende randvoorwaarden bij totale afhankelijkheid en totale onafhankelijkheid van stormtij en extreme neerslag

Zoals reeds vermeld in hoofdstuk 2 (2.3) wijst een studie^(vi) uit dat er enerzijds geen volledige afhankelijkheid is tussen stormtij op de Schelde en extreme debieten op een zijbeek (vergelijkbaar met de Barbierbeek). Beide gebeurtenissen komen dus zeker niet altijd samen voor. Anderzijds werd ook de hypothese van volledige onafhankelijkheid verworpen, omdat het gemiddeld bovendebiet tijdens een stormtij iets hoger blijkt te liggen (zonder extreme waarden aan te nemen). Deze beperkte graad van afhankelijkheid laat vermoeden dat de werkelijke gezamenlijke terugkeerperiode eerder in de richting van de volledig onafhankelijke situatie zal gaan. Voor de situaties waarin een afwaartse randvoorwaarde met een terugkeerperiode van 20 jaar of meer gebruikt wordt, kan verwacht worden dat de gezamenlijke terugkeerperiode zal variëren van enkele honderden tot enkele duizenden jaren.

Losstaand van hun terugkeerperiode hebben de opgelegde randvoorwaarden op zichzelf al een extreem karakter:

- de opwaartse randvoorwaarde is het resultaat van **drie opeenvolgende dagen van aanhoudende regen** (13 – 14 - 15/09/1998). Omdat in de periode die hieraan vooraf ging (vanaf 20/08/1998) ook al relatief veel neerslag gevallen was, trad er een verzadiging van de bodem op, waardoor de neerslag van half september zich snel liet voelen in de Barbierbeek;
- ook de afwaartse randvoorwaarde is extreem, omdat ze bestaat uit een **opeenvolging van 3 hoge hoogwaterstanden**, waarbij het **laagwater** na de eerste hoogwaterpiek **niet lager zakt dan 3 m TAW**. Hierdoor kan het gevulde GOG slechts in beperkte mate geleegd worden in de Schelde;

- de randvoorwaarden worden voor de berekeningen zodanig gecombineerd dat de piek van de bovenafvoer **samenvalt** met de grootste hoogwaterpiek in het GOG. De kans dat deze twee gebeurtenissen in realiteit samen voorkomen is niet groot (cfr. voorgaande alinea).

Tot slot is de aanvoer van neerslag via de riooloverstorten, die op twee plaatsen in het model werden aangekoppeld, zodanig dat de neerslag van die gebieden ogenblikkelijk in het model terecht komt.

Uit bovenstaande argumentatie – de beperkte afhankelijkheid van de gebeurtenissen, het extreem karakter van de opgelegde randvoorwaarden en de snelle neerslagtoevoer via riooloverstorten –**blijkt duidelijk dat de resultaten van de uitgevoerde berekeningen een grote veiligheidsmarge inhouden.**

5.1.3 Ingrepen

5.1.3.1 Algemeen

Om in bepaalde situaties wateroverlast te voorkomen, werd van volgende ingrepen het effect op de optredende waterpeilen nagegaan:

- een terugslagklep in de ringdijk (zie 5.1.3.2);
- de afgraving van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG (zie 5.1.3.3);
- voorzien van bergingsmogelijkheid stroomopwaarts van de ringdijk (zie 5.1.3.4);
- aanpassen van een aantal duikers (zie 5.1.3.5);
- voorzien van bergingsmogelijkheid stroomopwaarts de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat (zie 5.1.3.7).
- het pompen van water vanuit de Barbierbeek naar het GOG (zie 5.1.3.8).

Elke ingreep werd zowel beoordeeld op zijn afzonderlijk effect als het effect in combinatie met andere ingrepen. In figuur 65 wordt een schematisch overzicht gegeven van alle bestudeerde ingrepen.

5.1.3.2 Plaatsen van een terugslagklep in de ringdijk

In tegenstelling tot alle volgende ingrepen is de terugslagklep in de ringdijk de enige ingreep die in elk scenario werd ingebouwd. Deze terugslagklep (*chainage* 15.211 m) verhindert elke terugstroming van water vanuit (het gedeelte van de Barbierbeek in) het GOG naar de Barbierbeek stroomopwaarts de ringdijk. Van zodra het waterpeil stroomafwaarts de ringdijk (*chainage* 15.660 m) hoger is dan stroomopwaarts de ringdijk (*chainage* 15.100 m), wordt de terugslagklep in het model gesloten. Indien het GOG niet gevuld is (normaal getij), heeft deze terugslagklep geen enkel effect op het regime van de Barbierbeek.

5.1.3.3 Afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG

In een studie van het Instituut voor Natuurbehoud (IN) ^(vi) werden een aantal inrichtingsvarianten nagegaan om de Barbierbeek op te nemen in het GOG. Eén van de voorgestelde mogelijkheden was het afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG. In geval van een niet gevuld GOG kan het Barbierbeekwater, dat niet in de Schelde geloosd kan worden, tijdelijk gestockeerd worden in het deel van het GOG ten noorden van de Barbierbeek. Op terrein is dit gebied bekend als de Krui-beekse polder.

In het rapport van het IN ^(vi) wordt voorgesteld om de noordelijke dijk af te graven tot op een niveau van 2,50 m TAW. In het hydraulisch model wordt deze aanpassing uitgevoerd door van *link channels* "link_1_links_a" en "link_1_links_b" (zie tabel 21 in hoofdstuk 4) de overlaat te verbreden van 5 m naar 1300 m, en door het niveau van de overlaat te verlagen van 4,00 m TAW naar 2,50 m TAW.

5.1.3.4 Voorzien van bergingsgebied opwaarts de ringdijk

Bovenvermelde studie van het IN ^(vi) bespreekt de mogelijkheid om stroomopwaarts van de ringdijk, en stroomafwaarts van de gewestweg N419, een gebied te reserveren voor de opvang van Barbierbeekwater op momenten waarin de afvoer belemmerd wordt door een gesloten terugslagklep in de ringdijk. Afhankelijk van de hoogte van de dijken langs de Barbierbeek, kan het gebied een oppervlakte hebben tussen 14,50 ha en 5,25 ha ^(vi).

In voorliggende studie is meer in detail bekeken wat het effect van zo'n bergingsgebied is. Daartoe werd een mogelijk gebied afgebakend met een oppervlakte van ongeveer 12 ha. Om ook het effect van de grootte van het bergingsgebied te kennen, werden situaties doorgerekend waarbij het bergingsgebied een grotere oppervlakte heeft. Uit de eerste berekeningen bleek dat realistische waterhoogtes in het bergingsgebied konden oplopen tot ongeveer 4,7 m TAW. Daarom werd het gebied van 12 ha uitgebreid tot een gebied van 16 ha (op basis van de hoogtelijn van 4,5 m TAW). In het westen bakent de natuurlijke helling dit gebied af. In het oosten vormt de ringdijk van het GOG de grens. In het noorden, waar het gebied door bebouwing wordt begrensd, is een dijk nodig tot 5 m TAW, ten zuiden van de Nieuwe Gaanweg. Deze dijk heeft in het zuid-oosten (waar hij aansluit aan de ringdijk van het GOG) een hoogte van ongeveer 3,7 m. In het noordwesten eindigt hij waar de helling van de cuesta op een hoogte van 5 m TAW komt. De dijk heeft dan een lengte van 170 m. Dit gebied wordt voorgesteld in figuur 66. Daarnaast werd ook het effect onderzocht van het verder vergroten van de oppervlakte tot resp. 24 en 36 ha, waardoor dus ook de bergingsvolumes groter worden (zie verder onder 5.1.3.5). Uit de berekeningen bleek dat de meerwaarde van een vergroting tot 36 ha eerder beperkt was.

Zoals gezegd was het afgebakende gebied slechts één mogelijkheid. Op vraag van de Werkgroep "Integraal Waterbeheer van de Barbierbeek" (getrokken door de Provincie Oost-Vlaanderen) werd ook onderzocht wat het effect is van het verschuiven van dit bergingsgebied in stroomafwaartse richting. De resultaten van dit extra onderzoek worden besproken in paragraaf 5.2.4.

In het hydraulisch model werd het bergingsgebied aan de Barbierbeek aangekoppeld via twee *link channels*, nl. "link_scen_a" en "link_scen_b". De overlaten van deze twee *link channels* hebben een breedte van 50 m. Er werden situaties doorgerekend waarbij de drempel van beide *link channels* naar het noordelijke deel ofwel op 4,0 m TAW ofwel op 3,0 m TAW gelegen is. Uiteindelijk is de overloophoogte van 3,0 m TAW de meest efficiënte gebleken.

Volgende combinaties van oppervlaktes en dijkhoogtes worden in het hydraulisch model bekeken:

- bergingsgebied met oppervlakte ± 12 ha, met Barbierbeekdijk op 4,0 m TAW;
- bergingsgebied met oppervlakte ± 12 ha, met Barbierbeekdijk op 3,0 m TAW;
- bergingsgebied met oppervlakte ± 16 ha, met Barbierbeekdijk op 4,0 m TAW;
- bergingsgebied met oppervlakte ± 16 ha, met Barbierbeekdijk op 3,0 m TAW;
- bergingsgebied met oppervlakte ± 24 ha, met Barbierbeekdijk op 4,0 m TAW;
- bergingsgebied met oppervlakte ± 24 ha, met Barbierbeekdijk op 3,0 m TAW;
- bergingsgebied met oppervlakte ± 36 ha, met Barbierbeekdijk op 4,0 m TAW;
- bergingsgebied met oppervlakte ± 36 ha, met Barbierbeekdijk op 3,0 m TAW;

5.1.3.5 Uitbreiding van het mogelijke bergingsgebied

Het bergingsgebied met oppervlakte van 16 ha komt overeen met een bergingsvolume van 294.140 m³. Uitbreiding naar een gebied met 24 ha komt overeen met een verruiming van het bergingsvolume tot 440.284 m³. Een andere mogelijkheid is een gedeeltelijke afgraving van de cuesta. In het hypothetisch geval waarin op het gebied van 16 ha een rechthoekige bak zou uitgegraven worden, kan een bergingsvolume van ongeveer 700.000 m³ bekomen worden. Hier zijn echter wel bedenkingen te maken over de stabiliteit van de uitgraving.

De exacte ligging van de gebieden met een vergrootte bergingsoppervlakte (resp. 24 en 36 ha) werden in deze studie niet bepaald. Wel is het zo dat het vergroten van de oppervlakte van het bergingsgebied, zoals hierboven besproken, betekent dat een deel van het GOG als berging voor de Barbierbeek moet dienen.

5.1.3.6 Verwijden van de duikers ter hoogte van de gewestweg

De Barbierbeek stroomt onder de Oude Kruibekestraat en de gewestweg (N419) door twee gemetste duikers met een boogvormige dwarsdoorsnede (zie figuur 67). De vorm van de duikers zorgt voor een ernstige vernauwing van de doorstroomsectie, wat in bepaalde situaties voor de nodige opstuwing van het waterpeil in de Barbierbeek kan zorgen (zie o.a. ^(vi)). In figuur 68 is te zien dat de duikers ervoor zorgen dat de dwars-

sectie met respectievelijk een factor 0,47 (Oude Kruibekestraat) en 0,43 (N419) verkleind wordt.

In het hydraulisch model worden deze twee knelpunten op drastische wijze opgelost door de twee duikers op die plaats te verwijderen. Eveneens worden de twee bijhorende overlaten (cfr. hoofdstuk 3 – paragraaf 3.1.5.2) weggelaten. Door deze ingreep wordt de dwarssectie van de Barbierbeek t.h.v. de twee duikers even groot gemaakt als de dwarssectie van de Barbierbeek net stroomopwaarts en stroomafwaarts van de duikers. Door deze ingreep in het model wordt dus niets veranderd aan de breedte van de Barbierbeek zelf.

Om op terrein hetzelfde effect te bekomen worden volgende ingrepen voorgesteld:

- aanpassen van de duiker onder de gewestweg, door een nieuwe brug te plaatsen, waarbij het brugdek de volledige bedding van de Barbierbeek overspant, i.p.v. een beperkte breedte zoals nu het geval is. De doorstroomsectie heeft bij voorkeur verticale wanden, en het huidige bodemverloop van de Barbierbeek blijft behouden, om bijkomende opstuwing te voorkomen;
- de duiker onder de Oude Kruibekestraat kan op gelijkaardige manier aangepast worden. Men kan zich echter de vraag stellen of het noodzakelijk is om deze duiker te behouden. Door de constructie volledig te verwijderen, kunnen alle opstuwingsproblemen hier immers vermeden worden. De bereikbaarheid van de huizen die op de Oude Kruibekestraat uitgeven komt hierdoor niet in het gedrang, aangezien deze straat bereikbaar blijft via de gewestweg N419.

5.1.3.7 Opstuwen van water opwaarts van de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat

In het hydraulisch model wordt de mogelijkheid voorzien om water op te sparen stroomopwaarts van de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat. Hiervoor wordt een regelbare (overstortende) stuw geplaatst op de Barbierbeek t.h.v. de Kemphoek. Bij hoge afvoer op de Barbierbeek (in combinatie met een gevuld GOG; zie 5.1.4) zorgt deze constructie ervoor dat het water wordt opgestuwd tot op een hoogte van 7,0 m TAW. Om te vermijden dat het opgestuwde water zijdelings langs de vallei naar de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat stroomt, is het nodig om ook aan weerszijden van de Barbierbeek (dwars op de vallei) een dijk te voorzien. In figuur 69 wordt aangegeven waar deze stuw en dijken voor de berekening ingevoegd waren, en waar ze op het terrein zouden kunnen geplaatst worden. Voor de keuze van de mogelijke locatie op het terrein werd rekening gehouden met de hoogteligging, het landgebruik en het gebied dat als beschermd landschap werd geklasseerd. De hoogte van deze dijken werd op 7.20 m TAW ingesteld.

De situaties waarin de regelbare stuw in werking wordt gesteld, zijn afhankelijk van de waarde van twee parameters. De eerste parameter is de toestand van de terugslagklep in de ringdijk. De tweede parameter is het waterpeil stroomopwaarts de gewestweg N419 (*chainage* 14.500 m). Dit waterpeil wordt verder "stuw-waakpeil" genoemd. Eenmaal de stuw in werking wordt gesteld, wordt het bovenpeil van de stuwklep geregeld op basis van het debiet dat t.h.v. de Hollebeekhoeve gemeten wordt. Hoe hoger het

debiet, hoe lager het bovenpeil van de stuwklep moet staan om het water op te stuwen tot op 7,0 m TAW. In tabel 23 wordt de werking van de regelbare stuw verduidelijkt. tabel 24 geeft aan hoe de stand van de stuw wordt geregeld i.f.v. het gemeten debiet. Bij de berekeningen wordt ook het effect van verschillende stuw-waakpeilen bestudeerd. De onderzochte waarden zijn weergegeven in tabel 25.

	Terugslagklep OPEN	Terugslagklep DICHT
Waterpeil ONDER stuw-waakpeil	geen stuwwerking	opstuwning (cfr. tabel 24)
Waterpeil BOVEN stuw-waakpeil	opstuwning (cfr. tabel 24)	opstuwning (cfr. tabel 24)

Tabel 23 : Overzicht situaties waarin de regelbare stuw in werking treedt

Debiet Hollebeekhoeve (m³/s)	Stuwpeil (m TAW)
0,000	7,00
2,340	6,50
6,600	6,00
13,200	5,50
20,800	5,00
29,100	4,50
38,200	4,00
48,100	3,50

Tabel 24 : Detailregeling van de stuw op basis van gemeten debiet

Versie	Ingesteld stuw-waakpeil (m TAW)
versie a	5,35
versie b	4,50
versie c	4,35
versie d	3,50

Tabel 25 : Onderzochte waarden voor het stuw-waakpeil (m TAW)

Indien na een periode van hoogwater in het GOG (en dus gesloten terugslagklep) de terugslagklep zich terug opent, blijft de stuw nog een tijdje in werking, totdat het waterpeil stroomopwaarts de gewestweg N419 onder het stuw-waakpeil gezakt is. Dit is om wateroverlast, als gevolg van een plotse lozing van het hele bekken stroomopwaarts Bazel, te voorkomen.

Aangezien de regelbare stuw enkel in werking treedt in situaties met een gevuld GOG – dus waarbij de terugslagklep in de ringdijk gesloten is – zal bij de scenarioberekenin-

gen het effect van de regelbare stuw niet onderzocht worden in de situatie waarbij zich een normaal getij (en ongevuld GOG) voordoet op de Schelde.

Uit de berekeningen is gebleken dat een optimale stuwregeling bereikt wordt als het stuwpeil wordt ingesteld op 4,50 m TAW (= versie b uit tabel 25).

5.1.3.8 Pompen van water vanuit de Barbierbeek naar het GOG

De laatste ingreep die met het hydraulisch model werd doorgerekend, is het gebruik van een pomp om wateroverlast te voorkomen/verminderen. Hiervoor werd een pomp-gemaal voorzien aan de ringdijk, waarbij in bepaalde situaties water uit de Barbierbeek (stroomopwaarts de ringdijk) rechtstreeks naar het GOG (Kruibekepolder) wordt gepompt. Het opstarten van het pomp-gemaal werd bepaald door de stand van de terugslagklep en het waterpeil stroomopwaarts de gewestweg (*chainage* 14.250 m), verder “pomp-waakpeil” genoemd. tabel 26 en tabel 27 geven de gebruikte versies voor de werking van het pomp-gemaal. Het pomp-waakpeil wordt ook gebruikt voor de regeling van het pomp-debiet. In tabel 28 en tabel 29 zijn de gebruikte debietregelingen weergegeven.

In het hydraulisch model werd voor de plaatsing van het pomp-gemaal een extra rivier-tak (pompkanaal) voorzien die vanuit de Barbierbeek over de ringdijk naar het GOG leidt. Op deze riviertak werden het pomp-gemaal voorzien, en stroomafwaarts ervan een duiker (waarin enkel stroming in stroomafwaartse richting toegelaten is). Deze duiker – die enkel noodzakelijk is in het hydraulisch model, niet in realiteit – dient om terugstroming vanuit het GOG via het pomp-gemaal naar de Barbierbeek te voorkomen. Aan het stroomafwaartse einde van het pompkanaal werd d.m.v. een h/A-relatie een extra bergingsvolume gekoppeld (Kruibekepolder) (cfr. hoofdstuk 4, paragraaf 4.2.1).

Uit de berekeningen is gebleken dat een optimale pompwerking verkregen wordt wanneer gewerkt wordt met de voorwaarden zoals omschreven in versie 2 (zie tabel 27) en bij een pomp-waakpeil zoals omschreven in versies a en b (zie tabel 29).

	Terugslagklep OPEN	Terugslagklep DICHT
Waterpeil ONDER pomp-waakpeil	niet pompen	niet pompen
Waterpeil BOVEN pomp-waakpeil	niet pompen	pompwerking (cfr. tabel 28)

Tabel 26 : Overzicht van de werkingsvoorwaarden voor het pomp-gemaal – versie 1

	Terugslagklep OPEN	Terugslagklep DICHT
Waterpeil ONDER pomp-waakpeil	niet pompen	pompwerking (cfr. tabel 29)
Waterpeil BOVEN pomp-waakpeil	pompwerking (cfr. tabel 28)	pompwerking (cfr. tabel 29)

Tabel 27 : Overzicht van de werkingsvoorwaarden voor het pomp-gemaal – versie 2

Pomp-waakpeil (m TAW)	pompdebiet (m³/s)
0,00	0
3,95	0
4,00	5
10,00	10
15,00	10

Tabel 28 : Regeling van het pompdebiet i.f.v. het pomp-waakpeil – versie a

Pomp-waakpeil (m TAW)	pompdebiet (m³/s)
0,00	0
3,50	0
3,60	5
7,00	5

Tabel 29 : Regeling van het pompdebiet i.f.v. het pomp-waakpeil – versie b

5.1.4 Overzicht onderzochte combinaties

De hierboven omschreven ingrepen werden onderzocht op hun effect op de optredende waterpeilen. Verschillende scenario's erden doorgerekend, waarbij telkens één of meerdere ingrepen worden toegepast, in combinatie met bepaalde stroomopwaartse en stroomafwaartse randvoorwaarden.

In Bijlage A wordt van elk scenario een korte omschrijving gegeven, naast de gebruikte randvoorwaarden. In paragraaf 5.2 zullen van een (beperkt) aantal scenario's de belangrijkste resultaten besproken worden. Er zijn verschillende mogelijke oorzaken waarom niet alle scenario's afzonderlijk besproken worden:

- *tussenresultaat bij optimalisatie ingreep*: bij het zoeken naar de optimale werking van een ingreep werden verschillende instellingen uitgeprobeerd, waarvan sommige echter niet efficiënt zijn of geen meerwaarde bieden aan de oplossing;
- *berekening uitgevoerd – weinig effect*: van sommige ingrepen is het effect onder bepaalde omstandigheden heel miniem tot onbestaand, waardoor een afzonderlijke bespreking onnodig is. Het spreekt voor zich dat het effect van de ingreep wel besproken wordt wanneer er, in combinatie met andere ingrepen, een duidelijke verandering wordt veroorzaakt;
- *berekening niet uitgevoerd*: na vergelijking van een eerste reeks scenario's (1 t.e.m. 31) blijkt dat de resultaten van de berekeningen, en dus ook de effecten van

de verschillende ingrepen bijna niet verschillen in de gevallen waarbij een stroomafwaartse randvoorwaarde met een terugkeerperiode van 50, 100 of 500 jaar gebruikt wordt. Dit komt omdat in deze gevallen de periode waarin de terugslagklep gesloten is, ongeveer even lang is. De stroomafwaartse randvoorwaarden verschillen onderling enkel in de maximale hoog- en laagwaterstanden die optreden in het GOG. Eenmaal het maximale laagwaterpeil niet meer onder een bepaalde waarde daalt, blijft de terugslagklep gesloten. Voor de afvoer van de Barbierbeek is het dan van geen belang meer hoe hoog juist dit maximale laagwaterpeil is, en dus speelt ook de terugkeerperiode van de stroomafwaartse randvoorwaarde geen rol meer. Om deze reden worden bij de rest van de scenario's (32 t.e.m. 44) de berekeningen met een terugkeerperiode van respectievelijk 50 jaar en 500 jaar achterwege gelaten. In de bespreking hieronder worden dus enkel de resultaten bij een normaal getij en bij een getij/maximale tijhoogte in Antwerpen met terugkeerperiodes van 20 en 100 jaar behandeld.

Bijlage A bevat volgende informatie:

- kolom 1* volgnummer scenario;
- kolom 2* codering van de bestudeerde ingreep of combinatie van ingrepen. Volgende codering wordt gebruikt:
- A:** geen ingrepen;
 - B:** afgraven van noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG;
 - C:** voorzien van een bergingsgebied (met bepaalde drempelhoogte) opwaarts de ringdijk;
 - D:** opstuwen van water opwaarts van de dorpskern van Bazel (met bepaald stuw-waakpeil);
 - E:** pompen van water vanuit de Barbierbeek naar het GOG;
 - G:** Verwijden van de duikers ter hoogte van de gewestweg.
- kolom 3* omschrijving van de bestudeerde ingreep of combinatie van ingrepen;
- kolom 4* gebruikte stroomopwaartse randvoorwaarde. Een "T" geeft aan dat het scenario doorgerekend werd met een opwaartse randvoorwaarde met een terugkeerperiode van 25 jaar. Andere opwaartse randvoorwaarden worden gespecificeerd;
- kolom 5* gebruikte stroomafwaartse randvoorwaarden. Een "X" geeft aan dat de berekening werd uitgevoerd, de vermelding "5.x..x.x" slaat op het nummer van de paragraaf onder 5.2 waarin het resultaat van het overeenkomstige scenario wordt besproken.

5.2 Bespreking resultaten

Voor de bespreking worden de resultaten opgesplitst volgens de afwaartse randvoorwaarden (normaal getij, gevuld GOG n.a.v. een getij/maximale tijlhoogte in Antwerpen met een terugkeerperiode van 20 jaar, gevuld GOG n.a.v. een getij/maximale tijlhoogte in Antwerpen met een terugkeerperiode van 100 jaar). De besproken situaties zijn steeds extremer. In de studie is voor elke situatie naar een oplossing gezocht. Hierbij werd ook getracht aan te geven wat op het terrein de consequenties zullen zijn van de verschillende maatregelen. Om een keuze te maken van de effectief te nemen maatregelen moet daarnaast ook rekening gehouden worden met de kans op voorkomen van de situatie waarvoor de maatregel voorgesteld wordt, de kost van de voorgestelde ingreep, de schade die de overstromingen met zich meebrengen, het ongemak dat door de ingreep uit te voeren op andere plaatsen wordt gecreëerd, ...

De resultaten van de berekeningen met een gevuld GOG n.a.v. een getij/maximale tijlhoogte in Antwerpen met een terugkeerperiode van 50 jaar en een gevuld GOG n.a.v. een getij/maximale tijlhoogte in Antwerpen met een terugkeerperiode van 500 jaar worden niet bijkomend besproken. Om redenen vermeld in paragraaf 5.1.4 verschillen ze niet significant van de resultaten bekomen met een gevuld GOG n.a.v. een getij/maximale tijlhoogte in Antwerpen met een terugkeerperiode van 100 jaar.

Om de voorstelling overzichtelijk te houden, zullen niet alle berekende scenario's, die in paragraaf 5.1.4 worden vermeld, besproken worden. Enkel die ingrepen of combinaties van ingrepen die resulteren in een redelijke daling op de maximale waterstanden, worden besproken.

De resultaten zullen op twee manieren grafisch worden voorgesteld. Ten eerste worden d.m.v. grafieken de lijn van de maximale waterstanden in het stroomafwaartse deel van de Barbierbeek weergegeven. Daarbij wordt onder bepaalde randvoorwaarden het effect van bepaalde maatregelen telkens vergeleken met een situatie zonder ingrepen, maar met dezelfde randvoorwaarden. Bij deze grafieken willen we wijzen op het grote verschil in schaal tussen de X- en Y-as, waardoor het verhang van de waterlijn overdreven (maar daarom niet minder correct!) wordt voorgesteld. Ten tweede wordt ook het effect van de maatregelen op overstromingen voorgesteld d.m.v. overstromingskaarten.

Bij het bekijken van de resultaten vallen een aantal zaken op. Volgende algemene bevindingen werden gemaakt:

- de Barbierbeek gebruikt bij was de volledige afwaartse vallei. Dit betekent dat bij het zoeken naar oplossingen weinig extra bergingsmogelijkheden gevonden konden worden in de vallei. Het grootste deel van de vallei overstroomt immers al in de huidige toestand. Er moesten dus ook andere oplossingen gezocht worden. Dit gebeurde o.a. door de bergingshoeveelheid op verschillende plaatsen te beïnvloeden (door het plaatsen van de stuw opwaarts Bazel) of door te pompen.
- de invloed van ingrepen is enkel plaatselijk merkbaar. In figuur 70 worden de maximale waterstanden langsheen het volledig gemodelleerde deel van de Bar-

bierbeek getoond voor verschillende ingrepen. Alle gemodelleerde ingrepen zijn geconcentreerd in de buurt van de Barbierstraat, de Oude Kruibekestraat en het GOG. De invloed is opwaarts merkbaar tot ongeveer ter hoogte van de Hollebeekhoeve. Ter hoogte van de monding van de Pismolenbeek in de Barbierbeek is de invloed niet meer merkbaar. Dit is gelijkaardig voor alle ingrepen. Daarom zal bij de bespreking van de resultaten enkel het afwaartse deel van de Barbierbeek tot aan de monding van Pismolenbeek voorgesteld worden.

- Uit de resultaten bleek ook dat een grote verhoging van de waterstand een relatief kleine extra overstromingsoppervlakte tot gevolg heeft. Dit is te verklaren doordat het vlakke deel van de vallei (langs de rivier) vrij snel onder water komt. Eens dit deel onder water staat, en het water stijgt, zal het effect in overstroomde oppervlakte door de hogere, meer steile valleihellingen vrij gering zijn. Dit betekent dat het effect van gebeurtenissen met hogere terugkeerperiode op overstroomde oppervlakte relatief gering is. De waterdieptes ter plaatse van de overstromingen zullen echter wel stijgen.
- De huizen die ter hoogte van de gewestweg langs de Barbierbeek staan, werden zo goed als in de bedding van de Barbierbeek gebouwd. Dit vormt een belangrijk knelpunt dat aanleiding geeft tot plaatselijke wateroverlast (zie figuur 71).

5.2.1 *Normaal getij in de Schelde*

5.2.1.1 Afgraven van de noorddijk van de Barbierbeek in het GOG

Bij een gewoon getij op de Schelde en een opwaarts debiet met terugkeerperiode 25 jaar blijkt het afgraven van de noorddijk van de Barbierbeek in het GOG tot op 2.5 m TAW zeer efficiënt voor de maximale waterstanden afwaarts van de gewestweg. Het GOG dient als buffer voor het Barbierbeekwater. In figuur 72 wordt getoond wat het effect is van de berging van water in het GOG op de maximale waterstanden in de Barbierbeek. De maximale waterstanden ten gevolge van bovenvermelde ingrepen worden vergeleken met de maximale waterstanden die zich in de huidige toestand (zonder ingrepen) bij dezelfde randvoorwaarden zouden voordoen. Ter indicatie werd met een rode lijn aangeduid waar het overstromingspeil van de huizen opwaarts de gewestweg zich situeert.

5.2.1.2 Bijkomend verwijderen van de duikers ter hoogte van de gewestweg

De duikers ter hoogte van de gewestweg en de Oude Kruibekestraat zorgen echter nog steeds voor opstuwing en overstroming in Bazel. Het effect van de duikers is duidelijk te zien aan de knik in de lijn van de maximale waterstanden (figuur 72). Door combinatie van het verwijderen van de duikers ter hoogte van de gewestweg met het afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG, zakken de maximale waterstanden in het volledige afwaartse stuk van de Barbierbeek aanzienlijk (figuur 73).

5.2.1.3 Effect van de maatregelen op de overstromingen

In figuur 74 zijn de maximale waterstanden te Bazel, bij het verwijderen van de duikers ter hoogte van de gewestweg in combinatie met het afgraven van de noordelijke dijk

van de Barbierbeek in het GOG, geprojecteerd op het opgemeten digitaal hoogtemodel van de Barbierbeek. Hieruit blijkt dat de combinatie van deze twee maatregelen volstaat om de overstromingsproblemen in de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat op te lossen bij normaal getij op de Schelde en een opwaarts debiet met een piekhoogte met een terugkeerperiode van 25 jaar. Ter vergelijking werd in de figuur in het rood ook de omvang weergegeven van de overstromingen die zich zouden voordoen bij een gewoon getij op de Schelde en een opwaarts debiet met terugkeerperiode 25 jaar zonder ingrepen (huidige toestand).

In het opwaartse deel van de Barbierbeekvallei oefenen de maatregelen geen invloed uit op de overstroomde gebieden.

5.2.1.4 Effect van de maatregelen bij een opwaarts debiet met terugkeerperiode 50 jaar

De maatregelen die in 5.2.1.2 worden voorgesteld, werden ook eens getoetst voor een opwaarts debiet met een terugkeerperiode van 50 jaar. De was die zich in september 1998 in het bekken van de Barbierbeek voordeed, komt met deze terugkeerperiode overeen. In figuur 75 wordt de invloed van deze ingrepen op de maximale waterstanden opnieuw vergeleken met de situatie zonder ingrepen bij dezelfde randvoorwaarden. De overstromingskaart ter hoogte van de gewestweg, die uit deze berekeningen resulteert, wordt in figuur 76 getoond. Hieruit blijkt dat ook voor een situatie met een opwaarts debiet met terugkeerperiode van 50 jaar, de maatregelen voorgesteld in 5.2.1.2, volstaan om wateroverlast ter hoogte van de gewestweg te vermijden.

5.2.1.5 Conclusies

Uit de berekeningen in de situatie met een opwaarts debiet met een terugkeerperiode van 25 jaar en een niet gevuld GOG blijkt dat:

- de ruimte die het GOG aan de Barbierbeek biedt na het afgraven van de noordelijke dijk, de maximale waterstanden stroomafwaarts van de gewestweg sterk doet dalen;
- het aanpassen van de duikers ter hoogte van de gewestweg en de Oude Kruibekestraat ervoor zorgen dat ook stroomopwaarts van de gewestweg de maximale waterstanden een sterke daling kennen.

In het opwaartse deel van de Barbierbeekvallei oefenen de maatregelen geen invloed uit op de overstroomde gebieden.

Bovendien werd aangetoond dat met behulp van deze twee aanpassingen ook de wateroverlast die zich in september 1998 voordeed in de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat, had kunnen vermeden worden.

5.2.2 *Gevuld GOG n.a.v. een getij/maximale tijhoogte in Antwerpen met een terugkeerperiode van 20 jaar*

5.2.2.1 Plaatsing van een terugslagklep in de ringdijk

In alle situaties waarin zich een gevuld GOG voordoet, is het noodzakelijk om in de ringdijk een terugslagklep te plaatsen op de Barbierbeek. Dit om te voorkomen dat water uit het GOG naar de Barbierbeek stroomopwaarts van de ringdijk terugstroomt. Deze maatregel wordt verder in deze (5.2.2) en volgende (5.2.3) paragraaf impliciet aangenomen zonder extra vermelding.

5.2.2.2 Afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG gecombineerd met het verwijden van de duikers

De twee maatregelen die in de vorige situatie (paragraaf 5.2.1) voldoende bleken om wateroverlast te voorkomen, worden nu onderzocht op hun effect in een extremere situatie. Als stroomopwaartse randvoorwaarde wordt een debiet met terugkeerperiode van 25 jaar opgelegd, en aan de stroomafwaartse rand een stormtij dat in Antwerpen een keer op 20 jaar voorkomt. Deze situatie zal gemiddeld 1 keer om de 500 jaar voorkomen. Uit de berekeningen blijkt dat deze maatregelen niet meer volstaan om wateroverlast te voorkomen. In figuur 77 is te zien dat er slechts een beperkte waterstands-daling optreedt t.o.v. een situatie waarin geen ingrepen worden uitgevoerd (onder dezelfde randvoorwaarden). Dit is een rechtstreeks gevolg van het gevulde GOG, waardoor de Barbierbeek niet meer kan afwateren. In deze paragraaf wordt gezocht naar extra maatregelen die de optredende wateroverlast kunnen voorkomen.

5.2.2.3 Bijkomend voorzien van een bergingsgebied opwaarts van de ringdijk

Bijkomend aan de twee vorige maatregelen wordt stroomopwaarts van de ringdijk een bergingsgebied toegevoegd langs de Barbierbeek, waarbij de hoogte van de overloopdijk op 3,0 m TAW ligt en de bergingsoppervlakte 16 ha bedraagt. Onder de opgelegde randvoorwaarden is de invloed van het bergingsgebied op de maximale stroomafwaartse waterstanden langs de Barbierbeek vrij groot. Op figuur 78 is te merken dat de wateroverlast nagenoeg volledig wordt voorkomen.

5.2.2.4 Effect van de maatregelen op de overstromingen

In figuur 79 en figuur 80 is het gezamenlijk effect van de drie doorgevoerde maatregelen – het verwijden van de duikers ter hoogte van de gewestweg en opwaarts ervan, het afgraven van de noordelijke dijk langs de Barbierbeek in het GOG, en het voorzien van een bergingsgebied stroomopwaarts van de ringdijk – voorgesteld in een overstromingskaart. Er wordt ingezoomd op twee kritieke gebieden voor wateroverlast, nl. de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat enerzijds en de Kemphoekstraat anderzijds. Op figuur 79 (bovenaan) valt te zien dat de wateroverlast t.h.v. de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat niet volledig wordt opgelost door de voorgestelde maatregelen. Er blijft nog beperkte wateroverlast. Hetzelfde is te zien op figuur 80 (bovenaan), waar er nog beperkte wateroverlast is in de Kemphoekstraat. Op beide plaatsen is de wateroverlast echter te voorkomen d.m.v. een eenvoudige ingreep. Door een beperkte ophoging tot 5 m TAW (*i.e.* 0,50 tot 0,70 m boven maaiveld) in de Oude Kruibekestraat wordt voorkomen dat de Barbierbeek op die plaats buiten haar oevers treedt. In de praktijk zou deze plaatselijke ophoging kunnen door een ophoging van het brugje en

een dijkje met een lengte van een tiental meter langs de rivier. Indien er gekozen wordt om de brug niet meer gebruiken, zoals ook gesuggereerd wordt in 5.1.3.6, kan de op-hoging gerealiseerd worden door een enkel plaatselijk dijkje langs de Barbierbeek. Het resultaat van deze ingreep is voorgesteld in figuur 79 (onderaan), waar te zien valt dat de bewoning nu wel van wateroverlast gespaard kan blijven. Op analoge manier is de wateroverlast t.h.v. de Kemphoekstraat aan te pakken door de dijk op de rechteroever van de Barbierbeek op te hogen tot 5 m TAW (*i.e.* 1,0 tot 1,6 m boven maaiveld). Figuur 80 (onderaan) toont dat hiermee de wateroverlast opgelost wordt.

5.2.2.5 Conclusies

Wanneer als randvoorwaarden voor de berekeningen stroomopwaarts een debiet met een terugkeerperiode van 25 jaar en stroomafwaarts een gevuld GOG n.a.v. een getij/maximale tijhoogte te Antwerpen met een terugkeerperiode van 20 jaar worden opgelegd, kunnen situaties geëvalueerd worden die een kans op voorkomen hebben van ongeveer 1 keer per 500 jaar. Uit de berekeningen blijkt dat het mogelijk is om in deze situaties wateroverlast te voorkomen. Hiervoor moeten volgende ingrepen uitgevoerd worden:

- het verwijderen van de duikers aan de gewestweg en aan de Oude Kruibekestraat en het afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG, *i.e.* de maatregelen die noodzakelijk zijn om wateroverlast te vermijden in de situatie met een niet gevuld GOG (zie paragraaf 5.2.1);
- het voorzien van een bergingsgebied langs de Barbierbeek stroomopwaarts van de ringdijk;
- het lokaal ophogen van de Oude Kruibekestraat tot 5 m TAW, om te verhinderen dat de Barbierbeek op dit punt buiten haar oevers treedt;
- het lokaal ophogen van de rechteroever van de Barbierbeek stroomafwaarts van de gewestweg tot een hoogte van 5 m TAW.

In deze situatie is de aanwezigheid van een terugslagklep in de ringdijk absoluut noodzakelijk is om te verhinderen dat (Schelde-)water vanuit het GOG terugstroomt naar de Barbierbeek stroomopwaarts van de ringdijk.

In het meer stroomopwaartse deel van de Barbierbeekvallei oefenen deze maatregelen geen invloed uit op overstroomde gebieden.

5.2.3 Gevuld GOG n.a.v. een getij/maximale tijhoogte in Antwerpen met een terugkeerperiode van 100 jaar

5.2.3.1 Afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG, gecombineerd met het verwijderen van de duikers ter hoogte van de gewestweg en het voorzien van een bergingsgebied stroomopwaarts van de ringdijk

In figuur 81 wordt het effect van de ingrepen uit paragraaf 5.2.2 vergeleken met een situatie zonder enige ingreep, wanneer als stroomopwaartse randvoorwaarde een de-

biet met een terugkeerperiode van 25 jaar en als stroomafwaartse randvoorwaarde een getij te Antwerpen met een terugkeerperiode van 100 jaar wordt opgelegd. Deze situatie doet zich gemiddeld 1 keer om de 2.500 jaar voor. Alhoewel uit de figuur blijkt dat de maatregelen uit paragraaf 5.2.2 nog altijd zorgen voor een aanzienlijke verlaging van het waterpeil op de Barbierbeek, volstaan ze niet om onder deze omstandigheden wateroverlast te voorkomen. Daarom wordt verder gezocht naar extra maatregelen die ook in deze extreme situatie wateroverlast kunnen verhinderen.

5.2.3.2 Vergroten van het bergingsgebied

Als eerste maatregel werd gekeken wat het bijkomend effect is van het vergroten van het bergingsgebied. Een aantal mogelijkheden om het gebied te vergroten werden besproken in paragraaf 5.1.3.5. In figuur 82 is het resultaat van deze ingreep voorgesteld. Er is een verdere daling van de waterstanden te bemerken, maar de ingreep blijkt nog niet voldoende om wateroverlast te voorkomen. Daarom wordt verder gezocht naar extra maatregelen.

5.2.3.3 Vergroten van het bergingsgebied in combinatie met het opstuwten van water stroomopwaarts van de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat

Als extra maatregel wordt een stuw geplaatst op de Barbierbeek. In figuur 69 is zowel de ligging van deze stuw in het wiskundig model als een mogelijke ligging op terrein weergegeven. Uit de berekeningen is gebleken dat deze maatregel gepaard moet gaan met een extra bescherming van de Hollebeekhoeve, die zich meer stroomopwaarts bevindt. Rond de hoeve is een beschermingsdijk noodzakelijk tot op een hoogte van 7,4 m TAW. De maximale hoogte boven het maaiveld bedraagt 1,3 m langs de Barbierbeek. Een mogelijke ligging van deze dijk is voorgesteld in figuur 83. Op het terrein zouden dan ook nog maatregelen nodig zijn om te voorkomen dat achter deze dijk water wordt opgespaard dat van bovenaf uit de vallei naar de Barbierbeek stroomt ^(xv).

Figuur 84 toont het resultaat van deze ingreep. Door het opstuwten van water stroomopwaarts van de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat is er een bijkomende daling van de maximale waterpeilen in de Barbierbeek. Zowel stroomafwaarts als stroomopwaarts van de gewestweg is er een positief effect op de waterstanden merkbaar.

Voor deze berekening werd uitgegaan van een stuw die in werking treedt als aan één van volgende voorwaarden voldaan wordt (zie 5.1.3.7, versie b):

- het waterpeil in het GOG is hoger dan in de Barbierbeek (en de terugslagklep ter hoogte van de ringdijk is dus gesloten)
- het waterpeil ter hoogte van de gewestweg is 4,50 m TAW of hoger

5.2.3.4 Effect van de maatregelen op de overstromingen

In figuur 85 en figuur 86 is het gezamenlijk effect van de tot nu toe doorgevoerde maatregelen – het verwijderen van de duikers ter hoogte van de gewestweg en opwaarts ervan, het afgraven van de noordelijke dijk langs de Barbierbeek in het GOG, het voorzien van een vergroot bergingsgebied stroomopwaarts van de ringdijk, en het opstuwten van water stroomopwaarts van de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat –

voorgesteld in een overstromingskaart. Er wordt ingezoomd op twee kritieke gebieden voor wateroverlast, nl. de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat enerzijds en de Kemphoekstraat anderzijds. Op figuur 85 (bovenaan) valt te zien dat de wateroverlast t.h.v. de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat niet volledig wordt opgelost door de voorgestelde maatregelen. Er blijft nog beperkte wateroverlast. Hetzelfde is te zien op figuur 86 (bovenaan), waar er nog beperkte wateroverlast is in de Kemphoekstraat. Op beide plaatsen is de wateroverlast echter te voorkomen d.m.v. dezelfde eenvoudige ingreep als besproken onder paragraaf 5.2.2.4, nl. het voorzien van een lokale ophoging in de Oude Kruibekestraat, en het ophogen van de rechteroever van de Barbierbeek stroomafwaarts van de gewestweg. Het resultaat van deze lokale ophogingen is te zien onderaan in figuur 85 en figuur 86. Op figuur 85 is ook de opstuwings van het water te merken.

5.2.3.5 Opstuwen van water stroomopwaarts van de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat in combinatie met pompen van water uit de Barbierbeek

Tijdens de scenario-analyse werd gezocht naar een alternatief voor de oplossing die in de paragrafen 5.2.3.3 en 5.2.3.4 werd uitgewerkt. Daarbij werd opnieuw vertrokken van de maatregelen die in paragraaf 5.2.2 reeds werden voorgesteld om wateroverlast te vermijden (nl. het verwijderen van de duikers ter hoogte van de gewestweg en opwaarts ervan, het afgraven van de noordelijke dijk langs de Barbierbeek in het GOG, en het voorzien van een bergingsgebied stroomopwaarts van de ringdijk). De tweede oplossing werd gevormd door, bovenop deze maatregelen, water op te stuwen stroomopwaarts van de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat, in combinatie met het pompen van water uit de Barbierbeek naar het GOG. De pomp heeft een maximaal debiet van ongeveer 5 m³/s, en werkt enkel indien aan één van volgende voorwaarden is voldaan (zie 5.1.3.8 versie 2-b):

- Het waterpeil in het GOG is hoger dan het waterpeil in de Barbierbeek (de terugslagklep ter hoogte van de ringdijk is dus gesloten)
- Het waterpeil ter hoogte van de gewestweg is 4 m TAW of hoger

De hoogte van de overloophoofd naar het bergingsgebied en de stuwwerking werden genomen zoals bij de berekening in 5.2.3.3.

In figuur 87 is het resultaat van deze ingrepen weergegeven. De figuur toont aan dat met deze maatregelen de waterstanden aanzienlijk worden verlaagd, waardoor er geen wateroverlast meer optreedt.

5.2.3.6 Effect van de maatregelen op de overstromingen

In figuur 88 en figuur 89 is het gezamenlijk effect van de tot nu toe doorgevoerde maatregelen – het verwijderen van de duikers ter hoogte van de gewestweg en opwaarts ervan, het afgraven van de noordelijke dijk langs de Barbierbeek in het GOG, het voorzien van een bergingsgebied stroomopwaarts van de ringdijk, het opstuwen van water stroomopwaarts van de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat, en het pompen van water uit de Barbierbeek naar het GOG – voorgesteld in een overstromingskaart. Inzoomen op de kritieke gebieden toont aan dat de wateroverlast nog niet volledig voor-

komen wordt (zie bovenaan figuur 88 en figuur 89). Door echter de lokale ophogingen aan te brengen (zie paragraaf 5.2.3.4) kan de wateroverlast toch vermeden worden (zie onderaan figuur 88 en figuur 89).

5.2.3.7 Conclusies

Wanneer als randvoorwaarden voor de berekeningen stroomopwaarts een debiet met een terugkeerperiode van 25 jaar en stroomafwaarts een gevuld GOG n.a.v. een getij/maximale tijhoogte te Antwerpen met een terugkeerperiode van 100 jaar worden opgelegd, kunnen situaties geëvalueerd worden die een kans op voorkomen hebben van ongeveer 1 keer per 2.500 jaar. Voor het oplossen van de wateroverlast in deze situaties werden twee alternatieven uitgewerkt.

Alternatief 1 bestaat uit volgende ingrepen:

- het verwijderen van de duikers aan de gewestweg en aan de Oude Kruibekestraat en het afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG, *i.e.* de maatregelen die noodzakelijk zijn om wateroverlast te vermijden in de situatie met een niet gevuld GOG (zie paragraaf 5.2.1);
- het voorzien van een vergroot bergingsgebied langs de Barbierbeek stroomopwaarts van de ringdijk;
- het lokaal ophogen van de Oude Kruibekestraat tot 5 m TAW, om te verhinderen dat de Barbierbeek op dit punt buiten haar oevers treedt;
- het lokaal ophogen van de rechteroever van de Barbierbeek stroomafwaarts van de gewestweg tot een hoogte van 5 m TAW;
- het opstuwen van water stroomopwaarts van de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat;
- het voorzien van een beschermingsdijk rond de Hollebeekhoeve.

Alternatief 2 bestaat uit volgende ingrepen:

- het verwijderen van de duikers aan de gewestweg en aan de Oude Kruibekestraat en het afgraven van de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG, *i.e.* de maatregelen die noodzakelijk zijn om wateroverlast te vermijden in de situatie met een niet gevuld GOG (zie paragraaf 5.2.1);
- het voorzien van een bergingsgebied langs de Barbierbeek stroomopwaarts van de ringdijk;
- het lokaal ophogen van de Oude Kruibekestraat tot 5 m TAW, om te verhinderen dat de Barbierbeek op dit punt buiten haar oevers treedt;

- het lokaal ophogen van de rechteroever van de Barbierbeek stroomafwaarts van de gewestweg tot een hoogte van 5 m TAW;
- het opstuwen van water stroomopwaarts van de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat;
- het voorzien van een beschermingsdijk rond de Hollebeekhoeve;
- het pompen van water uit de Barbierbeek naar het GOG (met een maximaal debiet van 5 m³/s).

5.2.4 *Verplaatsen van het bergingsgebied van de Barbierbeek*

In de werkgroep Barbierbeek werd gevraagd om het effect van het verplaatsen van het bergingsgebied naar meer stroomafwaarts (dus in het GOG) bijkomend te bespreken. Hieronder worden de effecten in twee situaties besproken. Eerst wordt het loskoppelen van de Barbierbeek van de werking van het GOG besproken. Vervolgens wordt ook ingegaan op het effectieve verplaatsen van het bergingsgebied in het GOG.

5.2.4.1 De Barbierbeek losgekoppeld van de werking van het GOG

Indien de Barbierbeek volledig wordt losgekoppeld van de werking van het GOG, dienen de dijken van de Barbierbeek in het GOG (nu op ongeveer 4,0 m TAW) verhoogd te worden tot 8,35 m TAW (de hoogte van de ringdijk). Zo wordt vermeden dat het water in het GOG de afstroming van de Barbierbeek verstoort. Het loskoppelen is echter nadelig voor de afstroming van de Barbierbeek, zoals hieronder wordt aangetoond.

Zolang de Barbierbeek niet wordt losgekoppeld van het GOG, kan de beek in de scenario's waarin de noordelijke dijk van de Barbierbeek in het GOG wordt afgegraven namelijk het volledige GOG gebruiken om water te bergen. Dit gebeurt als het GOG niet gebruikt wordt. Indien het GOG wel in gebruik is voor Scheldewater, is deze extra berging voor de Barbierbeek beperkter. Ze kan echter toch tijdelijk aangesproken worden, op de ogenblikken dat het Scheldewater (bij laagwater) uit het GOG wegtrekt.

Loskoppelen van de Barbierbeek daarentegen zorgt ervoor dat alle voordelen die de berging van Barbierbeekwater in het GOG biedt (zie figuur 72) verdwijnen.

5.2.4.2 Verplaatsen van het bergingsgebied naar meer afwaarts (in het GOG)

Een tweede optie is het verplaatsen van het bergingsgebied iets verder naar afwaarts toe, zodat het in het GOG komt te liggen. Dit betekent dat er rond dit gebied in het GOG een bijkomende dijk van 8,35 m TAW moet komen. Indien dit gebied dicht bij de ringdijk ligt, en de in- en uitwatering ervan gelegen is net opwaarts van de terugslagklep tussen het GOG en de Barbierbeek, zal het effect van dit overstromingsgebied op de afstroming van de Barbierbeek niet significant wijzigen tegenover de berekeningen met het bergingsgebied, zoals bepaald in figuur 66.

Deze ingreep heeft wel als gevolg dat er meer en hogere dijkwerken moeten gebeuren. Deze ingreep zal ook een effect hebben op de werking van het GOG, omdat de berging voor de Schelde gereduceerd wordt.

6 CONCLUSIES

Inventarisatie, statistische analyse en hydrologische modellering

- *Bij de inventarisatie en de opmaak en ijking van de hydrologische modellen bleek dat er voor het bekken van de Barbierbeek slechts een zeer beperkt aantal gegevens beschikbaar waren. Bij de opmaak van het model werden deze gegevens zo optimaal mogelijk aangewend. Toetsing van de resultaten van de bekomen modellen aan resultaten van andere studies geeft bevredigende resultaten.*
- *Er werd een statistische analyse uitgevoerd op een berekende meetreeks van 25 jaar. Op basis van de resultaten werden debietreeksen opgesteld met pieken met verschillende terugkeerperiodes. Uit de gemaakte vereenvoudigingen bleek dat het begrip terugkeerperiode voor de Barbierbeek niet als absoluut gegeven kan gebruikt worden, maar veeleer een indicatieve waarde voor een gebeurtenis is. Extrapolaties naar zeer grote terugkeerperiodes moeten zeer voorzichtig toegepast worden.*

Hydraulische modellering

- *Er werd een hydraulisch model voor de Barbierbeek opgemaakt. Dit hydraulisch model bevat alle terreingebonden informatie i.v.m. het traject van de beek, de helling, de dwarssecties, de ligging van de oevers, aanwezige kunstwerken, ..., en is een weergave van de huidige toestand (anno 2000) van de Barbierbeek. De kalibratie toonde aan dat het hydraulisch model met een bevredigende nauwkeurigheid rekent.*

Toetsing van de gekoppelde hydrologische – hydraulische modellen

- *De gekoppelde hydraulische en hydrologische modellen werden gekoppeld getoetst en verder verfijnd. Het hydraulisch model werd uitgebreid met de overstroombare gebieden langs de vallei. De hydrogrammen en piekhoogtes die met het hydrologisch model worden berekend, werden verbeterd. De resultaten die met deze gekoppelde definitieve modellentrein worden bekomen, stemmen zeer goed overeen met de situatie die op het terrein is voorgekomen.*

Algemene conclusies die bij de resultaten van de berekeningen kunnen gemaakt worden, zijn:

- *De Barbierbeek gebruikt in het opwaarts gedeelte (stroomopwaarts Bazel) de volledige vallei. Ongeveer het volledige stroomgebied is dus nog mee ingeschakeld in het beekstelsel. De mogelijkheid om dus nog extra berging te gaan voorzien in dat gebied, is redelijk beperkt. Het belang van deze vaststelling zit in het feit dat elke ingreep in het stroomopwaartse gebied een invloed kan hebben meer stroomafwaarts.*

- *De ingrepen die afwaarts gebeuren hebben slechts een beperkte reikwijdte naar opwaarts toe. Het effect van afwaartse ingrepen is steeds uitgestorven ter hoogte van de Pismolenbeek in Basel. Ook de werking van het GOG heeft maar een effect op de waterstanden dat reikt tot aan de monding van de Pismolenbeek in Basel*
- *De aanwezigheid van huizen heel dicht langs de beek is een nadelige factor die speelt wanneer de Oude Kruibekestraat en de Barbierstraat overstromen.*
- *Voor de berekeningen werden een aantal veiligheidsmarges ingebouwd bij de gebruikte terugkeerperiodes.*
- *Vanaf een bepaalde piekhoogte van een storm op de Schelde (terugkeerperiode van de piek 50 jaar) is de hoogte van de piek van de storm niet meer van belang voor de gebeurtenissen in de Barbierbeek, maar de duur van de storm. Deze is immers bepalend voor de tijdsduur dat de Barbierbeek niet naar de Schelde kan afwateren.*
- *Uit alle scenarioberekeningen waarin de duikers onder de gewestweg en de Oude Kruibekestraat in hun huidige vorm blijven bestaan, blijkt dat ze een voor een sterke opstuwung zorgen omdat hun sectie een sterke vernauwing vormt voor het doorstromende water.*
- *Bij een niet gevuld GOG verbetert de situatie op de Barbierbeek sterk, omdat er gebruik kan gemaakt worden van de berging in de Kruibeke polder (na afgraven noorddijk).*
- *Indien het GOG gevuld is, is de installatie van een terugslagklep ter hoogte van de ringdijk noodzakelijk.*
- *De keuze van de effectief te nemen maatregelen zal mee bepaald worden door de kans op voorkomen van de berekende gebeurtenissen, de kost van de ingreep, de schade die bij overstromingen voorkomt, het gecreëerde ongemak naar aanleiding van de ingrepen, ...*

Uit de berekeningen in de situatie met een opwaarts debiet met een terugkeerperiode van 25 jaar en een niet gevuld GOG blijkt dat:

- *de ruimte die het GOG aan de Barbierbeek biedt na het afgraven van de noordelijke dijk, de maximale waterstanden stroomafwaarts van de gewestweg sterk doet dalen;*
- *het aanpassen van de duikers ter hoogte van de gewestweg en de Oude Kruibekestraat ervoor zorgen dat ook stroomopwaarts van de gewestweg de maximale waterstanden een sterke daling kennen.*

Bovendien werd aangetoond dat met behulp van deze twee aanpassingen ook de wateroverlast die zich in september 1998 voordeed in de Barbierstraat en de Oude Kruibekestraat, had kunnen vermeden worden.

Indien het GOG gevuld is n.a.v. een getij met hoogte in Antwerpen 1/20 jaar, en het stroom-OP-waartse debiet heeft een terugkeerperiode van 1/25 jaar, dan

- *is de gezamenlijke kans op voorkomen ~ 1/500 jaar*
- *kan wateroverlast langs de Barbierbeek in Basel vermeden worden. Bovenop de maatregelen die nodig zijn indien het GOG niet gevuld is, moet:*

=> een bergingsgebied voorzien worden ter hoogte van de ringdijk (16 ha)

=> de Oude Kruibekestraat plaatselijk verhoogd worden (tot 5 m TAW)

=> de dijk aan de rechteroever van de Barbierbeek plaatselijk verhoogd worden (tot 5 m TAW)

Indien het GOG gevuld is n.a.v. een getij met hoogte in Antwerpen 1/100 jaar, en het stroom-OP-waartse debiet heeft een terugkeerperiode van 1/25 jaar, dan:

- *is de gezamenlijke kans op voorkomen ~ 1/2.500 jaar*
- *kan wateroverlast langs de Barbierbeek in Basel vermeden worden. Bovenop de maatregelen die nodig zijn indien het GOG gevuld is (bovenafvoer 1/25 & getij Antwerpen 1/20), is wateroverlast te vermijden mits volgende bijkomende maatregelen:*

=> een verruimd bergingsgebied t.h.v. de ringdijk

=> opstuwen van water opwaarts de Barbierstraat

=> indijken van de Hollebeekhoeve

- *kan wateroverlast langs de Barbierbeek in Basel ook vermeden worden door bovenop de maatregelen die nodig zijn indien het GOG gevuld is (bovenafvoer 1/25 & getij Antwerpen 1/20), volgende maatregelen uit te voeren:*

=> opstuwen van water opwaarts de Barbierstraat

=> indijken van de Hollebeekhoeve

=> installeren van een pomp

Onderzoek naar de mogelijkheden voor het verleggen van het voorgestelde bergingsgebied leidt tot volgende conclusies:

- *Het afkoppelen van de Barbierbeek van de werking van het GOG (door het verhogen van de dijken langs de Barbierbeek in het GOG) zorgt ervoor dat ook alle voordelen, die de berging van Barbierbeekwater in het GOG biedt, verdwijnen.*

Het verleggen van het bergingsgebied opwaarts de ringdijk naar het GOG geeft geen significant verschil voor de berekeningsresultaten voor de Barbierbeek op voorwaarde dat de in- en uitlaatopeningen van het gebied net opwaarts van de ringdijk liggen, en het bergingsgebied net afwaarts ervan. Er zijn echter wel consequenties voor het aantal en de hoogte van de nodige dijken en voor de bergingscapaciteit van het GOG (en dus de opvang van het Scheldewater).

Borgerhout, november 2002

De ingenieurs, belast met de studie

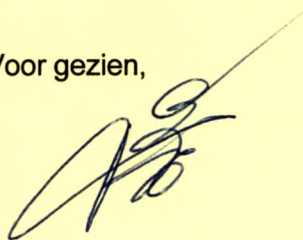


ir. Katrien Van Eerdenbrugh



ir. Peter Viaene

Voor gezien,



dr. Frank Mostaert,
afdelingshoofd
afdeling Waterbouwkundig Laboratorium en Hydrologisch Onderzoek

REFERENTIES

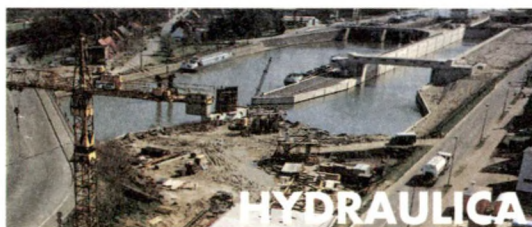
- (i) Berlamont, J., Willems, P., Qvick, A., Vaes, G., Feyen, J. en K. Christiaens, 2000. Algemene methodologie voor het modelleren van de waterafvoer in bevaarbare waterlopen in Vlaanderen. KU Leuven in opdracht van AWZ afdeling Waterbouwkundig Laboratorium en Hydrologisch Onderzoek
- (ii) Envico, 2001. Integraal waterbeheerstudie voor het bekken van de Barbierbeek, inventarisatierapport. Envico in opdracht van het Provinciaal Centrum voor Milieu-onderzoek
- (iii) WLH, 2002. Evaluatie van huidige versie van 1D Scheldemodel opwaarts van Prosperpolder – buitengewone stormvloeden van 27 februari tot 1 maart 1990; Model 440-14. AWZ afdeling Waterbouwkundig Laboratorium en Hydrologisch Onderzoek, Borgerhout
- (iv) Verhoeven, R., 1996. Waterwegen, waterbeheer & waterbeheersing. RU Gent
- (v) Gellens-Meulenberghs, F. & D. Gellens, 1992. L' évapotranspiration potentielle en Belgique. Variabilité spatiale et temporelle. KMI
- (vi) Hettinga, O., Meire, P., Oevelen van, D., & J. van der Welle, 1998. De inpassing van de Barbierbeek in het Gecontroleerde OverstromingsGebied Kruibeke – Bazel – Rupelmonde. Instituut voor Natuurbehoud
- (vii) Ecorem, 1998. Hydrologische modellering van de Barbierbeek en studie opvang Barbierbeekwater als invulling van de leemte in de kennis in het MER "Gecontroleerd overstromingsgebied Kruibeke – Bazel – Rupelmonde". Ecorem in opdracht van de Afdeling Zeeschelde
- (viii) S.W.K., 1999. Hydrodynamische studie Barbierbeek – Pachtgoedbeek. S.W.K. in opdracht van Stadsbestuur Sint-Niklaas
- (ix) Voet, M., 1991. Frequentieanalyse van hoogwaterafvoeren in het limnimetrisch net van de landelijke waterdienst. Werkgroep voor Wetenschappelijk Onderzoek inzake de Landinrichting
- (x) Voet, M., 1995. Runoffhoeveelheden bij het ontwerp van wachtbekkens in het hellend gebied van West- en Oost-Vlaanderen. Werkgroep voor Wetenschappelijk Onderzoek inzake Landinrichting
- (xi) DHI, 2000. MIKE11, A modelling system for rivers and channels. User Guide. Danish Hydraulic Institute

- (xii) DHI, 2000. MIKE11, A modelling system for rivers and channels. Reference Manual. Danish Hydraulic Institute
- (xiii) DHI, 1998. MIKE11 GIS, A flood modelling and management tool. Reference and user manual. Danish Hydraulic Institute
- (xiv) Chow, V.T., 1959. Open Channel Hydraulics, international student edition. McGraw-Hill Book Co – Singapore
- (xv) pers.comm. R. De Paep, 04/11/02

FLANDERS HYDRAULICS

**WATERBOUWKUNDIG
LABORATORIUM**

**FLANDERS
HYDRAULICS**



ministerie van de Vlaamse Gemeenschap
departement Leefmilieu en Infrastructuur
administratie Waterwegen en Zeewezen
afdeling Waterbouwkundig Laboratorium