

Impact van de betonstop op de rivierafvoer

Arnoud Vermeir

Thesis voorgedragen tot het behalen
van de graad van Master of Science
in de ingenieurswetenschappen:
bouwkunde, optie Civiele techniek

Promotor:
Prof. dr. ir. P. Willems

Begeleider:
ir. J. De Niel

© Copyright KU Leuven

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotor als de auteur is overnemen, kopiëren, gebruiken of realiseren van deze uitgave of gedeelten ervan verboden. Voor aanvragen tot of informatie i.v.m. het overnemen en/of gebruik en/of realisatie van gedeelten uit deze publicatie, wend u tot Faculteit Ingenieurswetenschappen, Kasteelpark Arenberg 1 bus 2200, B-3001 Heverlee, +32-16-321350.

Voorafgaande schriftelijke toestemming van de promotor is eveneens vereist voor het aanwenden van de in deze masterproef beschreven (originele) methoden, producten, schakelingen en programma's voor industrieel of commercieel nut en voor de inzending van deze publicatie ter deelname aan wetenschappelijke prijzen of wedstrijden.

Voorwoord

Het maken van deze masterproef heeft mij de mogelijkheid gegeven om betrokken te zijn bij academisch onderzoek en hierbij de opgedane ervaringen tijdens de opleiding tot uiting te brengen in een groter werk. Via deze masterproef heb ik me kunnen verdiepen in de hydrologische modellering met betrekking tot een zeer actueel onderwerp, namelijk de betonstop, wat het werk des te interessanter maakte. Hierbij zou ik mijn promotor prof. Patrick Willems willen bedanken voor het beschikbaar stellen van dit onderwerp en de begeleiding. Gedurende het academiejaar kon ik ook altijd terecht bij Jan De Niel. Zijn bemerkingen en vragen hebben in grote mate bijgedragen aan de bekomen resultaten en inzichten, waarvoor dank.

Ook zou ik nog familie en vrienden willen bedanken voor de steun tijdens het maken van deze masterproef. In het bijzonder mijn ouders, voor de opportuniteit om te studeren aan de KU Leuven, Valerie, mijn steun en toeverlaat gedurende het hele jaar, en Thomas, voor mij in het begin van deze thesis wegwijs te maken in de GIS-software.

Arnoud Vermeir

Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Samenvatting	iv
Lijst van figuren	v
Lijst van tabellen	x
1 Inleiding	1
2 Literatuurstudie	5
2.1 De betonstop	5
2.2 Landgebruikskaarten en scenario's	8
2.3 Impact landgebruik op hydrologie	9
2.3.1 Effect van verandering bos - akkers	10
2.3.2 Effect van stedelijke verharding	12
2.4 Effect van klimaatverandering	15
2.5 Mitigerende maatregelen	18
2.6 Gelijkaardige studies in België	21
2.7 Samenvatting	22
3 Landgebruiksveranderingen	23
3.1 Beschikbare data en scenario's	23
3.1.1 Huidige situatie en verleden	23
Ruimtebeslag	23
Verharding	25
Bestaande landgebruiksscenario's	25
3.1.2 Toekomstige landgebruiksscenario's	26
Landgebruikskaarten Poelmans	27
Landgebruikskaarten Ruimtemodel Vlaanderen	28
3.2 Landgebruiksscenario's betonstop	35
3.2.1 Dalende dagelijkse toename ruimtebeslag	35
3.2.2 Aanmaak betonstopscenario's	36
Randvoorwaarden	36
Verdeling bijkomende oppervlakte	37
Overige mogelijkheden betonstopscenario's	39
Resultaten	40
3.2.3 Betonstop en Ruimtemodel Vlaanderen	43

3.2.4	Verharding	45
3.2.5	Samenvatting resultaten	47
3.3	Analyse en vergelijking landgebruiksscenario's betonstop	49
3.3.1	Centraliteit	49
3.3.2	Afzonderlijke kernen	51
3.4	Besluit	53
4	Hydrologische modellering	55
4.1	Case study: Stroomgebied Grote Nete	55
4.2	Methodologie	57
4.2.1	NAM-model	58
4.2.2	Ruimtelijke disaggregatie	59
	Methode ruimtelijke disaggregatie	59
	Toepassing ruimtelijke disaggregatie	63
4.3	Resultaten	65
4.3.1	Kalibratie	66
4.3.2	Validatie	69
4.3.3	Landgebruiksveranderingen	72
	Validatie methode ruimtelijke disaggregatie	72
	Ruimtelijke disaggregatie en landgebruiksscenario's	81
	Relatie verharding en effect landgebruiksveranderingen	91
4.4	Besluit	94
5	Algemene conclusie & discussie	95
5.1	Conclusie	95
5.2	Discussie	97
A	Landgebruikskaarten Vlaanderen	103
B	Analyse landgebruikskaarten Vlaanderen	107
C	Landgebruikskaarten stroomgebied Grote Nete	113
D	Extreme waarden verdeling landgebruiksscenario's Grote Nete	119
	Bibliografie	123

Samenvatting

Als antwoord op de problematiek rondom het excessief en versnipperd landgebruik in Vlaanderen, wil de Vlaamse Regering de toename van het stedelijk gebied geleidelijk aan terugdringen tot geen extra toename van stedelijk gebied in 2040, zoals omschreven in het Witboek Beleidsplan Ruimte Vlaanderen. Dit plan is in Vlaanderen beter gekend als de betonstop. De toename in stedelijk gebied heeft een invloed op de hydrologie. In deze masterproef zal de invloed van het realiseren van de betonstop op de hydrologie, in vergelijking met het niet realiseren van de betonstop oftewel het BAU-scenario (Business-As-Usual), ingeschat worden.

Het toekomstig landgebruik, waarbij de huidige situatie wordt voortgezet, is gekend. Het landgebruik bij realisatie van de betonstop is niet gekend. Hiervoor zijn in deze masterproef verschillende landgebruiksscenario's aangemaakt en geanalyseerd. Met deze landgebruiksscenario's kan dan de hydrologische modellering aangevallen worden om het effect van de betonstop op de rivierafvoer te achterhalen. Deze modellering is gebeurd voor het stroomgebied van de Grote Nete waarvoor er een nieuw dagelijks gebaseerd hydrologisch model (NAM) is gekalibreerd en gevalideerd. Via de methode van de ruimtelijke disaggregatie zijn de modelparameters dan aangepast op basis van het landgebruik in het verleden (validatie methode) en het landgebruik komende van de scenario's voor de betonstop en BAU-scenario.

Voor al het toekomstig landgebruik voor het stroomgebied van de Grote Nete is er een stijging gekomen in de piekafvoer. Voor de laagwaterafvoer is er een daling gekomen. Voor beide effecten is de grootteorde van de stijging of daling het grootst ondervonden voor het BAU-scenario. Voor de verschillende betonstopscenario's zijn deze kleiner en afhankelijk van het beschouwde scenario. Hierbij is voornamelijk de bebouwde oppervlakte in het stroomgebied van belang, naast het overige landgebruik. Het effect op de jaarlijkse totalen is miniem. De terugkeerperiode voor éénzelfde afvoerdebiet daalt naargelang het landgebruiksscenario in dezelfde lijn als voor de stijging in piekafvoer (sterkste daling BAU). Uiteindelijk is er nog een positieve correlatie gekomen voor de toename in verharding en piekafvoer. Voor de toename in verharding en laagwaterafvoer is er een negatieve correlatie gevonden.

Uit de bekomen resultaten blijkt duidelijk het gunstig effect van het realiseren van de betonstop op de rivierafvoer en rivieroverstromingen. Ten opzichte van het BAU-scenario zal de stijging in piekafvoer kleiner zijn. Het omgekeerde geldt voor de laagwaterafvoer. Het terugdringen van de toename in stedelijk landgebruik is ondervonden een valabele optie te zijn voor het beleid omtrent overstromingsbeheer.

Lijst van figuren

1.1	Bebouwde oppervlakte in de Vlaamse Ruit (zwart) [De Geyter et al., 2002].	2
1.2	Bebouwde oppervlakte in de Nederlandse Randstad (zwart) [De Geyter et al., 2002].	2
2.1	Geleidelijke afname van de toename in ruimtebeslag per dag zoals vooropgesteld in het Witboek [Ruimte Vlaanderen, 2016].	7
2.2	Relatie tussen impact van landgebruik en klimaat en grootte van het bekken [Blöschl et al., 2007].	10
3.1	Evolutie van de dagelijkse toename in ruimtebeslag in Vlaanderen [Poelmans en Engelen, 2014, Engelen, 2016, Ruimte Vlaanderen, 2016] (eigen verwerking).	24
3.2	Verhouding tussen 'Built-up land' (Poelmans) en ruimtebeslag [Poelmans, 2010, Poelmans en Engelen, 2014] (eigen verwerking).	29
3.3	Oppervlaktes aan 'Built-up land' voor de verschillende scenario's van het Ruimtemodel Vlaanderen en de oppervlakte van het ruimtebeslag voor het BAU-scenario en de betonstop [Poelmans en Engelen, 2014, Engelen, 2016, VITO, 2018] (eigen verwerking).	31
3.4	Overeenkomst tussen ruimtebeslag en de klasse 'Built-up land' [VITO, 2013, VITO, 2018] (eigen verwerking).	33
3.5	Nazicht met behulp van de Groenkaart Vlaanderen en Waterondoorlaatbaarheidskaart op het eigenlijk landgebruik binnenin de klasse 'Built-up land' [Agentschap voor Natuur en Bos, 2013, AGIV, 2016, VITO, 2018] (eigen verwerking).	34
3.6	De verharding en het ruimtebeslag binnen de bestemmingen gedomineerd door ruimtebeslag [Ruimte Vlaanderen, 2016].	34
3.7	Effect van het inbrengen van de afstand tot bestaande oppervlakte van 'Built-up land' (a) bij de toekenning van willekeurige bijkomende oppervlakte aan 'Built-up land' ten opzichte van het niet inbrengen (b), voor de regio rond Sint-Truiden.	39
3.8	Legende landgebruikskaarten Vlaamse Ruit.	40
3.9	Landgebruikskaart voor de huidige toestand (2010) van de Vlaamse Ruit.	41
3.10	Landgebruikskaart voor het scenario 'Rendementskans' (2050) van de Vlaamse Ruit.	41

3.11	Landgebruikskaart voor het scenario '50% willekeur' (2050) van de Vlaamse Ruit.	42
3.12	Landgebruikskaart voor het scenario '100% willekeur' (2050) van de Vlaamse Ruit.	42
3.13	Landgebruikskaart voor het BAU-scenario (2050) van de Vlaamse Ruit.	43
3.14	Oppervlakte aan 'Built-up land' en de daaruit volgende oppervlakte aan ruimtebeslag van het SE-scenario in vergelijking met de oppervlakte van ruimtebeslag volgens het scenario van de betonstop [Ruimte Vlaanderen, 2016, VITO, 2018] (eigen verwerking).	44
3.15	Oppervlakte aan 'Built-up land' en de daaruit volgende oppervlakte aan ruimtebeslag van het RC-scenario in vergelijking met de oppervlakte van ruimtebeslag volgens het scenario van de betonstop [Ruimte Vlaanderen, 2016, VITO, 2018] (eigen verwerking).	45
3.16	Ruimtebeslag en verhardingspercentages voor de totale oppervlakte van Vlaanderen voor het BAU-scenario en het betonstopscenario, waarvoor 3 verschillende verhardingsscenario's [Poelmans, 2010, De Meyer et al., 2011, Poelmans en Engelen, 2014, Ruimte Vlaanderen, 2016] (eigen verwerking).	47
4.1	Het stroomgebied van de Grote Nete, met het reliëf [m] en situering in Vlaanderen, dat in deze masterproef als studiegebied is genomen [Agentschap Informatie Vlaanderen, 2014, Vlaamse Milieumaatschappij, 2017, Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).	56
4.2	Bodemkaart voor het stroomgebied van de Grote Nete [VPO, 2016] (eigen verwerking).	57
4.3	De structuur en parameters van het NAM-model [DHI, 2009].	59
4.4	Gridstructuur tussen aangrenzende cellen voor de ruimtelijke disaggregatie [Tran Quoc et al., 2015].	62
4.5	De methode van de ruimtelijke disaggregatie zoals toegepast in deze masterproef voor het achterhalen van het effect van veranderend landgebruik op de hydrologie.	63
4.6	De oppervlakteafstromingscoëfficiënt C (zoals bepaald via Tabel 4.1 en formule (4.5)) van elke rastercel (50 meter resolutie) voor het stroomgebied van de Grote Nete.	66
4.7	Geobserveerde en gesimuleerde debieten (NAM-model) voor de periode van augustus 2006 tot april 2007 [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).	68
4.8	De extreme waarden verdeling van de geobserveerde debieten (Q_{obs}) en de via het NAM-model gesimuleerde debieten (Q_{NAM}) voor de kalibratieperiode [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).	69
4.9	De cumulatieve volumes van de geobserveerde debieten en de gesimuleerde debieten (NAM-model) voor de hele kalibratieperiode [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).	70

4.10	Geobserveerde en gesimuleerde debieten (NAM-model) voor de periode van juli 2010 tot mei 2011 [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).	70
4.11	De extreme waarden verdeling van de geobserveerde debieten (Q_{obs}) en de via het NAM-model gesimuleerde debieten (Q_{NAM}) voor de validatieperiode [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).	71
4.12	De cumulatieve volumes van de geobserveerde debieten en de gesimuleerde debieten (NAM-model) voor de hele validatieperiode [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).	72
4.13	Geobserveerde en gesimuleerde debieten (parameters voor 1988 in vergelijking met parameters voor 2010) voor de periode van juli 1987 tot maart 1988 [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).	75
4.14	Geobserveerde en gesimuleerde debieten (parameters voor 2000 in vergelijking met parameters voor 2010) voor de periode van oktober 1997 tot oktober 1998 [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).	75
4.15	De extreme waarden verdeling van de geobserveerde debieten (Q_{obs}) voor de periode rondom 1988 en de via het NAM-model gesimuleerde debieten met de modelparameters van 1988 (Q_{1988}) en 2010 (Q_{2010}) [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).	76
4.16	De extreme waarden verdeling van de geobserveerde debieten (Q_{obs}) voor de periode rondom 2000 en de via het NAM-model gesimuleerde debieten met de modelparameters van 2000 (Q_{2000}) en 2010 (Q_{2010}) [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).	77
4.17	De cumulatieve volumes van de geobserveerde debieten en de gesimuleerde debieten (NAM-model) voor de periode rondom 1988 [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).	78
4.18	De cumulatieve volumes van de geobserveerde debieten en de gesimuleerde debieten (NAM-model) voor de periode rondom 2000 [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).	78
4.19	De extreme waarden verdeling voor de geobserveerde debieten (Q_{obs}) voor de periode rondom 2010 (kalibratie en validatie) en de via het NAM-model gesimuleerde debieten met de modelparameters voor 2010, 2000 en 1988 [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).	80
4.20	De extreme waarden verdeling voor de geobserveerde debieten (Q_{obs}) en de via het NAM-model gesimuleerde debieten (Q_p) voor de periodes rondom 1988, 2000 en 2010 [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).	81
4.21	Gesimuleerde afvoerdebieten met de modelparameters van 2010 (Q_{2010}), het scenario 'Rendementskans' (Q_{RK}) en 'RMV - BAU' (Q_{BAU}).	84
4.22	Box-plots voor de impact factor (verandering in piekafvoer ten opzichte van 2010) van de terugkeerperiodes groter dan 0,1 jaar voor de verschillende landgebruiksscenario's.	85
4.23	Overschrijdingskans voor de gesimuleerde debieten van elk landgebruiksscenario en de toestand in 2010.	86

4.24	Het verschil tussen de jaarlijkse totalen (per hydrologisch jaar) gerekend met de modelparameters van de verschillende landgebruiksscenario's en de jaarlijkse totalen via de modelparameters voor 2010.	87
4.25	De extreme waarden verdeling van de gesimuleerde debieten voor de verschillende landgebruiksscenario's en de toestand in 2010.	88
4.26	Extreme waarden verdeling (exponentiële verdeling) voor het landgebruik in 2010 en de verschillende landgebruiksscenario's (zie ook Figuur D.1 tot en met D.7 in Bijlage D).	90
4.27	Toename in verharding (horizontaal) ten opzichte van toename in piekafvoer (verticaal) voor het stroomgebied van de Grote Nete.	93
4.28	Toename in verharding (horizontaal) ten opzichte van toename (afname) in laagwaterafvoer (verticaal) voor het stroomgebied van de Grote Nete.	93
A.1	Landgebruik Vlaanderen huidige toestand (2010).	103
A.2	Landgebruik Vlaanderen scenario 'Rendementskans' (2050).	104
A.3	Landgebruik Vlaanderen scenario '50% willekeur' (2050).	104
A.4	Landgebruik Vlaanderen scenario '100% willekeur' (2050).	104
A.5	Landgebruik Vlaanderen scenario 'RMV - SE' (2050).	105
A.6	Landgebruik Vlaanderen scenario 'RMV - RC' (2050).	105
A.7	Landgebruik Vlaanderen scenario 'RMV - BAU' (2050).	105
B.1	Oppervlaktes bij de afzonderlijke kernen voor de huidige toestand (2010).	107
B.2	Oppervlaktes bij de afzonderlijke kernen voor het scenario 'Rendementskans' (2050).	108
B.3	Oppervlaktes bij de afzonderlijke kernen voor het scenario '50% willekeur' (2050).	108
B.4	Oppervlaktes bij de afzonderlijke kernen voor het scenario '100% willekeur' (2050).	109
B.5	Oppervlaktes bij de afzonderlijke kernen voor het scenario 'RMV - SE' (2050).	109
B.6	Oppervlaktes bij de afzonderlijke kernen voor het scenario 'RMV - RC' (2050).	110
B.7	Oppervlaktes bij de afzonderlijke kernen voor het scenario 'RMV - BAU' (2050).	110
B.8	Oppervlaktes van 'Built-up land' aangesloten bij de centrumsteden voor de huidige toestand en de verschillende landgebruiksscenario's.	111
B.9	Verhouding omtrek/oppervlakte voor de centrumsteden voor de huidige toestand en de verschillende landgebruiksscenario's.	111
C.1	Landgebruik voor het stroomgebied van de Grote Nete voor de huidige toestand (2010).	113
C.2	Landgebruik voor het stroomgebied van de Grote Nete voor het scenario 'Rendementskans' (2050).	114
C.3	Landgebruik voor het stroomgebied van de Grote Nete voor het scenario '50% willekeur' (2050).	114

C.4	Landgebruik voor het stroomgebied van de Grote Nete voor het scenario '100% willekeur' (2050).	115
C.5	Landgebruik voor het stroomgebied van de Grote Nete voor het scenario 'RMV - SE' (2050).	115
C.6	Landgebruik voor het stroomgebied van de Grote Nete voor het scenario 'RMV - RC' (2050).	116
C.7	Landgebruik voor het stroomgebied van de Grote Nete voor het scenario 'RMV - BAU' (2050).	116
C.8	Landgebruikskaart voor het stroomgebied van de Grote Nete in 1976 [Poelmans, 2010] (eigen verwerking).	117
C.9	Landgebruikskaart voor het stroomgebied van de Grote Nete in 1988 [Poelmans, 2010] (eigen verwerking).	117
C.10	Landgebruikskaart voor het stroomgebied van de Grote Nete in 2000 [Poelmans, 2010] (eigen verwerking).	118
D.1	Extreme waarden verdeling (exponentieel) voor de toestand in 2010. . .	119
D.2	Extreme waarden verdeling (exponentieel) voor het landgebruiksscenario 'Rendementskans'.	120
D.3	Extreme waarden verdeling (exponentieel) voor het landgebruiksscenario '50% willekeur'.	120
D.4	Extreme waarden verdeling (exponentieel) voor het landgebruiksscenario '100% willekeur'.	121
D.5	Extreme waarden verdeling (exponentieel) voor het landgebruiksscenario 'RMV - SE'.	121
D.6	Extreme waarden verdeling (exponentieel) voor het landgebruiksscenario 'RMV - RC'.	122
D.7	Extreme waarden verdeling (exponentieel) voor het landgebruiksscenario 'RMV - BAU'.	122

Lijst van tabellen

3.1	Oppervlaktes voor de verschillende klassen van de landgebruikskaarten van Poelmans, vergeleken met oppervlaktes aan ruimtebeslag (betonstop en BAU) voor de verschillende jaartallen [Poelmans, 2010, Poelmans en Engelen, 2014, Engelen, 2016, Ruimte Vlaanderen, 2016] (eigen verwerking).	27
3.2	Omzetting van de klassen uit het Ruimtemodel Vlaanderen.	30
3.3	Landgebruik en effectief ruimtebeslag binnen de oppervlakte van de klasse 'Built-up land' voor de omgeving van Leuven [Agentschap voor Natuur en Bos, 2013, VITO, 2013, AGIV, 2016] (eigen verwerking). . .	34
3.4	Totale en bijkomende oppervlaktes voor het ruimtebeslag en 'Built-up land' voor de betonstopscenario's [Poelmans en Engelen, 2014, Ruimte Vlaanderen, 2016] (eigen verwerking).	36
3.5	Verhardingspercentage voor heel Vlaanderen voor de verschillende landgebruiksscenario's, verhardingsscenario's en jaartallen.	46
3.6	Oppervlaktes van de klasse 'Built-up land' voor de betonstop zelf, voor de verschillende scenario's die kunnen doorgaan als scenario's voor de betonstop en het BAU-scenario.	48
3.7	Percentages van het ruimtebeslag ten opzichte van de totale oppervlakte van Vlaanderen voor de betonstop zelf en de eigen aangemaakte scenario's, voor de scenario's van het Ruimtemodel Vlaanderen die kunnen doorgaan als scenario's voor de betonstop en het BAU-scenario.	48
3.8	Percentages van de verharding (Medium verhardingsscenario) ten opzichte van de totale oppervlakte van Vlaanderen voor de betonstop zelf en de eigen aangemaakte scenario's, voor de scenario's van het Ruimtemodel Vlaanderen die kunnen doorgaan als scenario's voor de betonstop en het BAU-scenario.	49
3.9	Verschillende toetsingsmogelijkheden voor de centraliteit van de huidige toestand (2010) en deze van de scenario's voor het toekomstig landgebruik (2050).	51
3.10	Onderverdeling in aantal van de afzonderlijke kernen voor de huidige toestand (2010) en voor de scenario's voor het toekomstig landgebruik (2050), zie ook de Figuren B.1 tot en met B.7 in Bijlage B.	52

4.1	Waardes voor de oppervlakteafstromingscoëfficiënt C afhankelijk van het landgebruik, de helling en de bodem [Liu en De Smedt, 2004].	65
4.2	De parameters hun omschrijving voor het stroomgebied van de Grote Nete voor het uurlijks NAM-model (2005) en het nieuwe dagelijkse NAM-model (2010) [Tran Quoc et al., 2015].	67
4.3	De parameters voor het NAM-model van het stroomgebied van de Grote Nete in het verleden na toepassen van de ruimtelijke disaggregatie op de modelparameters van 2010.	73
4.4	NSE-waardes voor de verschillende periodes, gerekend met de verschillende sets van modelparameters.	79
4.5	De parameters van het NAM-model voor de huidige toestand (2010) en voor de verschillende landgebruiksscenario's (2050).	82
4.6	Vershil [%] tussen het debiet horende bij de overschrijdingskans voor elk landgebruiksscenario en de toestand in 2010 (zie ook Figuur 4.23). . . .	87
4.7	De terugkeerperiodes horend bij een bepaald afvoerdebiet voor de verschillende landgebruiksscenario's in vergelijking met de terugkeerperiodes voor het landgebruik in 2010.	89
4.8	Toename/afname van de verharding, piekafvoer en laagwaterafvoer (afhankelijk van de overschrijdingskans) voor het verleden ten opzichte van de toestand in 2010.	91
4.9	Toename/afname van de verharding, piekafvoer en laagwaterafvoer (afhankelijk van de overschrijdingskans) voor de verschillende landgebruiksscenario's ten opzichte van de toestand in 2010.	92

Hoofdstuk 1

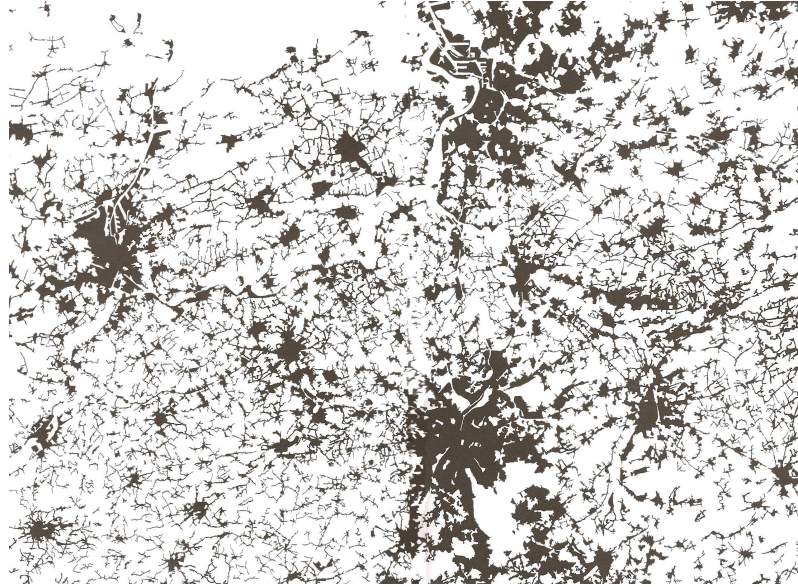
Inleiding

In deze masterproef zal de invloed van het landgebruik op rivieroverstromingen in Vlaanderen worden onderzocht. Meer bepaald zal er onderzocht worden welke impact het toekomstig landgebruik, en bijhorend de verharding, zal hebben op de hydrologie in Vlaanderen in het kader van het al dan niet realiseren van de betonstop.

Van alle natuurrampen over de hele wereld in de periode 1995-2015 waren 47% overstromingen, hierbij waren naar schatting 2 tot 3 miljard mensen getroffen. Eén van de redenen hiervoor was het ongecontroleerd bouwen in overstromingsgebieden [UNISDR, 2015]. Over de hele wereld blijft de verstedelijkingsgraad of urbanisatiegraad toenemen, veroorzaakt door de explosieve bevolkingstoename van de laatste decennia en het feit dat de bevolking meer en meer naar de steden toe trekt voornamelijk omwille van de tewerkstelling en de voorzieningen die de steden bieden. Tegen 2050 wordt voorspeld dat 70% van de wereldbevolking in stedelijke gebieden zal leven, vaak in kustgebieden of aan rivieren. Deze uitbreiding van stedelijke gebieden heeft ook verschillende nadelen op vlak van milieu (lucht- en waterverontreiniging, afvalverwerking, congestie), wat zich dan ook reflecteert op de gezondheid van de inwoners en leefbaarheid van de steden zelf [United Nations, 2008].

Deze nadelen zijn ook merkbaar in Vlaanderen, dat een grote verstedelijkingsgraad kent, zij het vaak op een versnipperde manier [Ruimte Vlaanderen, 2016]. Als de bebouwde oppervlakte voor heel Europa beschouwd wordt, valt Vlaanderen hierbij duidelijk op door de verspreide manier en hoeveelheid van bebouwde oppervlakte [De Geyter et al., 2002]. Als dan bijvoorbeeld de bebouwde oppervlakte in de Vlaamse Ruit vergeleken wordt met deze in de Nederlandse Randstad, welke te zien zijn op Figuur 1.1 en Figuur 1.2, dan is er een groot verschil zichtbaar. In vergelijking met Nederland kan gesteld worden dat Vlaanderen praktisch volgebouwd geraakt en de open ruimte nog nauwelijks omvangrijk aanwezig is, zoals het geval in Nederland. Deze vergelijking schetst de problematiek omtrent de ruimtelijke ordening in Vlaanderen en de noodzaak om de inname van ruimte aan banden te leggen.

Deze trend in toenemende verstedelijking en bebouwing zal er ook tot leiden dat er meer oppervlakte, door stedelijke verhardingen (wegen, gebouwen, ...), ondoor-



Figuur 1.1: Bebouwde oppervlakte in de Vlaamse Ruit (zwart) [De Geyter et al., 2002].



Figuur 1.2: Bebouwde oppervlakte in de Nederlandse Randstad (zwart) [De Geyter et al., 2002].

dringbaar wordt, waar dan ook meer op ingespeeld zal worden in deze masterproef. Aangezien een natuurlijk landgebruik doordringbaar is, is het daardoor logisch dat ondoordringbaar landgebruik zoals de stedelijke verharding de hydrologie van het plaatselijk rivierbekken zal veranderen. In het eerste hoofdstuk wordt gekeken naar de ondervindingen van verschillende studies wereldwijd op dit vlak. Logischerwijs zal

meer verharde (en ondoordringbare) oppervlakte leiden tot meer oppervlakteafstroming waardoor de rivierafvoermaxima zullen toenemen door de snellere afstroming. Dit is nadelig op vlak van overstromingsbeheer van de waterlopen en rioleringsnetwerken [USGS, 2003].

Om de problematiek rondom het versnipperd en willekeurig toenemende stedelijk gebied in Vlaanderen aan te pakken heeft de Vlaamse Regering op 30 november 2016 het Witboek Beleidsplan Ruimte Vlaanderen bekendgemaakt, dat het beleidsplan en visie van het departement Ruimte Vlaanderen naar ruimte- en landgebruik toe omschrijft [Ruimte Vlaanderen, 2016, Ruimte Vlaanderen, 2017]. Het voornaamste aspect hierbij is het terugdringen van de dagelijkse toename in ruimtebeslag dat momenteel ongeveer 6 ha/dag bedraagt. Tegen 2025 zou dit slechts 3 ha/dag mogen zijn om deze dan volledig terug te dringen tot 0 ha/dag in 2040 [Ruimte Vlaanderen, 2016]. In de volksmond is deze maatregel beter bekend als de betonstop.

In deze masterproef zal getracht worden om het effect te achterhalen op de hydrologie van de betonstop in vergelijking met het niet toepassen van de betonstop. Hierbij is het Witboek Beleidsplan Ruimte Vlaanderen als startpunt genomen voor het bekomen van landgebruiksscenario's voor de betonstop [Ruimte Vlaanderen, 2016]. Het achterhalen van het effect op de rivierafvoer van veranderend landgebruik in kader van de betonstop vormt de onderzoeksvraag voor deze thesis.

De thesis kan worden opgesplitst in 2 belangrijke delen. Het eerste deel zal handelen over de betonstop zelf. Voorspellingen dienen gemaakt te worden voor de impact van de realisatie van de betonstop op het landgebruik in Vlaanderen. Dit wordt gerealiseerd met behulp van ArcGIS [ArcGIS, 2018] en de open source GIS-software QGIS [QGIS, 2018]. Deze voorspellingen zullen bestaan uit verschillende landgebruiksscenario's voor de betonstop en het BAU-scenario ('Business As Usual'), waarbij de invulling van de ruimte in Vlaanderen zijn 'normale' gang kan gaan. Hierbij zullen de scenario's gebaseerd zijn op bestaande landgebruikskarten en/of landgebruiksscenario's.

Het tweede deel heeft betrekking tot het achterhalen van het effect van de betonstop op de hydrologie door middel van modellering. Elk landgebruiksscenario vanuit het eerste deel bestaat uit een voorspelling van het landgebruik in Vlaanderen in 2050. Dit landgebruik heeft dan zijn effect op de hydrologie. Om het veranderend landgebruik in rekening te brengen is geopteerd voor de methode van de ruimtelijke disaggregatie die de modelparameters beschrijft in functie van het (aangepast) landgebruik. Dit is toegepast op het stroomgebied van de Grote Nete.

Tot slot is er nog een algemene conclusie gevormd, alsook een discussie van de bekomen resultaten en voorstellen tot verder onderzoek.

Hoofdstuk 2

Literatuurstudie

Dit hoofdstuk zal een overzicht geven van de studies met betrekking tot deze masterproef. Het eerste onderdeel beschrijft de betonstop zelf. De visie en standpunten van de Vlaamse Regering hieromtrent zullen besproken worden om zo tot een finaal kader voor de toekomstige landgebruiksscenario's met toepassing van de betonstop te komen. De reeds bestaande landgebruikskaarten zullen kort besproken worden in het tweede onderdeel, alsook de reeds bestaande landgebruiksscenario's. Het derde onderdeel zal handelen over de impact van landgebruik op de hydrologie. Het effect van verschillende veranderingen in landgebruikstypes op een rivierbekken en zijn karakteristieken wordt besproken. Het vierde onderdeel haalt het effect van de klimaatverandering aan. Aangezien er voorspellingen naar de toekomst worden gedaan, is de klimaatverandering zeker ook een belangrijke factor om mee rekening te houden. Maatregelen om al de effecten in zekere mate te beperken worden overlopen in het vijfde onderdeel. Het zesde onderdeel geeft kort enkele gelijkaardige studies weer, uitgevoerd op rivierbekkens in België. Uiteindelijk wordt er nog een kort besluit geformuleerd.

2.1 De betonstop

De term betonstop is ontstaan nadat de Vlaamse Regering op 30 november 2016 het Witboek Beleidsplan Ruimte Vlaanderen heeft goedgekeurd. Hieraan vooraf ging het Groenboek, bekendgemaakt in mei 2012. De volgende en laatste stap van de Vlaamse Regering (na eerst het Groenboek en het Witboek) in de huidige legislatuur is het effectieve Beleidsplan [Ruimte Vlaanderen, 2016, Ruimte Vlaanderen, 2012]. Het Witboek dient als kader voor de toekomstige ruimtelijke ontwikkeling in Vlaanderen met doelstellingen tot 2050. De principes die de Vlaamse Regering wil toepassen voor haar ruimtelijke ordening zijn eveneens uiteengezet in het Witboek [Ruimte Vlaanderen, 2016].

Dit kader en de bijhorende principes worden vervolgens kort besproken aangezien deze een basis gaan vormen voor de toekomstige landgebruiksscenario's die zullen opgesteld worden voor het jaar 2050 in het verdere verloop van deze studie, om hiermee dan verder het effect van het vooropgestelde landgebruik (met de betonstop)

in Vlaanderen te achterhalen op de hydrologie en meer bepaald de rivieroverstromingen. Verder zullen deze landgebruiksscenario's ook vergeleken worden met de BAU-scenario's (Business-As-Usual).

Voor deze studie wordt de nadruk uiteraard gelegd op de maatregelen en doelstellingen in het Witboek met betrekking tot het ruimtegebruik en de verharding. Er dient vermeld te worden dat het Witboek ook handelt over andere onderwerpen die hier hetzij rechtstreeks of onrechtstreeks mee in verband staan, met thema's zoals economie, energie, (inter)nationale verbindingen, klimaatrobuustheid van open ruimtes, enzovoort. Voor de volledige uiteenzetting hieromtrent wordt verwezen naar het Witboek zelf [Ruimte Vlaanderen, 2016].

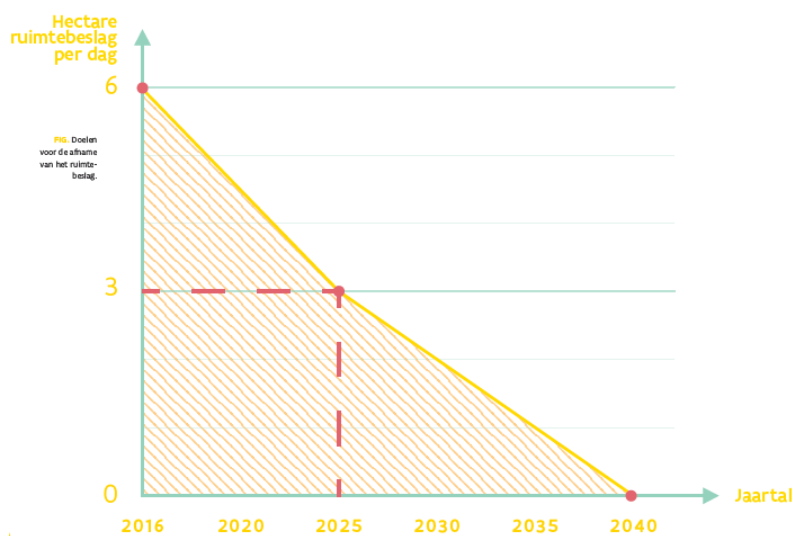
De kern van de betonstop is het terugdringen van de dagelijkse toename van het ruimtebeslag. Het ruimtebeslag is als volgt gedefinieerd in het Witboek: *"Het ruimtebeslag bestaat uit de ruimte, ingenomen door onze nederzettingen, dus door huisvesting, industriële en commerciële doeleinden, transportinfrastructuur, recreatieve doeleinden, serres etc. Parken en tuinen maken hier ook deel van uit."* [Ruimte Vlaanderen, 2016]. Het is het deel van de ruimte waar de biofysische functie niet primeert [Poelmans et al., 2016a]. Verder dient er nog onderscheid gemaakt te worden tussen ruimtebeslag en verharding. Verharding is het (semi-)ondoorlatende onderdeel van het ruimtebeslag (gebouwen, infrastructuur, ...), deze zal de hydrologie en andere functies van de bodem wijzigen [Ruimte Vlaanderen, 2016]. Concreet betekent dit dat het ruimtebeslag al het effectief landgebruik met een invulling (wonen, bedrijvigheid, recreatie, landbouw, ...) omslaat en dus bestaat uit een deel verharding (gebouwen, infrastructuur, ...) en een deel dat niet verhard is, zoals bijgelegen of alleenstaande groene zones (tuinen, parken, recreatiedomeinen, ...).

Het totale ruimtebeslag in Vlaanderen bedroeg 32,1% in 2013 en 33% in 2014 van de oppervlakte van Vlaanderen. Zoals eerder beschreven vallen hieronder ook de open ruimtes. Voor deze studie is voornamelijk de verharding van belang, deze bedroeg in 2008 ongeveer 12,9%, in 2014 volgens het Witboek bedroeg de verharding in Vlaanderen 14% en 14,25% in 2012 volgens de waterondoorlaatbaarheidsskaart opgemaakt door het AGIV (Agentschap voor Geografische Informatie Vlaanderen) [De Meyer et al., 2011, Poelmans en Engelen, 2014, Ruimte Vlaanderen, 2016, AGIV, 2016].

De huidige dagelijkse toename van ruimtebeslag bedraagt 6 ha/dag. Het gaat hierbij om netto ruimtebeslag, dit wil zeggen dat het omvormen van bestaand ruimtebeslag niet als bijkomstig ruimtebeslag wordt gerekend en het schrappen van bestaand ruimtebeslag als afname geldt. In het verleden bedroeg de toename in ruimtebeslag 12 ha/dag (1985-1996), waarna deze geleidelijk aan gedaald is tot 6 ha/dag (1996-2002) om vervolgens sinds 2002 stabiel te blijven op 6 ha/dag [Ruimte Vlaanderen, 2016, Poelmans en Engelen, 2014]. Het is deze toename die moet dalen zoals gesteld in het Witboek van Ruimte Vlaanderen. Er wordt een lineaire daling aangenomen: tegen 2025 mag de toename van ruimtebeslag slechts 3 ha/dag bedragen, tegen 2040 mag er geen enkele toename meer zijn in ruimtebeslag [Ruimte Vlaanderen, 2016]. Deze dalende trend staat ook weergegeven op Figuur 2.1. Deze daling is het

voornaamste aspect betreffende de betonstop.

Indien de huidige trend van 6 ha/dag zich door zou zetten, dan zou tegen 2050 het ruimtebeslag 41,5% van de totale oppervlakte van Vlaanderen omslaan, in het slechtste geval zelfs 50% [Ruimte Vlaanderen, 2016]. Bij het bepalen van de eerste waarde is er aangenomen dat de toename over de hele periode constant blijft, voor de tweede waarde zou de toename licht stijgen [Engelen, 2016].



Figuur 2.1: Geleidelijke afname van de toename in ruimtebeslag per dag zoals vooropgesteld in het Witboek [Ruimte Vlaanderen, 2016].

De reden voor de betonstop is voornamelijk om de ruimte in Vlaanderen een betere structuur te geven en te zorgen voor meer ruimtelijke samenhang. Deze is tegenwoordig zeer versnipperd, wat ook blijkt uit de studie van het Vlaamse Instituut voor Technologisch Onderzoek (VITO), waarin is aangetoond dat het aantal inwoners per ha bebouwde ruimte daalt met de jaren [Poelmans en Engelen, 2014]. Ook op het gebied van infrastructuur en voorzieningen is deze verspreiding kostelijk en problematisch (fileproblemen, kost voor energie- en watervoorzieningsnetwerken, ...). De redenen voor deze historische evolutie naar een versnipperd landgebruik en ruimtebeslag zijn onderzocht door het VITO [Poelmans en Engelen, 2014].

Het is mede door bovenstaande genoemde problemen dat de Vlaamse Regering wil inzetten op het versterken van de bestaande 'kernen' (de steden) en de open ruimtes. Het bestaande ruimtebeslag heeft nog (her)ontwikkelingskansen (renovatie, herbestemming ed.), en dit alles valt onder de termen verdichting en ruimtelijk rendement [Ruimte Vlaanderen, 2016]. Deze verdichting geeft ook meer ontwikkelingskansen aan de open ruimte, dat op zijn beurt impact heeft op de voedselvoorziening (landbouw), de klimaatrobuustheid en hydrologie in Vlaanderen (door realisatie van netwerk van blauwgroene aders doorheen de open en bebouwde ruimte) [Ruimte Vlaanderen, 2016], vooral het laatste zal van belang zijn voor dit onderzoek.

Waar dat nu deze verdichting moet worden toegepast is nog niet definitief vastgelegd. Het VITO heeft onderzoek uitgevoerd naar waar het beste verdicht kan worden en waar het ruimtelijk rendement verhoogd kan worden [Engelen, 2016, Poelmans et al., 2016a, Verachtert et al., 2016]. In deze rapporten is er gezocht naar de locaties met de beste ontwikkelingskansen, voorzieningen en openbaar vervoer. Logischerwijs zijn de huidige steden herkenbaar op de kaarten resulterend uit dit onderzoek.

De gebieden die in aanmerking komen voor het verhogen van ruimtelijk rendement zullen hierna de kernen zijn die versterkt zullen worden, en waar dus het bijkomend ruimtebeslag bij voorkeur zich zou situeren.

Al de bovenstaande opgesomde onderdelen van het beleid omtrent de betonstop zullen, zoals reeds eerder gesteld, het kader vormen voor de landgebruiksscenario's die in het verdere verloop van deze studie opgesteld gaan worden. Het effect van deze verandering in toekomstig landgebruik ten opzichte van de BAU-landgebruiksscenario's op de hydrologie zal de onderzoeksvraag zijn voor deze masterproef.

2.2 Landgebruikskarten en scenario's

Landgebruikskarten geven voor een bepaald jaar weer wat het landgebruik is voor een bepaald gebied. Voor elke rastercel, gedefinieerd door de resolutie van de kaart, is het voornaamste landgebruik (volgebouwd gebied, bos, akker, ...) weergegeven. Deze karten worden opgebouwd met behulp van allerlei satellietdata via 'remote sensing' (luchtfoto's, LandSat, ...), topografische-, bodem- en vegetatiekarten, het kadasterregister en andere overheidsgerelateerde bronnen [Poelmans, 2010, Copernicus Land Monitoring Service, 2012, Poelmans en Engelen, 2014, Poelmans et al., 2016b, CCI, 2015, VITO, 2018]. De gedetailleerdheid van de kaart is dus enerzijds afhankelijk van de resolutie en anderzijds van de onderverdeling in verschillende klassen van landgebruik. De output van de gebruikte hydrologische modellen voor het achterhalen van het effect van verandering in landgebruik op de hydrologie hangt in beperkte mate af van deze data, alsook van de structuur van het model zelf [Bormann et al., 2009].

Voor Vlaanderen zijn er verschillende landgebruikskarten beschikbaar. Deze omvatten de landgebruikskarten aangemaakt door het VITO ook gekend onder de naam Ruimtemodel Vlaanderen [VITO, 2018], door het CCI (ESA) [CCI, 2015], de CORINE Land Cover data [Copernicus Land Monitoring Service, 2012], en deze gemaakt in de doctoraatsstudie van Poelmans [Poelmans, 2010]. Al deze landgebruikskarten hebben een verschillende resolutie en zijn verschillend in omvang. Het VITO heeft aan de hand van de meeste van deze karten het ruimtebeslag voor Vlaanderen afgeleid, met uiteraard verschillende resultaten tot gevolg [Poelmans en Engelen, 2014]. In het latere verloop van deze thesis is er uit deze sets van landgebruikskarten slechts één set gekozen die dan zal dienen om uit de beschikbare data een vertrekpunt te nemen voor het opmaken van de eigen scenario's voor de betonstop. Al deze landgebruikskarten zijn hieronder nog overlopen.

In eerste instantie worden de landgebruikskaarten die opgemaakt zijn voor een groter gebied dan enkel Vlaanderen beschouwd. Dit zijn de kaarten opgemaakt door het CCI (ESA) en de CORINE Land Cover Data door de Copernicus Land Monitoring Service [Copernicus Land Monitoring Service, 2012, CCI, 2015]. De eerst genoemde is in rasterformaat (37 klassen) en omvat de hele wereld. Deze kaart is opgemaakt voor de toestand in 2015. De celgrootte bedraagt 300 m, wat op zich een lagere resolutie is. De tweede is eveneens in rasterformaat (44 klassen) beschikbaar en is enkel opgemaakt voor Europa. Deze beschrijft het landgebruik voor de toestand in 2012. Voor deze kaart bedraagt de celgrootte 100 m, wat een hogere resolutie is dan deze voor kaart van het CCI [Copernicus Land Monitoring Service, 2012, CCI, 2015].

Verder zijn er nog landgebruikskaarten beschikbaar die opgemaakt zijn enkel voor Vlaanderen. Dit zijn de kaarten vanuit het doctoraat van Poelmans en de kaarten van het Ruimtemodel Vlaanderen [Poelmans, 2010, VITO, 2018]. De kaarten van Poelmans zijn in rasterformaat (6 klassen) en beschrijven de toestand in 1976, 1988, 2000 en maken een voorspelling voor 2050 afhankelijk van de urbanisatiegraad (Low, Medium, High). De celgrootte bedraagt 100 m [Poelmans, 2010]. Het Ruimtemodel Vlaanderen beschrijft de toestand in 2010 en maakt voorspellingen voor 2020, 2030, 2040 en 2050. Hierbij is gebruik gemaakt van 5 verschillende scenario's (Business-As-Usual, Global Economy, Regional Communities, Strong Europe, Transatlantic Markets). Voor verdere informatie rondom deze scenario's wordt verwezen naar het Ruimtemodel Vlaanderen zelf. Deze kaarten zijn eveneens beschikbaar in rasterformaat (38 klassen) en hebben een celgrootte van 100 m [VITO, 2018].

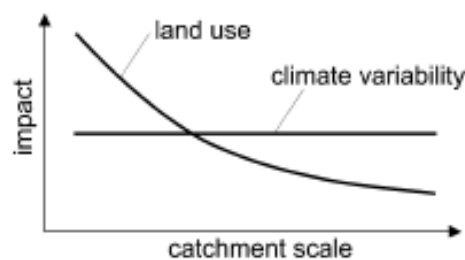
Voor gedetailleerde informatie omtrent de opbouw van deze kaarten ed. wordt verwezen naar de studie of literatuur betreffende deze kaarten. Voor al deze scenario's zijn er geen kaarten of scenario's die specifiek de betonstop beschrijven. Deze scenario's kunnen wel verder vergeleken worden met het landgebruik met toepassing van de betonstop, zoals opgemaakt later in deze studie. Ook zal de mogelijkheid tot benadering van de betonstop van de reeds beschikbare toekomstige landgebruiksscenario's indien mogelijk verder onderzocht worden.

2.3 Impact landgebruik op hydrologie

Deze sectie geeft de ondervindingen met relatie tot de impact van verschillende soorten landgebruik en het effect van veranderd landgebruik op de hydrologie weer. In de laatste decennia heeft het effect van landgebruik op de hydrologie steeds meer aan belang gewonnen, zeker met betrekking tot de oppervlakteafstroming, de overstromingsrisico's en beheer van de waterlopen. Dit effect is voornamelijk belangrijk op regionale schaal en voor het bekken op zich [Hundecha en Bárdossy, 2004, Ahn en Merwade, 2017]. Maar het achterhalen van het effect van deze verandering in landgebruik blijft nog steeds een moeilijkheid, zeker ook omwille van het verschil in ondergrond, geografie en klimaat voor verschillende bekkens over heel de wereld [USGS, 2003, Guo et al., 2008, Breuer et al., 2009, Ahn en Merwade, 2017].

Meest eenvoudig kan gesteld worden dat het landgebruik het meeste effect heeft op de oppervlakteafstroming en daarbij horend de oppervlakteafstromingscoëfficiënt, die naast landgebruik ook nog afhankelijk is van andere factoren (o.a. geografie) [Rose en Peters, 2001]. De meeste studies doen onderzoek naar deze relatie. De impact van het landgebruik is het best zichtbaar op bekkenschaal zelf en neemt af met de grootte van het bekken. Voor grotere rivierbekkens zal de impact van het klimaat (zowel de natuurlijke als onnatuurlijke variatie in het klimaat) meer doorwegen dan de impact van het landgebruik (zie ook sectie 2.4 en Figuur 2.2) [Blöschl et al., 2007, Trudeau en Richardson, 2016, Apollonio et al., 2016]. De laatste studie ondervond dat verandering in landgebruik (verstedelijking) niet direct leidt tot meer oppervlakteafstroming, maar dat deze ook afhankelijk is van andere factoren specifiek voor het bekken zelf.

Er is veel onderzoek gedaan naar de impact van landgebruik op de hydrologie [Cruise et al., 2010] met verschillende resultaten. In deze sectie wordt een overzicht van verschillende studies gegeven. Al de volgende studies zijn uitgevoerd op verschillende bekkens, verschillend in grootte, maar de conclusies zijn globaal dezelfde, zij het met andere grootteorde.



Figuur 2.2: Relatie tussen impact van landgebruik en klimaat en grootte van het bekken [Blöschl et al., 2007].

Er zijn verschillende veranderingen in landgebruik mogelijk, zoals bijvoorbeeld, verandering van bos naar open land en vice versa, en verandering naar stedelijke gebieden met verhoging van de verharding en ondoorlatendheid. De ondervindingen voor beide zullen kort besproken worden. Voor het achterhalen van het landgebruik in de komende studies zijn landgebruikskarten opgesteld (indien nog niet bestaande) of is er gebruikt gemaakt van bestaande landgebruiksscenario's, voor beide wordt verwezen naar sectie 2.2.

2.3.1 Effect van verandering bos - akkers

Eerst wordt het effect van de landgebruiksverandering van akker naar bos, en omgekeerd, besproken. Ontbossing heeft een grote impact op de hydrologie, voornamelijk op de oppervlakteafstroming [Ahn en Merwade, 2017]. Veel studies beschrijven het effect van ontbossing en bebossing van het land op de hydrologie [Breuer et al., 2009],

een greep uit deze studies wordt hier weergegeven.

Ontbossing leidt tot een afname van de evapotranspiratie (ET), een toename van de totale oppervlakteafstroming, toename van de duur van de pieken in afvoer en de magnitude van de piek [Kiersch, 2000, Cruise et al., 2010, Ahn en Merwade, 2017]. Ook de jaargemiddelde rivierafvoer zal door ontbossing toenemen [Siriwardena et al., 2006]. Al deze effecten van ontbossing zijn te wijten aan een verandering van de infiltratie van het regenwater in de ondergrond [Siriwardena et al., 2006, Ahn en Merwade, 2017], het drastisch verminderen van de capaciteit om het regenwater op te houden en te bergen in de wortelzone, en de grote afname van de transpiratie-oppervlakte [Guo et al., 2008]. Hierdoor zal er een wijziging in de waterbalans optreden, voornamelijk op de korte termijn [Breuer et al., 2009]. Meer bepaald zal vooral de snelle afvoer toenemen door gebrek aan vegetatie (die de afstroming van regenwater vertraagt en ophoudt), de trage afvoer zal dalen door verminderde infiltratie (meer afstroming). Dit is bevestigd door meerdere studies [Kiersch, 2000, Hundecha en Bárdossy, 2004, Siriwardena et al., 2006, Huisman et al., 2009]. Dit zal het overstromingsrisico (grote snelle afvoer) en het risico op droogtes verhogen (lage trage afvoer) [Guo et al., 2008].

Toename van grond voor landbouw (akkers), ten koste van bossen en grasland die beide in grotere mate vegetatie bevatten, leidt logischerwijs dus tot een toename van de afvoer in de bijhorende rivier [Huisman et al., 2009]. De conversie van bosland naar grasland zal een minder uitgesproken effect hebben op de rivierafvoer dan de conversie van bosland naar akkers [Siriwardena et al., 2006]. Ook zal het gevaar op bodemerosie toenemen bij ontbossing omdat de stabilisatie door de wortelzone verloren gaat [Kiersch, 2000, Guo et al., 2008, Misra, 2011].

Omgekeerd, leidt bebossing (omvorming van akkers tot bos) tot het tegenovergestelde effect, wat gunstig is voor het beperken van de pieken in rivierafvoer [Ahn en Merwade, 2017]. Ook zal er een significante reductie zijn in de totale oppervlakteafstroming, net zoals voor de piekafvoer [Hundecha en Bárdossy, 2004]. De rivierafvoer zal bij bebossing net afnemen. Ook zal de duur van een piek korter worden [Cruise et al., 2010]. De redenen voor dit omgekeerd effect zijn voornamelijk de evapotranspiratie (ET), die zal voor bossen hoger liggen (door een groter transpiratieoppervlakte) dan voor akkers (zonder vegetatie), alsook door de infiltratie en interceptie [Hundecha en Bárdossy, 2004, Guo et al., 2008]. Dezelfde studies toonde aan dat al deze effecten het meeste effect hadden op kleine piekgebeurtenissen. Dit geldt eveneens voor verandering van landgebruik naar verharde stedelijke oppervlaktes.

Bebossen van gebieden zal ervoor zorgen dat deze meer weerstand zullen hebben tegen de verandering van het klimaat aangezien dit voornamelijk zal resulteren in meer extremen, zie sectie 2.4. Het effect van de klimaatverandering kan mogelijks zelfs volledig teniet gedaan worden door de juiste hoeveelheid bebossing [Reynard et al., 2001].

2.3.2 Effect van stedelijke verharding

Deze masterproef legt de focus op het effect op de hydrologie van de verandering van landgebruik naar stedelijke verharding. Daarom is het belangrijk om de ondervindingen van studies wereldwijd hier kort te bespreken, ter vergelijking met de later bekomen eigen resultaten.

Verandering van het landgebruik naar stedelijk landgebruik brengt ontbossing (zie sectie 2.3.1) en een toename van verharding met zich mee, wat resulteert in een toename van ondoordringbare oppervlakte. Dit zal de hydrologische cyclus van het rivierbekken veranderen [USGS, 2003, O'Driscoll et al., 2010]. Voor deze gebieden is er geen mogelijkheid tot infiltratie meer, waardoor de afvoer van regenwater via afvoernetwerken gebeurt die rechtstreeks of onrechtstreeks (via WWTP) naar de naburige waterloop leiden [Rose en Peters, 2001, Miller et al., 2014]. De belangrijkste effecten van verstedelijking zijn dat een groot deel van de neerslag zal resulteren in oppervlakteafstroming, de responstijd van het bekken zal versnellen, de grootte van de pieken in de rivierafvoer zal toenemen, de trage afvoer zal afnemen (door minder infiltratie en percolatie) en de waterkwaliteit zal afnemen (door afvoer van afvalwater) [Shaw, 1994]. Voor de Zuidelijke Verenigde Staten is een studie uitgevoerd die verschillende studies in het gebied samenvoegt en dus een overzicht geeft van alle ondervinden met betrekking tot stedelijke verharding en de hydrologie. Alle ondervindingen zijn dezelfde met verschil in grootteorde [O'Driscoll et al., 2010]. Hieronder wordt nog een overzicht gegeven van deze en andere ondervindingen van studies wereldwijd.

Voorafgaand aan stedelijke ontwikkeling is vaak het ontbossen van een gebied voor die ontwikkeling. Hierdoor zal, zoals reeds aangehaald in sectie 2.3.1, de evapotranspiratie (ET) dalen, en zal er meer oppervlakteafstroming zijn omwille van minder ophouding- en bergingscapaciteiten van de oppervlakte [Cheng en Wang, 2002, Ravazzani et al., 2016]. De daling in ET is mede ook door de ondoorlatendheid van het oppervlak [Rose en Peters, 2001, He et al., 2013]. Deze ondoorlatendheid van de oppervlakte is typerend voor stedelijke gebieden, die bestaan uit wegen, gebouwen, parkings, ... [Cheng en Wang, 2002, O'Driscoll et al., 2010]. Door het afdichten van de oppervlakte zal er ook in grote mate minder infiltratie zijn wat resulteert in minder grondwateraanvulling en een kleine grondwaterafstroming (base flow). Dit is een eerste belangrijk effect en is bevestigd door meerdere studies [Kiersch, 2000, Rose en Peters, 2001, USGS, 2003, Guo et al., 2008, Semadeni-Davies et al., 2008, Misra, 2011, Miller et al., 2014, Tavakoli et al., 2014].

Het verhard oppervlak en de afvoersystemen zullen zorgen voor een snelle oppervlakteafstroming, en zullen de natuurlijke afstroming veranderen en de recessieconstante en responstijd doen dalen [Reynard et al., 2001, Galster et al., 2006, Miller et al., 2014, Hameed, 2017]. Dit kan bijvoorbeeld op een eenvoudige manier achterhaald worden door de 'Curve Number (CN)' te beschouwen, dat afhankelijk is van de ondergrond en het type landgebruik. Een hoge CN is typisch voor stedelijke verhardingen en zal tot een snelle oppervlakteafstroming leiden [He et al., 2013, Apollonio

et al., 2016, Zope et al., 2016, Ravazzani et al., 2016, Hameed, 2017]. Deze snelle oppervlaktestroming blijkt ook uit een studie voor het Wu-Tu bekken in Taiwan, waar deze gemodelleerd is als een aaneenschakeling van reservoirs (NASH-model). In deze studie is ondervonden dat het aantal reservoirs daalde met toenemende verhardingsgraad, wat resulteert in een snellere afvoer [Cheng en Wang, 2002]. Tekenend voor de stedelijke hydrologie is als gevolg van de snelle oppervlakteafstroming de spitse vorm van de rivierafvoerpieken bij grotere hoeveelheden neerslag [Rose en Peters, 2001]. Deze pieken in de rivierafvoer zullen, naast het sneller tot stand komen, ook in grootte stijgen, door de toename van de totale oppervlakteafstroming (snelle afvoer) omwille van de ondoorlatende verharding. Dit is vrijwel het belangrijkste effect en is bevestigd door meerdere studies [Reynard et al., 2001, Cheng en Wang, 2002, Bronstert et al., 2002, USGS, 2003, Hundecha en Bárdossy, 2004, Pfister et al., 2004, Galster et al., 2006, Semadeni-Davies et al., 2008, Cuo et al., 2009, O'Driscoll et al., 2010, Hamdi et al., 2011, Misra, 2011, Poelmans et al., 2011, He et al., 2013, Miller et al., 2014, Owrangi et al., 2014, Yang et al., 2016, Zope et al., 2016, Ravazzani et al., 2016, Trudeau en Richardson, 2016, Hameed, 2017].

Deze toename in piekafvoer en verkorting van de duur, zal resulteren in de zogenaamde 'flash floods', korte maar toch enigszins substantiële overstromingen veroorzaakt door minder ernstige neerslag [Semadeni-Davies et al., 2008]. Indien meerdere van deze 'flash floods' zich in verschillende deelbekkens voordoen, kan dit leiden tot grotere overstromingen (met hogere terugkeerperiode) in de hoofdtak van het bekken door de superpositie van de verschillende kleinere overstromingen in de deelbekkens [Bronstert et al., 2002, Pfister et al., 2004].

De verhardingsgraad heeft de grootste impact op de rivierpiekafvoeren en recessie-constante [Miller et al., 2014]. Het effect van stedelijke verharding op de pieken in rivierafvoer is verschillend per gebied, en is daarnaast nog afhankelijk van de locatie in een bekken en de verstedelijkingsgraad [O'Driscoll et al., 2010]. De uitgestrektheid van het overstromingsgebied en de waterhoogte zal, als gevolg van de grotere rivierafvoerpieken voor een bepaalde terugkeerperiode, ook toenemen [Wang en Yang, 2013, Yang et al., 2016].

Voor overstromingen met lagere terugkeerperiodes (minder dan 2 jaar) of kleine overstromingen zullen de effecten die hierboven besproken zijn meer uitgesproken zijn dan voor overstromingen met grotere terugkeerperiodes (meer dan 10 jaar) of grote overstromingen [Hundecha en Bárdossy, 2004, O'Driscoll et al., 2010, Poelmans et al., 2011, Wang en Yang, 2013, Zope et al., 2016]. De verzadigingsgraad van de bodem speelt hierbij een rol omdat bij grote gebeurtenissen de bodem verzadigd zal zijn, waar dit bij kleine gebeurtenissen net omgekeerd zal zijn [Poelmans et al., 2011]. Hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen cyclonische en convectieve neerslagcellen. De eerste resulteert in neerslag over een groot gebied en met lange duur, de tweede resulteert in hevige neerslagintensiteiten over een klein gebied met korte duur (onweer) [Pfister et al., 2004]. Indien de bodem verzadigd is, zoals voor de grote gebeurtenissen na verloop van tijd, zal er nauwelijks nog infiltratie zijn. Daardoor is het verschil in oppervlakteafstroming tussen stedelijk en niet-stedelijk landgebruik minder groot bij hogere verzadigingsgraden [USGS, 2003, Poelmans

et al., 2011]. Kleine tot middelgrote overstromingen zullen dus met andere woorden frequenter voorkomen [USGS, 2003].

Ook zijn de effecten het duidelijkst zichtbaar bij een verandering van niet stedelijk naar stedelijk landgebruik. Indien de verstedelijking al ontwikkeld was en enkel de verstedelijkingsgraad op zich is toegenomen, zullen de effecten minder uitgesproken zijn dan voor een (eerste) omschakeling naar enigszins omvangrijke verstedelijking [Miller et al., 2014]. Verder zal er bij continue metingen een verschil zijn in meetwaarde afhankelijk van het moment in het jaar (seizoenen). Dit heeft ook een impact hebben op de resultaten, alsook op de mogelijkheid tot overstromingen. Tijdens droge (zomer)periodes (gekenmerkt door lagere grondwaterafstroming) bezit een waterloop namelijk nog voldoende bergingscapaciteit in zijn bedding [Trudeau en Richardson, 2016].

Naast de effecten van de verharding van de oppervlakte op zich, zijn er nog enkele anderen effecten op de rivieroverstromingen in de stedelijke gebieden. Het kanaliseren van de waterlopen in de stad zal het natuurlijke afstromingsproces van de desbetreffende waterloop versnellen (zoals voor de waterafvoersystemen bij de stedelijke verharding) [Yang et al., 2016] en de bergingscapaciteit van de rivier beperken omwille van een ingeperkte dwarsdoorsnede [Trudeau en Richardson, 2016]. Indien stedelijke gebieden aan de kust worden beschouwd is er nog het bijkomend effect van de getijdenwerking. Indien de afvoer van het regenwater direct in de zee of waterloop uitloopt en deze op zijn beurt direct in de zee uitmondt, kan dit problematisch zijn voor overstromingen aan de kust. Dit omwille van de hogere (natuurlijke) waterstand door het hoogtij [Semadeni-Davies et al., 2008, Zope et al., 2016].

Een ander effect is dat van het hitte-eiland. Lokaal (stedelijk gebied) zal de verharding leiden tot een warmer klimaat in vergelijking met landelijke gebieden waarbij het grootste verschil na zonsondergang optreedt. Dit omwille van onder meer een drogere oppervlakte, de hoge warmtecapaciteit van de typische bouwmaterialen (beton, asfalt, ...), minder evapotranspiratie door afwezigheid van vegetatie en minder warmte-uitwisseling met de onderste atmosfeer door verminderde luchtstroming/ventilatie en minder straling vanuit het grondoppervlak. De hoge warmtecapaciteit zal ertoe leiden dat de warmte na zonsondergang nog wordt vrijgegeven. Ook menselijke activiteit (uitlaatgassen, ...) draagt bij tot het hitte-eiland effect [O'Driscoll et al., 2010, Lauwaet et al., 2013, De Ridder et al., 2015, Zhao et al., 2016]. Het hitte-eiland effect zal leiden tot een toename van de neerslag in de stedelijke gebieden omwille van een verandering in de convectieve processen en luchtmassa's. Dit zal dan resulteren in nog grotere rivierafvoerpieken door het gecombineerd effect van de sterkere neerslag en de snellere oppervlakteafstroming omwille van de stedelijke verharding [O'Driscoll et al., 2010]. Belangrijk om te vermelden is dat uitbreiding van stedelijk gebied logischerwijs ook een uitbreiding van het hitte-eiland effect met zich meebrengt [Lauwaet et al., 2013, De Ridder et al., 2015]. Ook zal stedelijke uitbreiding of 'urban sprawl' (de typische lintbebouwing in Vlaanderen) het effect snel versterken [Zhao et al., 2016], omwille van het lage inwonersaantal per ondoordringbare oppervlakte

[O'Driscoll et al., 2010].

Uiteindelijk zijn er ook nog effecten van de stedelijke verharding die niet direct hun impact hebben op de rivieroverstromingen, deze worden nog kort besproken. Logischerwijs brengt de oppervlakteafstroming ook vervuiling vanop de verharding met zich mee, al dan niet (gedeeltelijk) behandeld in een WWTP. Dit kan leiden tot eutrofiëring dat resulteert in overmatige bloei van algen doordat er te veel nutriënten aanwezig zijn in de waterloop door instroom van onvoldoende gezuiverd afvoerwater [Liu et al., 2016, Liu et al., 2017]. Deze vervuiling is dan ook schadelijk voor de ecologie van de desbetreffende waterloop [Booth en Jackson, 1997, O'Driscoll et al., 2010, Misra, 2011], voornamelijk als de waterloop gekanaliseerd is [Booth et al., 2004].

Ook kan er door het verlagen van de grondwatertafel (op langere termijn) verzakking (subsidence) optreden, afhankelijk van de grondsoort [O'Driscoll et al., 2010]. Hiernaast kan in kustregio's het zakken van de grondwatertafel ook leiden tot de intrusie van zout water, met verzilting van de ondergrond als gevolg [Misra, 2011].

Finaal kan gesteld worden dat een toename van stedelijke verharding zal leiden tot een toename van de overstromingsvolumes voor een gebeurtenis met een bepaalde (kleine) terugkeerperiode en een verkorting van de duur van de overstroming. Ook de grondwaterafstroming zal dalen. Allen voornamelijk veroorzaakt door de grotere oppervlakteafstroming omwille van de ondoorlatende verharding.

2.4 Effect van klimaatverandering

Deze sectie zal de ondervindingen van studies voor het effect van de klimaatverandering op de rivieroverstromingen beschrijven. Het inbrengen van de klimaatverandering is belangrijk indien er voorspellingen zullen gemaakt worden naar de toekomst toe omdat klimaatverandering hier deel van zal uitmaken.

Eerst dient er nog een onderscheid gemaakt te worden tussen natuurlijke klimaatverandering (variabiliteit van het klimaat) en de klimaatverandering op zich (onnatuurlijk), die veroorzaakt is door menselijke activiteiten zoals bijvoorbeeld de uitstoot van broeikasgassen. Het klimaat varieert dus van nature, dit resulteert in een soort van oscillaties ten opzichte van een gemiddelde waarde (bv. van temperatuur, neerslag, ...) over een welbepaalde periode (enkele jaren tot decennia). Dit is de natuurlijke variabiliteit van het klimaat [Willems, 2013, Lengoasa, 2016, Michigan Sea Grant - Keely Dinse, 2017]. De klimaatverandering die veroorzaakt is door onder andere uitstoot van broeikasgassen is niet natuurlijk en zal resulteren in een soort trend, in dit geval een toename in temperatuur van de atmosfeer en oceanen [IPCC, 2014, Lengoasa, 2016].

In het verdere verloop van de literatuurstudie zal de term klimaatsverandering gebruikt worden voor de onnatuurlijke klimaatsverandering (lange termijn) veroorzaakt door de menselijke activiteit.

De klimaatverandering is, zoals eerder aangehaald, deels veroorzaakt door menselijke activiteiten (broeikasgassen, ...) en dit zal een grote impact hebben, voornamelijk ten gevolge van de temperatuurstijging. Het voorspellen van de effecten van de klimaatverandering blijft wel gepaard gaan met grote onzekerheden [IPCC, 2014]. Voor deze masterproef zal de klimaatverandering voornamelijk belangrijk zijn voor de weer gerelateerde en bijhorende de overstromingsgerelateerde effecten. Door de temperatuurstijging zal de hydrologische cyclus van een bepaald rivierbekken veranderen [Bronstert et al., 2002, Blöschl en Montanari, 2010]. Globaal gezien zal er een toename zijn in de extreme gebeurtenissen zoals bijvoorbeeld hevige regenval, zware overstromingen (rivier en kust) en droogtes [IPCC, 2014, Lengoasa, 2016]. Hierbij gaat het over de globale effecten, gesimuleerd en voorspeld met klimaatmodellen (Global Climate Models, GCMs), voor verschillende emissiescenario's en op grote schaal (>100 km) [IPCC, 2014]. De klimaatveranderingseffecten zijn ook nog afhankelijk van regio tot regio, op kleinere schaal (<50 km). Om een beeld te krijgen van de impact van het klimaat op de hydrologie op regionale schaal, moeten er lokale klimaatkarakteristieken (neerslag ed.) verkregen worden als input voor de hydrologische modellen van de beschouwde bekkens. Deze kunnen verkregen worden door het toepassen van statistische neerschalingmethoden (Statistical Downscaling, SD) die de output van de GCMs omzetten naar lokale klimaatkarakteristieken via empirische relaties of door gebruik te maken van regionale klimaatmodellen (Regional Climate Models, RCMs) waarvoor de randvoorwaarden komen van de output van een bijhorende GCM. Op de output van deze regionale klimaatmodellen kan eveneens statistische neerschaling worden toegepast [Blöschl et al., 2007, IPCC, 2013, IPCC, 2014].

Het effect van de klimaatverandering gaat zich met betrekking tot deze masterproef voornamelijk vertalen naar hevige neerslagextremen. Die zullen (indien toegenomen in hoeveelheid) in combinatie met het effect van de toename in stedelijke verharding (zie sectie 2.3) resulteren tot een grotere toename in oppervlakteafstroming. Dit kan tot een grote versterking van de rivierafvoerpieken leiden (vaak groter dan de 2 effecten alleenstaand), en dit is bevestigd door meerdere studies [Reynard et al., 2001, Semadeni-Davies et al., 2008, Hamdi et al., 2011, Poelmans et al., 2011, He et al., 2013, Tavakoli et al., 2014, Ruimte Vlaanderen, 2015]. Omgekeerd zullen langere droge periodes leiden tot lage rivierwaterstanden (lage rivierafvoer), en deze versterken dan het verlagend effect van de ondoordringbare stedelijke verharding op de grondwaterafstroming [Guo et al., 2008, Hamdi et al., 2011, Tavakoli et al., 2014]. Het aanpassen van het landgebruik is dus een mogelijkheid om het effect van de klimaatverandering te verzachten (zie sectie 2.5).

Voor België zal het effect van de klimaatverandering zich voornamelijk vertalen naar een toename in neerslaghoeveelheden in de winterperiode en een afname in neerslaghoeveelheden (droogte) in de zomerperiode, terwijl de evapotranspiratie voor beide periodes zal toenemen [Baguis et al., 2009, Tabari et al., 2015].

Zoals eerder gesteld, is het effect van de klimaatverandering voor elke regio verschillend. Tussen droge en natte seizoenen zal het contrast groter worden, afhankelijk van de regio en het emissiescenario [Lengoasa, 2016]. Indien het gecombineerd ef-

fect van de klimaatverandering en stedelijke verharding (of ook ontbossing) op de hydrologie wordt beschouwd in verschillende studies, is telkens ofwel de klimaatverandering bepalend [Guo et al., 2008, Poelmans et al., 2011, Cuo et al., 2013, He et al., 2013] ofwel de verandering in landgebruik naar stedelijke verharding [Cuo et al., 2009, Tavakoli et al., 2014]. Het effect van beide blijft wel even belangrijk. Het resultaat van onderzoek naar het gecombineerd effect van verandering in landgebruik en klimaatverandering (zie ook sectie 2.6), in vergelijking met het resultaat voor de 2 effecten alleenstaand, kan verschillend zijn van de eenvoudige superpositie van de beide effecten. De collaboratie tussen beide is dus eveneens belangrijk, en het is dus aangeraden om beide tezamen te beschouwen [Reynard et al., 2001, Guo et al., 2008, Lin et al., 2012]. Ook is het mogelijk dat het effect van de klimaatverandering het effect van de urbanisatie zal verbergen, hierdoor dienen beide effecten dus meegenomen te worden in toekomstige analyses [Trudeau en Richardson, 2016].

Wanneer nu welk deeleffect van het gecombineerd effect van landgebruik en verandering in het klimaat (natuurlijk en onnatuurlijk) bepalend zal zijn, is zoals eerder kort aangehaald afhankelijk van de grootte van het beschouwde bekken en het lokale klimaat en geografie. Zo zal de impact van verandering in landgebruik het duidelijkst zichtbaar zijn op bekkenschaal, indien het bekken op zich niet te groot is in omvang [Kiersch, 2000, Pfister et al., 2004, Blöschl et al., 2007, Blöschl en Montanari, 2010, Apollonio et al., 2016]. De omvang van het beschouwde (deel)bekken dient beperkt te zijn om zo onderscheid te kunnen maken van het effect van verandering in landgebruik en het effect van natuurlijke processen en trends in het klimaat. Hoe groter de schaal, hoe moeilijker het is om de effecten van landgebruik te onderscheiden [Kiersch, 2000, Pfister et al., 2004]. Dit alles staat ook conceptueel weergegeven in Figuur 2.2.

Hierdoor zal het effect van de klimaatverandering meer invloed hebben op gebeurtenissen met grotere terugkeerperiodes. Dit is omgekeerd ten opzichte van het effect van de verandering van landgebruik naar stedelijke verharding dat een grotere invloed heeft op kleinere terugkeerperiodes (zie sectie 2.3) [Reynard et al., 2001, Blöschl et al., 2007]. Dit is logisch aangezien het effect van de klimaatverandering een groter effect dan landgebruik heeft op grotere schaal (zie Figuur 2.2) en ook zal leiden tot meer extremen [IPCC, 2014].

Eenvoudiger gesteld bepalen het klimaat en de verandering ervan (natuurlijk en onnatuurlijk) in hoofdzaak de algemene rivierkarakteristieken (oppervlakteafstroming, rivierafvoer, ...) op grotere schaal en zal het effect van verandering in landgebruik hierop een bijkomstig effect leveren en dit zal dan op kleinere (lokale) schaal meer doorwegen.

Naast studies die het effect van de regio en grootte van het bekken op de impact van de klimaatverandering op de hydrologie beschrijven, zijn er ook studies waar de impact een tegenovergesteld effect zal hebben dan eerst beschreven. De klimaatverandering, of één van de klimaatscenario's zal leiden tot minder grote hoeveelheden neerslag. Of wanneer de hoeveelheid neerslag seizoensgebonden is (droge periode) kan dit ook resulteren in een minder grote hoeveelheid neerslag [Bronstert

et al., 2002, Guo et al., 2008, Baguis et al., 2010, Poelmans et al., 2011, Hamdi et al., 2011, Lin et al., 2012, Cuo et al., 2013, Tavakoli et al., 2014]. Deze vermindering in hoeveelheid neerslag zal uiteraard het omgekeerde effect hebben dan deze die eerder hierboven beschreven zijn.

Verder zal ook naar interpolatie en het maken van voorspellingen toe het belangrijk zijn om rekening te houden met allerlei onzekerheden. Hieronder vallen de natuurlijke variaties in het klimaat (zoals oscillaties en trends) aangezien deze zeker niet altijd in de klimaatmodellen (GCMs) zijn vervat en dus voor een grote onzekerheid zorgen [Bronstert et al., 2002, Pfister et al., 2004, Blöschl et al., 2007, Blöschl en Montanari, 2010]. Door het neerschalen van de resultaten van de globale klimaatmodellen naar bruikbare regionale input zal er telkens ook meer onzekerheid overgedragen worden. Om dit te voorkomen kan overgegaan worden naar het gebruik van meerdere klimaatmodellen ('ensemble model') [Blöschl en Montanari, 2010]. Deze onzekerheden kunnen ook beperkt worden door de keuze van een relevant en correct afgesteld hydrologisch model [Bronstert et al., 2002]. Ruimtelijke verdeelde modellen hebben hierbij een grotere gevoeligheid dan gebiedsgemiddelde modellen [Liu et al., 2011]. Uiteindelijk zal het opstellen van de voorspellingen in toekomstig landgebruik ook nog gepaard gaan met bijkomende onzekerheden [Pfister et al., 2004].

Tot slot heeft de klimaatverandering ook nog een impact op enkele effecten met betrekking tot de hydrologie die reeds zijn aangehaald geweest (zie sectie 2.3). Deze zijn minder belangrijk in het vervolg van deze studie, maar worden nog kort aangehaald. Een van de gevolgen van de klimaatverandering is de stijging van de zeespiegel. Dit is op zich al problematisch voor stedelijke kustgebieden, maar zal het probleem van de getijdenwerking op de afvoer van regenwater verergeren [IPCC, 2014, Owrangi et al., 2014]. Ook zal dit een negatieve invloed hebben op de intrusie van zout water [Kiersch, 2000, Misra, 2011, Ruimte Vlaanderen, 2015]. Verder zal de toename van de rivierafvoerpieken omwille van de klimaatverandering nog leiden tot meer vervuiling [Liu et al., 2017], of minder (indien een WWTP zo is aangepast dat het de hoge afvoerpieken aankan) [Liu et al., 2016].

Uiteindelijk zal de klimaatverandering ook het hitte-eiland effect aanzienlijk versterken omwille van de verwachte stijging in de gemiddelde temperatuur wat dan zal leiden tot een toename in de reeds aangehaalde gevolgen (zie sectie 2.3) [Lauwaet et al., 2013, IPCC, 2014, Ruimte Vlaanderen, 2015, De Ridder et al., 2015]. Een studie omtrent het hitte-eiland effect in België verwacht een verdubbeling in hittestress voor de stedelijke gebieden in vergelijking met de landelijke gebieden onder invloed van klimaatverandering tegen midden 21^e eeuw [Wouters et al., 2017].

2.5 Mitigerende maatregelen

Ten slotte zijn er nog studies die mogelijke oplossingen en maatregelen voorstellen om de impact van de stedelijke verharding te compenseren. Ook deze zullen nog kort besproken worden. Eenvoudig gesteld kunnen er maatregelen genomen worden in de ruimtelijke planning die de afname in groene ruimtes beperken en meerdere

retentiemogelijkheden voorziet om zo de impact van stedelijke verharding (zie sectie 2.3) deels teniet doen. De volgende studies leggen de focus op maatregelen met betrekking tot het beperken van de oppervlakteafstroming (effect van landgebruik) maar er zijn ook maatregelen mogelijk die enkel invloed hebben op het debiet in de waterloop (stuwen ed.) [Bronstert et al., 2002], deze worden hier niet verder besproken.

Indien er in de stedelijke gebieden meer groen en vegetatie aanwezig is, voornamelijk bomen, kan dit een reductie van de rivierpiekafvoeren realiseren [O'Driscoll et al., 2010, Hameed, 2017]. Deze reductie komt tot stand doordat de oppervlakteafstroming zal verminderen aangezien er meer infiltratiemogelijkheden zijn met bijkomende groene ruimtes en deze de oppervlakteafstroming ook zullen vertragen door grotere oppervlakteruwheid [Liu et al., 2014, Yang et al., 2015]. Semi-doorlatende oppervlaktes kunnen de vermindering in grondwaterafstroming (base flow) deels tegengaan door het realiseren van meer mogelijkheid tot infiltratie. Hierdoor zal ook de toename van de oppervlakteafstroming ten gevolge van de verharding beperkter zijn [O'Driscoll et al., 2010, Liu et al., 2014]. Ook groene infrastructuur (groene open ruimtes, groendaken, ...), die zo zijn ingericht dat ze een recreatieve functie hebben en ook kunnen dienen als bergingsopslag voor regenwater, kunnen bijdragen tot het beperken van de rivierpiekafvoeren met een mogelijk bijkomend voordeel van infiltratie op die locaties [Semadeni-Davies et al., 2008, Liu et al., 2014]. Deze groene infrastructuur kunnen (indien optimaal geplaatst) ook de waterkwaliteit van de waterloop deels verbeteren [Lin et al., 2012, Liu et al., 2016, Liu et al., 2017]. In een doctoraatsstudie uitgevoerd op het bekken van de Grote Nete in België is onderzocht geweest wat de invloed van het herwaarden van de waterrijke gebieden van de waterloop (wetlands) is op de hydrologie van het bekken. Het herstellen van de waterrijke gebieden had een grotendeels positief effect op rivierafvoerpieken (daling) en terugkeerperiode (steeg voor dezelfde rivierafvoer), afhankelijk van de positie van de herwaardering in het bekken. Toename in stedelijke verharding (zie sectie 2.3) had een negatieve impact op de rivierafvoerpieken (toename). Er is ondervonden dat indien de stedelijke verharding terug (semi-) doorlatend werd gemaakt, wat leidt tot minder oppervlakteafstroming en meer infiltratie, dit het grootste positief effect had [Rubarenzya, 2007].

Daarom is het aangeraden om vanuit overheidsinstanties deze mogelijke maatregelen te promoten. In het Witboek wordt een netwerk van groenblauwe aders voorgesteld, dat het effect van de stedelijke verharding zou kunnen opvangen [Ruimte Vlaanderen, 2016]. Een netwerk van groenblauwe aders, wat neer komt op een interconnectie tussen groene ruimtes en de waterlopen, zal, indien goed onderzocht en geoptimaliseerd, een gunstiger effect hebben op het reduceren van de oppervlakteafstroming en de rivierafvoerpieken dan alleenstaande groene ruimtes of infrastructuur [Kim en Park, 2016]. Dit netwerk is een duurzame variant van het standaard regenwaterafvoersysteem dat tegenwoordig meestal in stedelijke gebieden te vinden is, en kan de negatieve effecten van de stedelijke verhardingen verzachten [Semadeni-Davies et al., 2008]. Bij het ontwerpen van deze groenblauwe netwerken is het van belang om een goede

afstemming te hebben tussen de ordening van het stedelijk gebied, het waterbeheer en riolerings- en rivieroverstromingsbeheer. Zo hebben groene retentie- en infiltratievoorzieningen in de stedelijke omgeving voornamelijk een gunstig effect op de stedelijke rioleringsoverstromingen, en hebben retentievoorzieningen stroomafwaarts (aan het rioleringsnetwerk) nog steeds hun nut in het reduceren van rivieroverstromingen indien correct afgestemd [De Vleeschauwer et al., 2014].

Met het bijkomend effect van de klimaatverandering, dat zal zorgen voor meer extreme neerslag, zal de oppervlakteafstroming nog meer toenemen (zie sectie 2.4). Daardoor is er zeker nood aan maatregelen en verandering van landgebruik ter vermindering van de oppervlakteafstroming in stedelijke gebieden [Lin et al., 2012, Liu et al., 2014]. De duurzame systemen voor het afvoeren van regenwater winnen aan populariteit de laatste jaren, zeker met oog op de effecten van de klimaatverandering [Semadeni-Davies et al., 2008]. Bebossen van bepaalde gebieden kan, indien de locatie het toelaat, de impact van klimaatverandering mogelijk volledig teniet te doen [Reynard et al., 2001]. In het Witboek vallen al deze maatregelen onder de noemer van de klimaatrobuustheid [Ruimte Vlaanderen, 2016].

In studies voor de regio rond Beijing is gesteld dat een beheersplan voor het landgebruik de (toekomstige) negatieve effecten kan beperken door ongecontroleerde verstedelijking tegen te gaan [Wang en Yang, 2013, Liu et al., 2014]. Uit de laatste studie is gebleken dat semi-doorlatende verharding een gunstiger effect zal hebben op het verminderen van de oppervlakteafstroming en afvoerpieken dan de groene infrastructuur met opslagcapaciteiten [Liu et al., 2014]. Dit is ook een onderdeel van de doeleinden van de betonstop in die zin dat de Vlaamse Regering hiermee een ruimtelijke ordening wil verwezenlijken dat hiermee rekening houdt [Ruimte Vlaanderen, 2016]. Omdat het landgebruik in stedelijke gebieden tegenwoordig nog steeds aan het uitbreiden is naar meer stedelijke verhardingen, is het noodzakelijk om het beleid en de aanpak (stuwen ed.) omtrent de overstromingsrisico's correct bij te passen om de impact van de verhardingen in rekening te brengen [Yang et al., 2016].

In 2015 heeft de Vlaamse Overheid een studie laten uitvoeren die diende te achterhalen welke strategieën het meest aangeraden zijn om te volgen met betrekking tot klimaatadaptatie en ruimtelijke ordening van de stedelijke omgeving [Ruimte Vlaanderen, 2015]. Hierin worden de maatregelen onderverdeeld in ontharden, bebossen, ventileren, warmteopname beheersen, ruimte voor water en afschermen. De eerste en tweede hiervan bevatten maatregelen zoals voorheen reeds besproken, en hebben eveneens een mitigerende impact op het hitte-eiland effect. De derde en vierde omvatten maatregelen die voornamelijk het hitte-eiland effect zullen afzwakken. Tot slot beschrijven de laatste 2 onderverdelingen maatregelen die betrekking hebben tot het voorkomen en beheersen van mogelijke overstromingen. Voor verdere uitzetting hieromtrent wordt verwezen naar de studie zelf [Ruimte Vlaanderen, 2015].

Het idee van deze groenblauwe netwerken en de mogelijke gunstige effecten op de stedelijke omgeving is verder ook nog uitgebreid uiteengezet in het boek *"Groenblauwe netwerken: Handleiding voor veerkrachtige steden"*, waar veel aspecten hieromtrent (water, hitte, biodiversiteit, stadslandbouw, luchtkwaliteit, energie, sociaal-

maatschappelijk en economische waarde) worden beschouwd. Ook zijn er verschillende maatregelen en voorbeelden met hun gunstige effecten op gebied van waterbeheer in stedelijke omgeving uitgebreid besproken, waarvan enkele in deze sectie ook reeds zijn aangehaald geweest. Voor meer informatie hierover wordt verwezen naar het boek zelf [Pötz, 2016].

2.6 Gelijkaardige studies in België

Er zijn enkele studies uitgevoerd over het effect van verandering in landgebruik naar stedelijke verharding en het effect van de klimaatverandering op rivierbekkens in België. In deze sectie wordt een kort overzicht gegeven van de ondervindingen.

Een eerste studie is uitgevoerd voor het bekken van de Grote Nete in België [Tavakoli et al., 2014]. Er wordt gerekend met 3 klimaatscenario's (droog, natte zomer, natte winter) en 3 urbanisatie scenario's (laag, midden, hoog). De studie toont aan dat voornamelijk de klimaatverandering zal leiden tot lagere minima in de rivierafvoer, meer dan de verstedelijking op zich. Ook de maxima in de rivierafvoer zijn beschouwd, deze zullen onder zowel de klimaatverandering als de verstedelijking toenemen. Indien beide effecten gecombineerd worden, zullen deze zorgen tot een nog sterkere toename van de rivierafvoerpieken, voornamelijk in de winterperiode (natte winter). Dit omdat vergrote neerslaghoeveelheden vallen op een gebied met snelle oppervlakteafstroming, en deze effecten zullen leiden tot een amplificatie. De stedelijke verharding was het meest bepalend voor de grote afvoerpieken [Tavakoli et al., 2014].

Een andere studie omtrent het gecombineerd effect van toename in verharding en klimaatverandering werd gedaan voor het bekken van de Molenbeek [Poelmans et al., 2011]. Er is gerekend met dezelfde klimaat- en urbanisatie scenario's. Hierin werden dezelfde conclusies getrokken met betrekking tot de rivierafvoerpieken, die zullen namelijk stijgen omwille van de toename in verharding en neerslagextremen. Het effect van de klimaatverandering geeft aanleiding tot de grootste toename. Indien de hoogste klimaat- en urbanisatie scenario's gecombineerd worden, zal dit resulteren tot een verdubbeling van het overstromingsgebied voor een overstroming met terugkeerperiode van 100 jaar. Het droog klimaatscenario leidt tot een afname in rivierafvoer, maar de toename in verharding doet dit gevolg deels teniet [Poelmans et al., 2011].

Voor het bekken van de Gete en de Ourthe is een studie uitgevoerd voor het achterhalen van het effect van de klimaatverandering op de hydrologie [Baguis et al., 2010]. Voor beide rivieren zal de gemiddelde afvoer dalen in de zomerperiode naar de toekomst toe voor alle klimaatscenario's. Vooral de afvoerminima zullen sterk dalen. Tijdens de winterperiode daarentegen zal de gemiddelde afvoer toenemen, afhankelijk van het klimaatscenario [Baguis et al., 2010].

Tot slot is er ook nog een studie die handelt over de effecten van verstedelijking en klimaatverandering op het Brussels Hoofdstedelijk Gewest [Hamdi et al., 2011]. De resultaten zijn opnieuw dezelfde, namelijk dat de toename in stedelijke verharding

zal leiden tot meer oppervlakteafstroming. De klimaatverandering zal resulteren in een toename van neerslag, alsook in langere droge periodes die leiden tot lagere rivierminima. Indien zowel verstedelijking als klimaatverandering gecombineerd worden, wordt een sterkere toename in rivierafvoerpieken waargenomen dan voor de beide alleenstaand [Hamdi et al., 2011].

Deze studies bevestigen de noodzaak voor tussenkomst en maatregelen van de overheid in zowel landgebruik als het beheer van de waterlopen zodat de toename in rivierafvoerpieken en ten gevolge hiervan de overstromingen in de toekomst kan opgevangen worden. Met de betonstop tracht de Vlaamse Regering dit te verwezenlijken [Ruimte Vlaanderen, 2016].

Het studiegebied van deze masterproef omvat de studiegebieden van die hierboven vermelde onderzoeken op vlak van het veranderend landgebruik door toepassing van de betonstop. Voor het effect van de betonstop op de hydrologie is er één case study gekozen, namelijk het stroomgebied van de Grote Nete (zie hoofdstuk 4). Deze studies kunnen gebruikt worden ter vergelijking, zeker deze die hetzelfde stroomgebied beschouwen.

2.7 Samenvatting

In de inleiding is het belang van deze studie reeds kort aangehaald geweest. De oppervlakte van stedelijke gebieden ten opzichte van de totale oppervlakte zal naar de toekomst toe blijven groeien, zeker ook in Vlaanderen. Hierdoor verandert de hydrologie van de ondergrond door de bijhorende toename van ondoorlatende verharding. Deze stedelijke verharding zorgt voor minder infiltratie in de ondergrond en een snellere afstroming, wat resulteert in een toename van de oppervlakteafstroming (snelle afvoer) en een vermindering van de grondwaterafstroming. Deze toename leidt tot een toename van de rivierafvoerpieken (voor dezelfde terugkeerperiode), dat op zijn beurt zal leiden tot meer overstromingen. Dit effect is voornamelijk merkbaar voor kleinere terugkeerperiodes.

Als het effect van de stedelijke verharding wordt gecombineerd met het effect van de klimaatverandering, dat resulteert in meer extremen (grotere hoeveelheden neerslag en langere droge periodes), zal dit zorgen voor een grotere toename in de oppervlakteafstroming dan voor de beide effecten apart. Ook zullen bij droge periodes de rivierafvoerminima dalen.

Om in de toekomst meer overstromingsproblematiek te vermijden, is het aangeraden om maatregelen te treffen hiertegen. Dit kan enkel met de juiste beleidsmatige beslissingen op het gebied van landgebruiksinname en beheer van de waterlopen.

Hoofdstuk 3

Landgebruiksveranderingen

Dit hoofdstuk beschrijft de GIS-analyse van deze masterproef. Meer bepaald zullen mogelijke benaderende landgebruiksscenario's voor Vlaanderen worden opgemaakt indien de betonstop zou gerealiseerd worden. Hierbij gaan eerst de beschikbare data en scenario's beschouwd en geanalyseerd worden die dan kunnen gebruikt worden als basis en/of hulpmiddel voor het bekomen van de eigen aangemaakte landgebruikskaarten en scenario's. Finaal zullen de mogelijke landgebruiksscenario's met toepassing van de betonstop nog onderling vergeleken worden.

3.1 Beschikbare data en scenario's

3.1.1 Huidige situatie en verleden

In dit onderdeel zal de beschikbare data omtrent verharding en ruimtebeslag beschouwd worden. Voor de huidige situatie worden ook de verschillende landgebruiksscenario's beschouwd en vergeleken om zo tot een keuze te komen voor het startpunt van de eigen scenario's voor de betonstop.

Ruimtebeslag

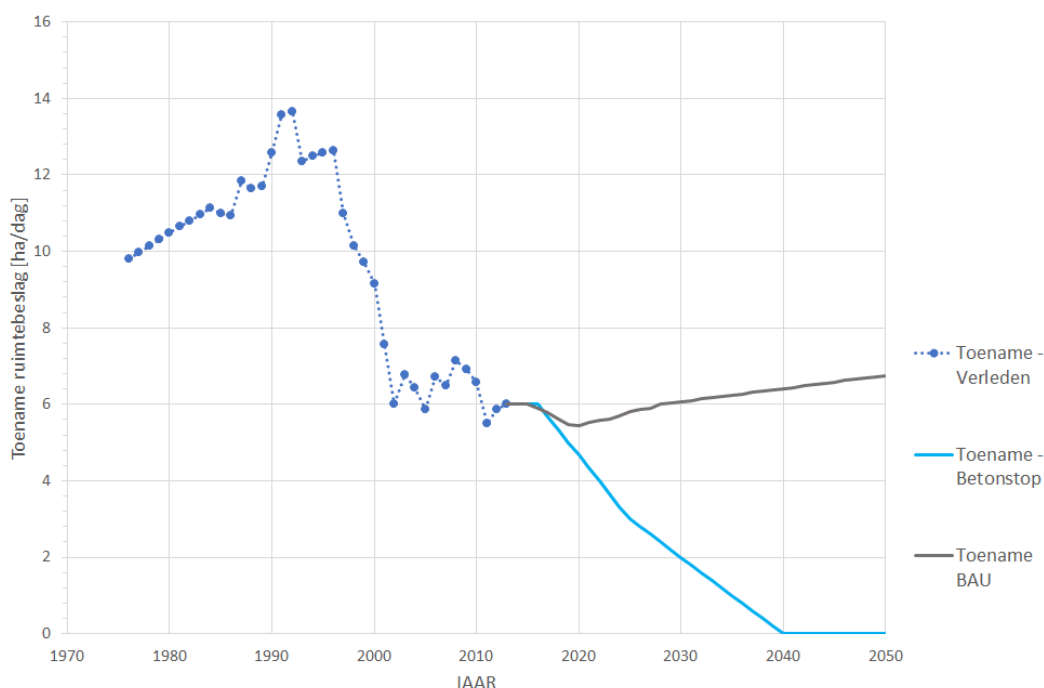
De term ruimtebeslag is een relatief nieuwe term. Het ontstaan hiervan en de definitie hiervan zijn reeds gegeven in sectie 2.1, en verder nog in Witboek Beleidsplan Ruimte [Ruimte Vlaanderen, 2016]). In 2013 is een nulmeting uitgevoerd voor het ruimtebeslag voor de toestand op 1 juli 2013 in Vlaanderen, door het VITO in opdracht van de Vlaamse Overheid. De dataset is in rasterformaat met een celgrootte van 10 m. Deze dataset kan worden geraadpleegd via Geopunt Vlaanderen [VITO, 2013]. Voor verdere informatie hieromtrent wordt verwezen naar het rapport opgemaakt door het VITO [Poelmans et al., 2016a].

Voor de toestand 2013 is een oppervlakte aan ruimtebeslag van 444776 ha bekomen oftewel een percentage van ongeveer 33% van de totale oppervlakte van Vlaanderen (1352200 ha), wat ook met de waarde van 33% overeenstemt zoals gesteld in het Witboek voor 2015 [Ruimte Vlaanderen, 2016]. Gezien de dagelijkse toename vanaf 1 juli 2013 gekend is tot 2015, kan de oppervlakte aan ruimtebeslag eenvoud-

dig bepaald worden. Deze bedraagt 450260 ha (33 %). De toename tussen 2013 en 2015 bedraagt ongeveer 5484 ha of 0,41% van de oppervlakte van Vlaanderen. Deze nulmeting in 2013 is ook gelinkt aan het Ruimtemodel Vlaanderen [VITO, 2018].

Aangezien ruimtebeslag maar een recent gegeven is, is het moeilijk om hiervoor data te hebben van voor de opname in 2013. In een rapport opgemaakt door het VITO is getracht om hiervoor een toename voor het ruimtebeslag per dag te vinden voor het verleden, zijnde de periode 1985-2013. Ook is de definitie voor ruimtebeslag in deze periode anders gesteld geweest, in die zin dat de dagelijkse toename is afgeleid uit het Kadasterregister en dus hoofdzakelijk gelinkt is aan de bebouwde oppervlakte. Deze toenames per jaar staan weergegeven in Figuur 3.1 [Poelmans en Engelen, 2014]. Hierdoor kan er sprake zijn van een onderschatting. Toch kunnen de dagelijkse toenames per jaar hier verder gebruikt worden voor de analyse van de bestaande landgebruikskaarten en scenario's gezien de correlatie tussen ruimtebeslag en bebouwde oppervlakte [Poelmans en Engelen, 2014].

Ook is er in een ander rapport van het VITO een voorspelling gemaakt voor de dagelijkse toename aan ruimtebeslag tot 2050, oftewel het BAU-scenario. Deze toename staat weergegeven in Figuur 3.1 [Engelen, 2016]. De dalende trend in dagelijkse toename aan ruimtebeslag zoals vooropgesteld in het Witboek (betonstop) staat eveneens weergegeven op Figuur 3.1 [Ruimte Vlaanderen, 2016]. Hiervoor kan ook verwezen worden naar sectie 2.1, Figuur 2.1.



Figuur 3.1: Evolutie van de dagelijkse toename in ruimtebeslag in Vlaanderen [Poelmans en Engelen, 2014, Engelen, 2016, Ruimte Vlaanderen, 2016] (eigen verwerking).

Verharding

Verharding is het deel van de oppervlakte dat niet of nauwelijks nog water kan doorlaten en laten infiltreren, veroorzaakt door het aanbrengen van artificiële oppervlaktes. Deze oppervlaktes zijn beschikbaar in een rasterdataset met een celgrootte van 5 m voor de toestand in (eind) 2012 in Vlaanderen, opgemaakt door het AGIV. Elke rastercel heeft een waarde dat de verharding voor die rastercel percentueel weergeeft [AGIV, 2016].

De oppervlakte van Vlaanderen dat verhard is bedraagt 192741 ha, oftewel 14,25%, en is bekomen door voor elke cel het percentage verharding om te zetten naar een oppervlakte aan verharding en te sommeren. Deze waarde is eveneens gelijkaardig aan de waarde van 14% zoals gesteld in het Witboek voor 2015 [Ruimte Vlaanderen, 2016].

Net zoals voor het ruimtebeslag is de data voor de verharding in het verleden beperkter. In het doctoraat van Poelmans wordt een percentage verharding van 4-5% gehanteerd voor 1976, en 9-10% voor 2000 [Poelmans, 2010]. Verder was voor de periode 2007-2009 ongeveer 13% van Vlaanderen verhard [De Meyer et al., 2011]. Deze percentages kunnen verder in de analyse van de landgebruiksscenario's gebruikt worden.

Bestaande landgebruiksscenario's

De bestaande landgebruikskarten (CCI, CORINE Land Cover Data, Landgebruikskarten Poelmans, Ruimtemodel Vlaanderen) en scenario's met hun specifieke eigenschappen zijn reeds aangehaald geweest in sectie 2.2. De keuze voor de landgebruikskarten die als basis gaan dienen voor de eigen betonstopscenario's valt voor deze masterproef op deze van het Ruimtemodel Vlaanderen. In dit onderdeel is de verantwoording voor deze keuze verder uiteengezet.

Bij deze keuze dienen verschillende aspecten beschouwd te worden zoals de resolutie van de kaart gezien deze bepalend kan zijn voor de nauwkeurigheid en het al dan niet correct inbrengen van het nogal versnipperd landschap in Vlaanderen. Ook de verwerkbaarheid van de rasters en hun klassen is van belang. Dit omdat voor het voorspellen van het landgebruik de enige bindende voorwaarde deze van de dalende trend in de dagelijkse toename van het ruimtebeslag is. De klassen van de landgebruikskarten moeten dus in zekere zin kunnen omgevormd worden naar ruimtebeslag toe. Ook de aanmaakdatum van de karten speelt een rol, gezien deze een indicatie kunnen geven van de correctheid van de weergave van de huidige toestand dat als vertrekpunt moet dienen.

Rekening houdend met hierboven genoemde aandachtspunten, komt de kaart opge maakt door het CCI in mindere mate in aanmerking om als basis te dienen voor de betonstopscenario's, aangezien deze de grootste celgrootte heeft van alle beschikbare data (300 m). Deze dataset heeft ook maar één klasse dat onder ruimtebeslag kan vallen ('Urban areas') en dit zal tezamen met de lagere resolutie (niet weergegeven van

de versnippering) leiden tot een onderschatting van de oppervlakte aan ruimtebeslag [CCI, 2015].

Voor de Corine Land Cover data geldt een hogere resolutie en hiervoor zijn er 11 klassen die onder ruimtebeslag vallen. Dezelfde dataset is ook gebruikt geweest door het VITO bij hun studie omtrent de evolutie van het ruimtebeslag in Vlaanderen. Hierbij resulteerde deze landgebruikskaart in 27% ruimtebeslag voor Vlaanderen, wat een onderschatting is. Dit is verklaard in het rapport door het feit dat voor de Corine Land Cover een gebied pas zal worden ingedeeld onder een klasse indien deze minimaal 25 ha inneemt, oftewel 25 rastercellen. Hierdoor zal ook voor deze kaart het typische versnipperd stedelijk landschap in Vlaanderen niet worden weergegeven door deze kaart [Copernicus Land Monitoring Service, 2012, Poelmans en Engelen, 2014].

Vervolgens zijn er de kaarten vanuit de doctoraatsstudie van Poelmans. Deze bevatten één klasse ('Built-up land') dat onder ruimtebeslag kan vallen. Het laatste jaartal waarvoor deze dataset en toestand beschrijft is het jaar 2000, wat minder recent is. Hierdoor dient er nog een extrapolatie gemaakt te worden naar de huidige periode om hiervan te vertrekken van de dalende trend in dagelijkse toename van ruimtebeslag. Dit wordt bemoeilijkt aangezien het niet geheel duidelijk is wat hierbij onder de klasse 'built-up land' valt en enkel de dagelijkse toename in ruimtebeslag gekend is. Een andere mogelijkheid is interpoleren tussen de voorspellingen voor 2050. Beide opties worden in het verdere verloop van deze studie nog verder uitgewerkt, net zoals in welke mate de voorspellingen al dan niet overeenkomen met het toepassen van de betonstop [Poelmans, 2010].

Ten slotte zijn er de landgebruikskaarten van het Ruimtemodel Vlaanderen. Deze kaarten zijn recenter opgemaakt en beschrijven de toestand in 2010, wat kan dienen als vertrekpunt voor de betonstopscenario's. Deze dataset bevat meerdere klassen die gericht zijn op meer specifiek landgebruik in vergelijking met hierboven genoemde datasets, waardoor er verschillende klassen zijn die onder ruimtebeslag kunnen vallen. Dit zal later nog verder worden uitgewerkt, alsook het feit of de voorspellingen binnen deze dataset al dan niet overeenkomen met het landgebruik met toepassing van de betonstop [VITO, 2018].

Uit de bovenstaande uiteenzetting kan worden besloten dat enkel de landgebruikskaarten van Poelmans en het Ruimtemodel Vlaanderen verder nog beschouwd zullen worden. Dit ook omdat deze beiden een voorspelling maken voor toekomstig landgebruik (BAU-scenario) wat bij het achterhalen van de hydrologische impact van de betonstop ter vergelijking kan gebruikt worden.

3.1.2 Toekomstige landgebruiksscenario's

In dit onderdeel worden de resterende 2 landgebruiksscenario's (zie sectie 3.1.1) nog verder geanalyseerd naar hun gebruik bij het opmaken van de scenario's met toepassing van de betonstop.

Landgebruikskarten Poelmans

Zoals reeds gesteld in sectie 3.1.1, bestaat de dataset van de doctoraatsstudie van Poelmans uit een raster met 6 klassen, namelijk: Built-up land, Arable land, Grassland, Forest, Water en een minder belangrijke zesde klasse dat niet direct een benaming heeft gekregen maar zich voornamelijk situeert rondom duingebied [Poelmans, 2010]. Voor het verdere verloop zal deze zesde klasse de benaming 'Duingebied' hebben.

De gegevens van deze dataset voor elk jaar dat deze beschikbaar zijn staan weergegeven in Tabel 3.1. Hierbij is voornamelijk de klasse 'Built-up land' en de bijhorende oppervlakte van belang aangezien deze onder ruimtebeslag zou vallen. Het ruimtebeslag voor de jaartallen dat er gegevens beschikbaar zijn vanuit Poelmans staat eveneens weergegeven in Tabel 3.1. Deze oppervlaktes zijn afgeleid uit de evolutie van het ruimtebeslag (zie Figuur 3.1) om zo een idee te krijgen van het ruimtebeslag in het verleden en de data van Poelmans hiermee te kunnen vergelijken [Poelmans en Engelen, 2014, Engelen, 2016]. Ook de vooropgeschreven oppervlaktes voor het ruimtebeslag met toepassing van de betonstop staan weergegeven in Tabel 3.1 [Ruimte Vlaanderen, 2016]. Hierbij dient er rekening gehouden te worden met het feit dat voor deze studie de opname van 2013 voor het ruimtebeslag (huidige definitie ruimtebeslag) als startpunt is genomen voor de evolutie van het ruimtebeslag in het verleden, terwijl deze voornamelijk gelinkt is aan de toename van bebouwde oppervlakte. Door het VITO worden deze toenames ook als toenames in ruimtebeslag genomen [Poelmans en Engelen, 2014].

Tabel 3.1: Oppervlaktes voor de verschillende klassen van de landgebruikskarten van Poelmans, vergeleken met oppervlaktes aan ruimtebeslag (betonstop en BAU) voor de verschillende jaartallen [Poelmans, 2010, Poelmans en Engelen, 2014, Engelen, 2016, Ruimte Vlaanderen, 2016] (eigen verwerking).

	1976	1988	2000	2050 Low	2050 Medium	2050 High
Built-up land [ha]	88967	148628	240103	385823	554872	692976
Arable land [ha]	519762	594328	483969	426069	353581	287602
Grassland [ha]	560098	408885	439612	377463	301877	242998
Forest [ha]	160051	179414	176062	150674	129865	116713
Water [ha]	28589	26692	18555	18555	18555	18555
Duingebied [ha]	1494	1065	795	512	346	252
Built-up land Vlaanderen	6,6%	11,0%	17,8%	28,5%	41,0%	51,3%
Ruimtebeslag Vlaanderen - Betonstop	23,1%	26,6%	30,5%	35,0%		
Ruimtebeslag Vlaanderen - BAU				39,1%		

Uit Tabel 3.1 kan het ruimtebeslag voor een gegeven jaartal waarvoor data beschikbaar is voor de landgebruikskaarten van Poelmans vergeleken worden met de oppervlakte aan 'Built-up land'. Hierbij kan worden opgemerkt dat de laatste sterker stijgt dan de oppervlakte aan ruimtebeslag. Voor 2050 zal de oppervlakte aan 'Built-up land' de voorspelde oppervlakte voor het BAU-scenario overstijgen voor het Medium en High urbanisatiescenario. Voor het Low urbanisatiescenario is dit niet het geval. Het Medium urbanisatiescenario komt ruwweg het meest overeen met het BAU-scenario.

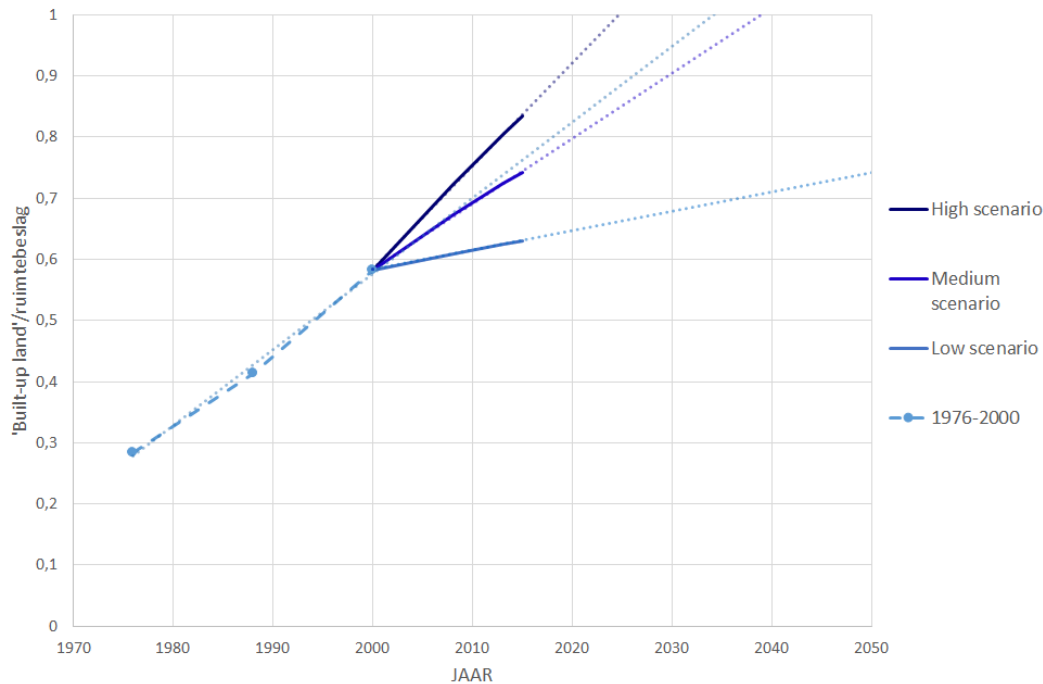
Het feit dat er meer 'Built-up land' is dan ruimtebeslag is enigszins verwonderlijk gezien de huidige definitie van het ruimtebeslag. Hierbij moet er opgemerkt worden dat deze ten tijde van de studie van Poelmans nog niet duidelijk omlijnd was en ruimtebeslag niet is gehanteerd in de studie. Voor de vergelijking op vlak van ruimtebeslag zijn er andere bronnen gebruikt [Poelmans, 2010, Poelmans en Engelen, 2014, Engelen, 2016].

Dezelfde opmerking kan ook worden afgeleid uit Figuur 3.2, waar de verhouding tussen 'Built-up land' en ruimtebeslag wordt weergegeven voor de jaartallen waarvoor data voor Poelmans beschikbaar is, en verder tot 2015. Voor de periode na 2000 is enkel het ruimtebeslag gekend (zie sectie 3.1.1, Figuur 3.1), de oppervlakte 'Built-up land' wordt bekomen door interpolatie voor elk urbanisatiescenario. Verder kan dan voor de periode 2000 tot 2050 de verhouding tussen 'Built-up land' en ruimtebeslag bepaald worden voor elk urbanisatiescenario via een lineaire trend. Ook indien enkel de verhouding voor de periode 1976-2000 wordt beschouwd is er een trendlijn weergegeven. Hierbij kan worden opgemerkt dat de verhouding voor het Medium en High scenario volgens de trend groter zal worden dan 1, wat niet mogelijk is gezien de definitie van het ruimtebeslag. Dit stemt overeen met de bemerkingen vanuit Tabel 3.1, met het verschil dat er op Figuur 3.2 geen BAU of betonstopscenarió wordt beschouwd maar enkel het gekende ruimtebeslag wordt vergeleken met de data van Poelmans en welke trend zich hierbij voordoet.

Uit het voorgaande blijkt dat de data van Poelmans niet éézijdig kan worden omgezet naar ruimtebeslag en ook de relatie tussen 'Built-up land' en ruimtebeslag niet duidelijk te omschrijven is. Bij opmaak van de landgebruikskaarten is er hiervoor voornamelijk gebruik gemaakt van satellietdata, terwijl voor het bepalen van het ruimtebeslag eerder gekeken is naar de eigenlijke invulling van een perceel grond. Hierdoor zal er in het verdere verloop van de masterproef niet gewerkt worden met de landgebruikskaarten van Poelmans om hieruit de eigen landgebruiksscenario's met toepassing van de betonstop op te stellen, gezien het feit dat er aan toekomstige toename van ruimtebeslag voorwaarden zijn opgelegd en dus ruimtebeslag de bepalende factor zal zijn.

Landgebruikskaarten Ruimtemodel Vlaanderen

De landgebruikskaarten van het Ruimtemodel Vlaanderen bestaan uit rasters met 38 klassen (zie sectie 3.1.1). Enkele klassen hiervan zouden kunnen vallen onder ruimtebeslag. Daarom zullen de 38 klassen eerst worden omgezet naar 6 klassen,



Figuur 3.2: Verhouding tussen 'Built-up land' (Poelmans) en ruimtebeslag [Poelmans, 2010, Poelmans en Engelen, 2014] (eigen verwerking).

gelijkaardig aan de dataset vanuit de doctoraatsstudie van Poelmans om zo ook vergelijking toe te laten voor de scenario's [VITO, 2018].

Met deze omzetting zal er getracht worden om tot een zo goed mogelijke benadering van het ruimtebeslag te komen voor 2010. De waarde van het ruimtebeslag hiervoor volgt uit Figuur 3.1 en bedraagt 437123 ha. Bij de omzetting is een gelijkaardige naamgeving gehanteerd zoals voor Poelmans (Built-up land, Landbouwgrond, Grasland, Bos, Water, Duingebied). De klasse 'Built-up land' is voor het Ruimtemodel Vlaanderen de klasse waaronder alle oorspronkelijke klassen vallen die geacht worden te behoren tot ruimtebeslag. Deze klasse heeft niet de naam ruimtebeslag omdat het hier om een benadering gaat. De omzetting van de klassen staat weergegeven in Tabel 3.2. Uiteindelijk is er een omzettingsfactor 0,947 gekomen voor de nieuwe klasse 'Built-up land' te vertalen naar ruimtebeslag.

De omzetting gebeurt volgens de vooraf vermelde poging tot het benaderen van het ruimtebeslag, en dus spreekt het voor zichzelf welke klasse al dan niet tot de klasse 'Built-up land' behoren. Deze zijn voornamelijk bebouwde oppervlaktes, afgezien van de oorspronkelijke klasse 'Park'. Volgens de definitie van het ruimtebeslag vallen deze hier ook onder. De omzetting naar de overige 5 klassen is minder van belang aangezien het opzet voornamelijk is om vertrekkende hiervan de maximaal toelaatbare oppervlakte aan ruimtebeslag met toepassing van de betonstop toe te kennen. Toch spreekt ook deze omzetting voor zich.

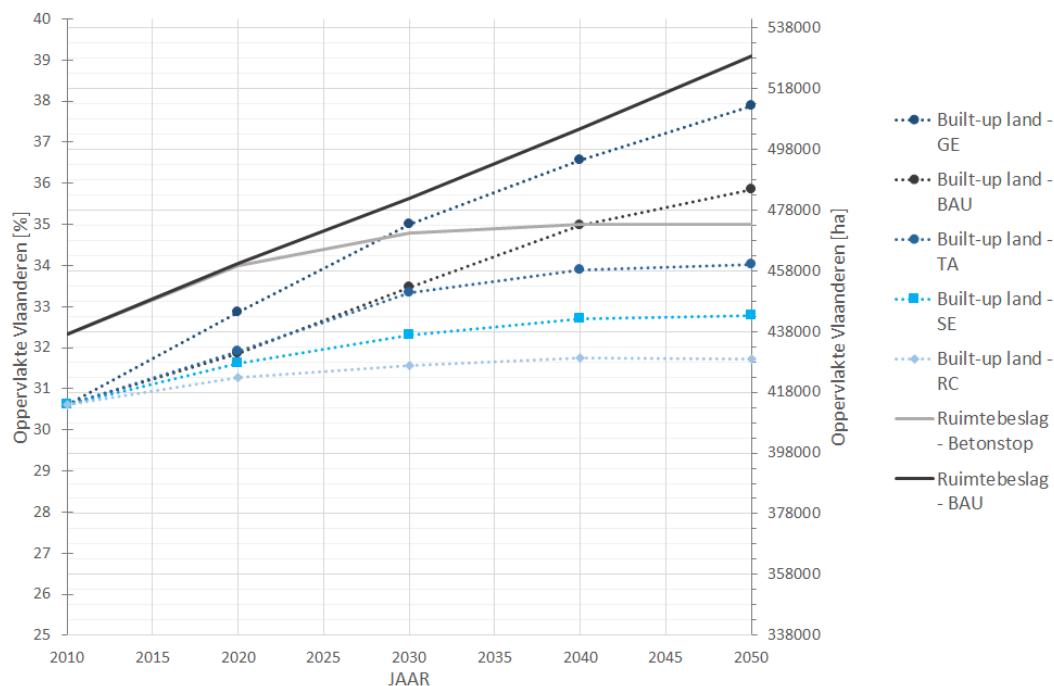
Tabel 3.2: Omzetting van de klassen uit het Ruimtemodel Vlaanderen.

Oorspronkelijke klasse	Klasse na omzetting	Oorspronkelijke klasse	Klasse na omzetting
Overig	Built-up land	Grasland met natuurbeheer	Grasland
Niet geregistreerd grasland met natuurwaarde	Grasland	Productiegrasland met natuur- en milieudoelen	Grasland
Niet geregistreerde landbouwgrond	Landbouwgrond	Productiegrasland	Grasland
Moeras zonder natuurbeheer	Bos	Akker met natuurdoelen	Landbouwgrond
Heide zonder natuurbeheer	Bos	Akker met milieudoelen	Landbouwgrond
Kustduin zonder natuurbeheer	Duingebied	Akker	Landbouwgrond
Residentieel	Built-up land	Bos met natuurbeheer	Bos
Lichte industrie	Built-up land	Bos met bosbeheer	Bos
Zware industrie	Built-up land	Moeras met natuurbeheer	Bos
Afval en afvalwater, waterwinning en waterdistributie	Built-up land	Heide met natuurbeheer	Grasland
Mijnbouw	Built-up land	Kustduin met natuurbeheer	Grasland
Energie	Built-up land	Slik en schorre	Water
Groothandel, transport en verkeer	Built-up land	Recreatie- en sportterrein	Grasland
Detailhandel en horeca	Built-up land	Residentiële, commerciële bebouwing	Built-up land
Kantoren en administratie	Built-up land	Brussel	
Overige diensten	Built-up land	Industrie Brussel	Built-up land
Overig industrieel, commercieel, residentieel	Built-up land	Park	Built-up land
Zeehaven	Built-up land	Militaire voorziening	Grasland
		Infrastructuur	Built-up land
		Water	Water
		Buiten studiegebied	Geen Data

Verder kan er worden opgemerkt dat de klassen 'Recreatie en sportterrein' en 'Militaire voorziening' niet worden gerekend tot 'Built-up land'. Indien beide zouden ingerekend worden zou dat leiden tot een overschatting (ondervonden na vergelijking op basis van de nulmeting 2013 [VITO, 2013]). De aanpalende gebouwen behoren tot het ruimtebeslag, maar de omliggende terreinen niet. Omgekeerd zal er ook een onderschatting zijn door het feit dat landbouw- en bosgronden niet tot de klasse 'Built-up land' behoren terwijl de gebouwen nodig voor de bedrijvigheid wel onder

het ruimtebeslag vallen.

Voor het Ruimtemodel Vlaanderen zijn er, zoals reeds aangehaald, 5 verschillende scenario's (BAU, Global Economy, Regional Communities, Strong Europe, Transatlantic Markets). De oppervlaktes aan 'Built-up land' na omzetting van de klassen voor de verschillende scenario's staan weergegeven in Figuur 3.3 [VITO, 2018]. De oppervlaktes aan ruimtebeslag voor het BAU-scenario en de betonstop staan eveneens weergegeven in Figuur 3.3 [Engelen, 2016, Ruimte Vlaanderen, 2016]. Hierbij dient te worden opgemerkt dat de vergelijking tussen 'Built-up land' enerzijds en ruimtebeslag anderzijds nog weinig informatie geeft gezien de omzetting die uitgevoerd is geweest ter benadering van het ruimtebeslag. Deze omzetting zal eerst gecontroleerd worden en de klasse 'Built-up land' dient ook nog te worden omgezet of vertaald te worden naar ruimtebeslag omdat de dagelijkse ingebruikname van het ruimtebeslag de basis zal vormen voor de eigen betonstopscenario's.



Figuur 3.3: Oppervlaktes aan 'Built-up land' voor de verschillende scenario's van het Ruimtemodel Vlaanderen en de oppervlakte van het ruimtebeslag voor het BAU-scenario en de betonstop [Poelmans en Engelen, 2014, Engelen, 2016, VITO, 2018] (eigen verwerking).

Vervolgens kan er voor de omzetting van de verschillende klassen een controle worden uitgevoerd voor de huidige toestand. Dit kan in eerste instantie door de oppervlakte van 'Built-up land' te vergelijken met de oppervlakte van het ruimtebeslag voor de huidige toestand en hiermee dus na te gaan welke de overeenkomst is. Op Figuur 3.4 wordt dit weergegeven voor een gebied rondom Leuven. Hierop is te zien dat

er voornamelijk overeenkomst is tussen ruimtebeslag en 'Built-up land', maar er ook zowel overschattingen (groen gekleurd) als onderschattingen (paars gekleurd) zijn. De zwart gekleurde oppervlaktes zijn deze waarbij de klasse 'Built-up land' het ruimtebeslag correct weergeeft. De groen gekleurde oppervlaktes zijn deze die tot 'Built-up land' behoren maar niet tot ruimtebeslag, en omgekeerd zijn de paars gekleurde oppervlaktes deze die behoren tot ruimtebeslag maar niet tot 'Built-up land'. De verklaring hiervoor zijn duidelijk te zien op Figuur 3.4. Dit is voornamelijk verklaard door het effect van de resolutie van de desbetreffende rasters en de omzetting van de klassen voor het Ruimtemodel Vlaanderen zoals voorheen gesteld. Zo zullen kleine of alleenstaande wegen niet worden opgenomen bij een rasterresolutie van 100 m.

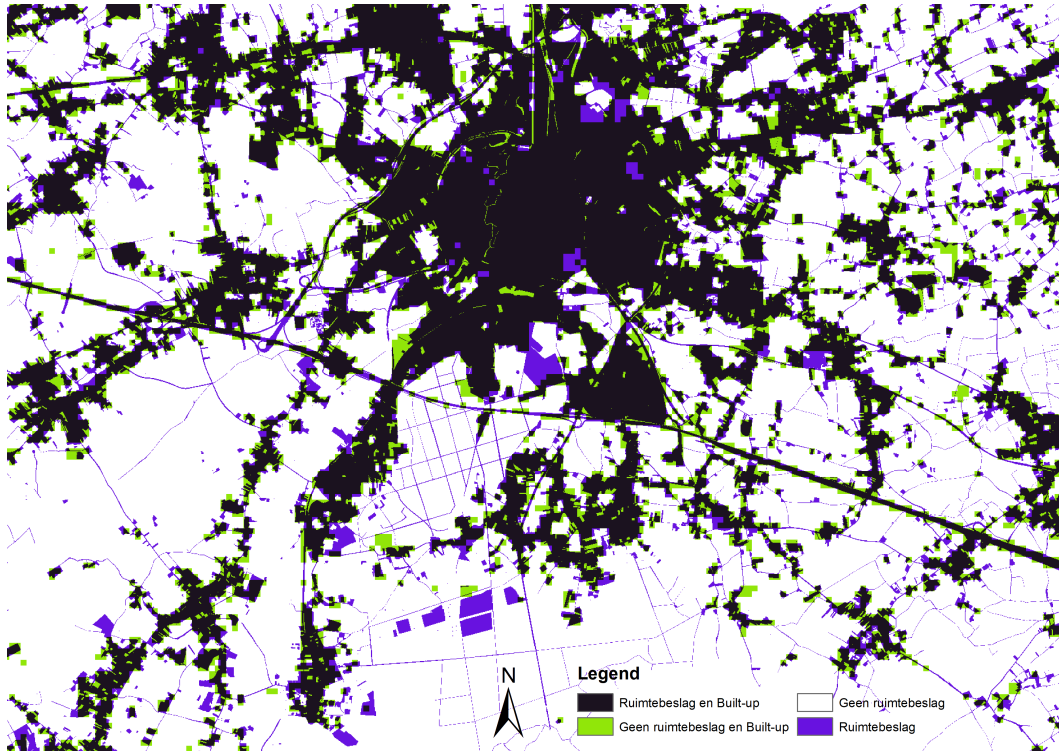
Voor deze controleoppervlakte rondom Leuven bedraagt de totale oppervlakte aan 'Built-up land' 1503520 ha en de totale oppervlakte aan ruimtebeslag bedraagt 1535715 ha. Dit geeft een verhouding van 0,979 (voor het jaartal 2013 zoals weergegeven op Figuur 3.4), wat een relatief goede overeenkomst is qua totale oppervlaktes voor de benadering van ruimtebeslag door middel van de omzetting.

Voor heel Vlaanderen is deze verhouding 0,947 gerekend met de oppervlakte van de klasse 'Built-up land' en de oppervlakte aan ruimtebeslag. Beide oppervlaktes zijn geldig voor het jaartal 2010 omdat hiervoor ook data beschikbaar is van het Ruimtemodel Vlaanderen en deze verhouding dus verder ook kan gebruikt worden. Deze verhouding resulteert in een onderschatting van het ruimtebeslag door de klasse 'Built-up land' voor heel Vlaanderen, wat op zich niet verwonderlijk is gezien het feit dat Vlaanderen nogal versnipperd is en de kleine en alleenstaande oppervlaktes aan ruimtebeslag niet worden opgenomen door een rastergrootte van 100 m (Ruimtemodel Vlaanderen) terwijl deze wel aanwezig zijn bij een rastergrootte van 5 m (ruimtebeslag) [VITO, 2013, VITO, 2018].

De verhouding 0,947 (voor 2010) zal ook in het verdere verloop van de masterproef worden gebruikt als factor voor de omzetting van ruimtebeslag naar 'Built-up land' bij de aanmaak van de eigen betonstopscenario's zodat de totale oppervlaktes overeenkomen.

In de tweede instantie kan de omzetting van de verschillende klassen voor de huidige toestand worden gecontroleerd met behulp van de Groenkaart Vlaanderen en de Waterondoorlaatbaarheidskaart [AGIV, 2016, Agentschap voor Natuur en Bos, 2013]. Via deze kaarten kan de klasse 'Built-up land' vergeleken worden met de definitie voor bestemmingen gedomineerd door ruimtebeslag vanuit het Witboek [Ruimte Vlaanderen, 2016].

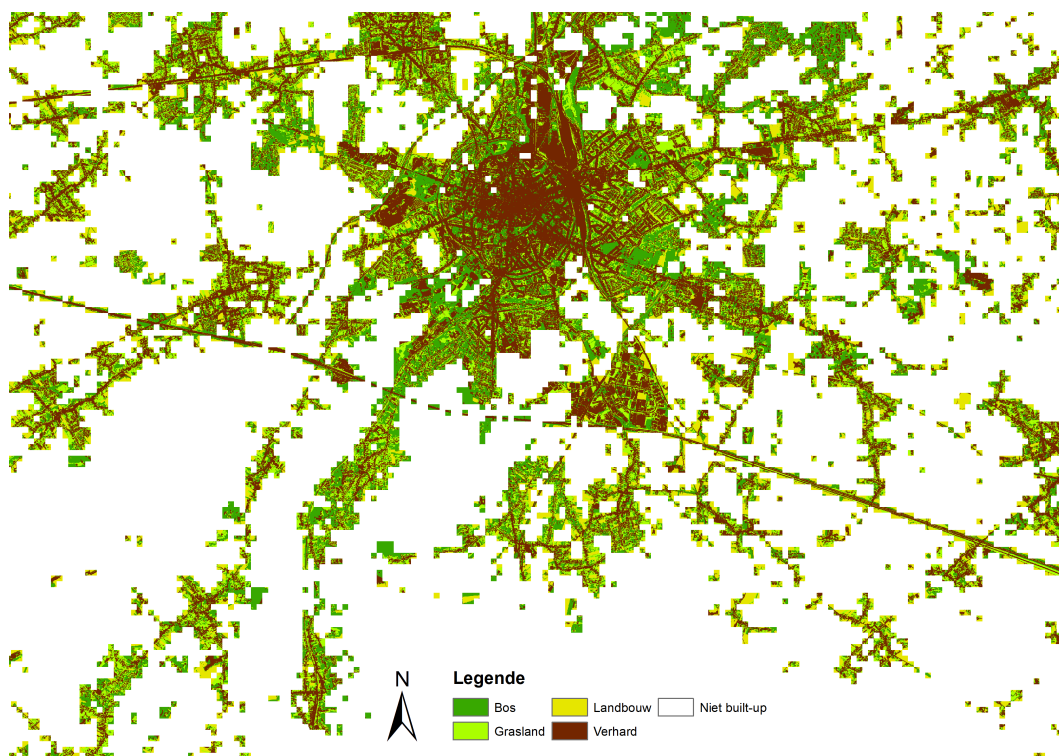
Op Figuur 3.5 staat het nazicht weergegeven, waarbij er wordt nagegaan welke het eigenlijke landgebruik is binnenin de oppervlakte behorende tot de klasse 'Built-up land'. Aangezien de Groenkaart en Waterondoorlaatbaarheidskaart beide een hogere resolutie hebben (rastergrootte 5 m), geven deze beter het eigenlijke landgebruik weer. In het Witboek zijn zowel het ruimtebeslag als de verharding voor bestemmingen gedomineerd door ruimtebeslag gegeven. Dit staan weergegeven op Figuur 3.6 [Ruimte Vlaanderen, 2016]. In Tabel 3.3 staat weergegeven welk gedeelte van de oppervlakte van de klasse 'Built-up land' tot welk type van landgebruik be-



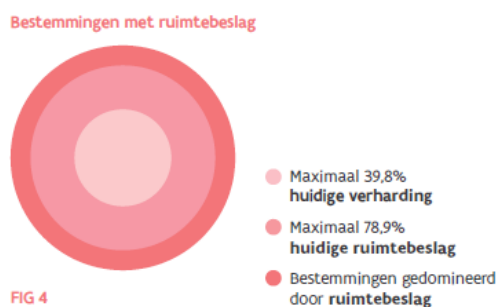
Figuur 3.4: Overeenkomst tussen ruimtebeslag en de klasse 'Built-up land' [VITO, 2013, VITO, 2018] (eigen verwerking).

hoort. Ook staat hierin weergegeven hoeveel percent van de oppervlakte ruimtebeslag bevat. De 4 eerste percentages geven dus in tabelvorm weer wat ook staat afgebeeld op Figuur 3.5, terwijl het laatste percentage de zwarte oppervlakte voorstelt zoals weergegeven op Figuur 3.4.

Als de percentages vanuit Figuur 3.6 vergeleken worden met de percentages vanuit Tabel 3.3 valt er op dat de klasse 'Built-up land' een gelijkaardig aandeel aan verharding en ruimtebeslag heeft zoals gesteld in het Witboek voor bestemmingen gedomineerd door ruimtebeslag. Hierdoor kan er gesteld worden dat de omzetting, althans het een (ruwe) benadering betreft, toch vrij goed het ruimtebeslag benadert. Voor het verdere verloop van de thesis zullen de omgezette kaarten van het Ruimtemodel Vlaanderen gebruikt worden.



Figuur 3.5: Nazicht met behulp van de Groenkaart Vlaanderen en Waterondoorlaatbaarheidskaart op het eigenlijk landgebruik binnenin de klasse 'Built-up land' [Agentschap voor Natuur en Bos, 2013, AGIV, 2016, VITO, 2018] (eigen verwerking).



Figuur 3.6: De verharding en het ruimtebeslag binnen de bestemmingen gedomineerd door ruimtebeslag [Ruimte Vlaanderen, 2016].

Tabel 3.3: Landgebruik en effectief ruimtebeslag binnen de oppervlakte van de klasse 'Built-up land' voor de omgeving van Leuven [Agentschap voor Natuur en Bos, 2013, VITO, 2013, AGIV, 2016] (eigen verwerking).

Bos	20,71%
Grasland	25,23%
Landbouw	13,41%
Verhard	40,64%
Ruimtebeslag	80,28%

3.2 Landgebruiksscenario's betonstop

De probleemstelling van deze masterproef is het achterhalen van de invloed van het al dan niet realiseren van de betonstop op de hydrologie. Daarvoor zijn er landgebruikskaarten nodig indien de betonstop zou toegepast worden die dan later gebruikt kunnen worden voor de hydrologische modellering.

In dit onderdeel zullen er verschillende landgebruiksscenario's bedacht en uiteengezet worden voor de betonstop. Eerst wordt beschouwd wat hiervoor de basis zal vormen, namelijk de daling in dagelijkse ingebruikname van ruimtebeslag zoals vooropgesteld in het Witboek door de Vlaamse Overheid [Ruimte Vlaanderen, 2016]. Daarna zullen er 3 mogelijke scenario's beschreven worden. De wijze waarop deze scenario's zijn gekomen en welke de extra randvoorwaarden bij de aanmaak ervan zijn, zullen eveneens worden beschreven net zoals het finale resultaat voor elk scenario. Of er mogelijk scenario's van het Ruimtemodel Vlaanderen kunnen doorgaan als scenario voor de betonstop zal eveneens gecontroleerd worden. Vervolgens zal achterhaald worden hoe de betonstop zich zal vertalen naar de verharding toe, gezien deze hoofdzakelijk zijn invloed zal hebben op de hydrologie. Finaal zullen de verschillende betonstopscenario's samenvattend besproken worden.

3.2.1 Dalende dagelijkse toename ruimtebeslag

Zoals al herhaaldelijk vermeld vormt de dalende trend in de dagelijkse toename van het ruimtebeslag de basis voor de betonstop. Dit is reeds in meer detail besproken in sectie 2.1, belangrijk om nog te vermelden is dat het over dagelijkse toename gaat van netto-ruimtebeslag. Op Figuur 2.1 staat deze trend nogmaals weergegeven. Gezien vanuit Figuur 2.1 voor elke dag tot 2040 de toename van het ruimtebeslag gekend is, kan hieruit de totale oppervlakte aan ruimtebeslag dat tot 2040 nog kan bijkomen bepaald worden. In de vorige sectie 3.1.2 is besloten om de landgebruikskaarten van het Ruimtemodel Vlaanderen na omzetting te gebruiken als vertrekpunt voor de scenario's van de betonstop. Deze geeft het landgebruik weer voor 2010, en dus is het ruimtebeslag in 2010 nodig als vertrekpunt. Deze volgt uit Figuur 3.1. Het combineren van beide figuren geeft dan de totale toegelaten oppervlakte aan ruimtebeslag tot 2040 voor de betonstop. Dit komt neer op een toegelaten bijkomende oppervlakte aan ruimtebeslag van 36151 ha in de periode 2010-2040, oftewel een totaal van 473273 ha ruimtebeslag (35%) in 2040 [Ruimte Vlaanderen, 2016].

In de vorige sectie is de factor 0,947 (verhouding 'Built-up land'/ruimtebeslag) gekomen voor de omzetting van de oppervlakte aan ruimtebeslag naar een oppervlakte aan 'Built-up land'. Dit is nodig aangezien het vertrekpunt, zijnde de landgebruikskaart van het Ruimtemodel Vlaanderen voor 2010, een klasse 'Built-up land' heeft dat zo is omgezet geweest van de oorspronkelijke data om het ruimtebeslag te benaderen. Deze klasse komt echter niet volledig overeen met het ruimtebeslag waardoor een omzetting met de factor 0,947 noodzakelijk is om tot de juiste totale oppervlaktes te komen van ruimtebeslag voor de betonstopscenario's. Dit in gedachte houdend zal in 2040 de oppervlakte van de klasse 'Built-up land' 448324 ha (=

$473273 \times 0,947$) bedragen. In 2010 bedroeg deze oppervlakte 414079 ha. Er zal dus 34245 ha aan 'Built-up land' bijkomen voor de periode 2010-2040.

In Tabel 3.4 staan de bijkomende oppervlaktes aan ruimtebeslag en daaruit volgende de bijkomende oppervlaktes aan 'Built-up land' voor de jaartallen 2010, 2020, 2030 en 2040 weergegeven. Deze waarden vormen dan ook de basis voor het bekomen van de eigen scenario's voor de betonstop. In de periode 2010-2020 zal de grootste oppervlakte aan ruimtebeslag erbij komen wat logisch is gezien de lineair dalende dagelijkse ingebruikname. Hoe deze bijkomende oppervlakte zich ruimtelijk zal gaan situeren in Vlaanderen wordt niet besproken in het Witboek [Ruimte Vlaanderen, 2016]. Hiervoor zijn dan drie verschillende scenario's voor de verdeling van deze bijkomende oppervlakte uitgewerkt in de volgende sectie.

Tabel 3.4: Totale en bijkomende oppervlaktes voor het ruimtebeslag en 'Built-up land' voor de betonstopscenario's [Poelmans en Engelen, 2014, Ruimte Vlaanderen, 2016] (eigen verwerking).

	2010	2020	2030	2040
Ruimtebeslag [ha]	437123	459700	470315	473273
Bijkomend t.o.v. 2010 [ha]	0	22577	33192	36151
Built-up land [ha]	414079	435466	445521	448324
Bijkomend t.o.v. 2010 [ha]	0	21387	31442	34245

3.2.2 Aanmaak betonstopscenario's

De scenario's voor de verdeling van de bijkomende oppervlakte aan 'Built-up land' (gelijk aan 34245 ha), komende uit de bijkomende oppervlakte aan ruimtebeslag, zullen hier beschreven worden. Eerst zullen mogelijke extra randvoorwaarden besproken worden. Uiteindelijk zullen de resulterende landgebruikskaarten ook besproken worden.

Randvoorwaarden

Er zijn randvoorwaarden gehanteerd bij het toekennen van de bijkomende oppervlakte aan 'Built-up land' bij de aanmaak van de betonstopscenario's. De rastercellen die niet kunnen omgezet worden naar 'Built-up land', en dus onveranderd blijven, zijn:

1. Rastercellen die al behoren tot de klasse 'Built-up land'.
2. Rastercellen die tot de klasse 'Water' behoren.
3. Natuurgebieden en beschermde gebieden (Natura 2000, erkende natuurgebieden, beschermde gebieden volgens duinendecreet) [Instituut voor Natuur -en Bosonderzoek, 2016, Agentschap voor Natuur en Bos, 2016a, Agentschap voor Natuur en Bos, 2016b].

Rastercellen die niet in aanmerking komen voor het toekennen van de bijkomende oppervlakte aan 'Built-up land' of uiteindelijk niet omgezet zullen worden naar 'Built-up land' behouden dus dezelfde klasse of landgebruik als voor de oorspronkelijke toestand in 2010.

Ten slotte zal er bij het aanmaken van de eigen betonstopscenario's ook gebruik gemaakt worden van een zogenaamde ruimtelijke rendementskaart voor Vlaanderen [Verachtert et al., 2016]. Deze kaart bestaat uit een raster met een resolutie van 100 m, en heeft voor elke rastercel een waarde van 0 tot 115 die dan een soort van ontwikkelingskans weergeeft. Hoe hoger de waarde, hoe groter de mogelijk tot ontwikkeling van de rastercel en omgekeerd. Deze waarde van de ontwikkelingskans voor een bepaalde rastercel is gebaseerd op de knooppuntwaarde en de nabijheid van de voorzieningen voor de desbetreffende rastercel. Hoe groter de knooppuntwaarde, oftewel de hoe beter de connectiviteit tot het openbaar vervoer en dergelijke, hoe groter de ontwikkelingskans. Voor de nabijheid van de voorzieningen geldt een gelijkaardige redenering. Hoe meer voorzieningen en hoe beter uitgerust deze zijn, hoe hoger de waarde van de ontwikkelingskans. Hoe dat de knooppuntwaarde en de nabijheid van de voorzieningen zijn bepaald staat verder in detail uiteengezet in een rapport opgemaakt door het VITO. Voor verdere informatie hieromtrent wordt naar het rapport verwezen [Verachtert et al., 2016].

Logischerwijs zullen de grote steden hierin duidelijk naar voor komen met een grote ontwikkelingskans, gezien hun grote connectiviteit en voorzieningen. De ruimtelijke rendementskaart kan dus op die manier gezien worden als een soort indicatie van waar al dan niet te verdichten en dus de focus te leggen op de grote kernen. Deze focus op de kernen komt ook overeen met de visie van de Vlaamse Overheid zoals uiteengezet in het Witboek en ook reeds aangehaald in sectie 2.1 [Ruimte Vlaanderen, 2016, Verachtert et al., 2016]. Deze ruimtelijke rendementskaart zal gebruikt worden als basis voor de scenario's voor de aanmaak van de eigen betonstopscenario's.

Verdeling bijkomende oppervlakte

De verdeling van de bijkomende oppervlakte van de klasse 'Built-up land', zoals reeds weergegeven in Tabel 3.4, zal gebeuren volgens 3 verschillende scenario's. Deze worden in dit onderdeel besproken.

1. *'Rendementskans'*: Een eerste scenario is volledig gebaseerd op de ruimtelijke rendementskaart. Met dit scenario wordt er verondersteld dat de Vlaamse Overheid volledig zal inzetten op het 'verkernen' van Vlaanderen. De bijkomende oppervlakte aan ruimtebeslag (en daaruit volgend die van de klasse 'Built-up land') zal worden toegekend aan de rastercellen waar de hoogste waarden voor het ruimtelijk rendement gelden, rekening houdend met de voorheen aangehaalde randvoorwaarden. Omdat er veel rastercellen vanuit de ruimtelijk rendementskaart dezelfde waarde hebben, gebeurt de selectie van de rastercellen indien er maar een deel van de rastercellen met eenzelfde waarden moeten worden omgevormd worden tot de klasse 'Built-up land' volgens een random

selectie. Er worden 100 rasterbestanden aangemaakt met voor iedere rastercel een random waarde tussen de 0 en 1. Deze 100 rasterbestanden worden samen genomen en de toekenning gebeurt vervolgens vanaf de hoogste waardes.

De focus voor dit scenario ligt op de (grote) steden en hierdoor wordt de open ruimte gevrijwaard van verdere inname door ruimtebeslag.

2. *'50% willekeur'*: Een tweede scenario bouwt verder op het eerste scenario. Het eerste scenario veronderstelt dat de alle bijkomende oppervlakte zal worden toegekend via de ruimtelijke rendementskaart en aangezien dit een vrij strikte toekenning is die er vanuit gaat dat de Vlaamse Overheid hierin een dirigerende rol zal gaan spelen, wordt er met een tweede scenario getracht om hierbij een soort van willekeur of vrije wil mee in te brengen. De helft van de bijkomende oppervlakte aan 'Built-up land' zal dus worden toegekend via de ruimtelijke rendementskaart (zoals voor het eerste scenario). De andere helft zal worden toegekend via de willekeur.

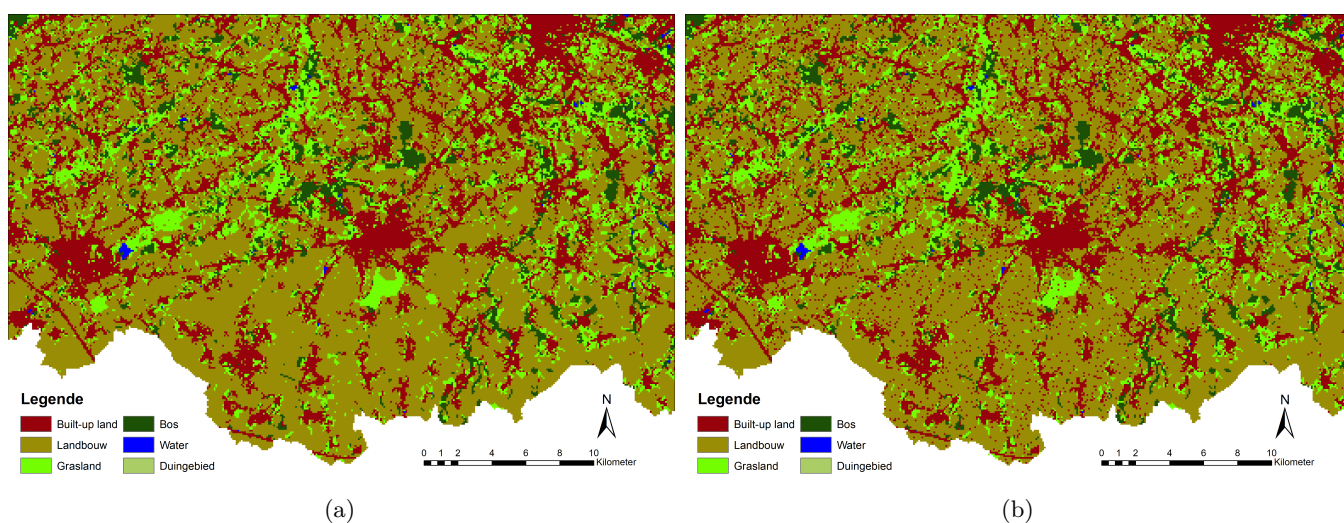
Deze willekeur is ingebracht door het genereren van 100 rasterbestanden. Elk van deze 100 rasters heeft voor elke rastercel die in aanmerking komt voor het toekennen van de bijkomende oppervlakte aan 'Built-up land' een random waarde gekregen tussen 0 en 1. Alle 100 rasterbestanden worden daarop samengenomen om zo tot een nieuwe kaart voor de willekeur te komen. Rastercellen met een hogere waarde zijn meer geneigd om te worden omgezet naar de klasse 'Built-up land'. Welke rastercel nu de toekenning volgens de ruimtelijke rendementskaart of volgens willekeur zal volgen wordt eveneens bepaald door het genereren van 100 random rasters zoals gedaan voor de willekeur. Deze rasterbestanden worden samengenomen en rastercellen met waardes groter dan 0,5 volgen de toekenning volgens willekeur en omgekeerd zullen de rastercellen met waardes kleiner dan 0,5 de toekenning volgens de ruimtelijke rendementskaart volgen.

3. *'100% willekeur'*: Een derde een laatste scenario is gelijkaardig aan het tweede scenario. Er is opnieuw gebruikt gemaakt van de willekeur bekomen via 100 rasterbestanden met random waardes tussen de 0 en 1, die hierna dan zijn samengevoegd om tot een kaart met de willekeur te komen. Het verschil met het tweede scenario is dat er voor dit derde scenario nog verder is gegaan en de toekenning van de bijkomende oppervlakte aan ruimtebeslag volledig zal gebeuren volgens willekeur.

Ten slotte is er ook nog rekening gehouden bij het toekennen van de bijkomende oppervlakte aan 'Built-up land' met de afstand tot de reeds bestaande oppervlakte aan 'Built-up land'. Dit om het vaak voorkomen van random alleenstaande rastercellen op grote afstand van de bestaande rastercellen te vermijden aangezien dit niet logisch is gezien de hoge kosten voor het voorzien van nutsvoorzieningen en dergelijke, alsook door het feit dat dit niet strookt met de focus op de kernen zoals vooropgesteld voor de betonstop [Ruimte Vlaanderen, 2016].

De afstand tot bestaande oppervlakte van 'Built-up land' is in rekening gebracht door gebruik te maken van wegingsfactoren op de random rasters die de willekeur

beschrijven. De weging gebeurt door de afstand zelf (euclidisch, uitgedrukt in meters) gaande tot 1000 meter te inverteren (Inverse Distance Weighting). Zo zal een afstand van 100 meter een wegingsfactor van 900 hebben, enzovoort. Een afstand groter dan 1000 meter heeft een wegingsfactor 0. Indien twee rastercellen van de random raster (willekeur) ongeveer gelijkaardige waarden hebben zal deze die het dichtst bij bestaande oppervlakte van 'Built-up land' na inbreng van de wegingsfactoren een grotere waarde hebben en eerder geneigd zijn om omgezet te worden tot 'Built-up land'. Het effect op de landgebruikskaarten van het al dan niet in rekening brengen van de afstand tot bestaande oppervlakte van 'Built-up land' staat weergegeven in Figuur 3.7.



Figuur 3.7: Effect van het inbrengen van de afstand tot bestaande oppervlakte van 'Built-up land' (a) bij de toekenning van willekeurige bijkomende oppervlakte aan 'Built-up land' ten opzichte van het niet inbrengen (b), voor de regio rond Sint-Truiden.

Overige mogelijkheden betonstopscenario's

De eigen aangemaakte betonstopscenario's zijn hierboven bekomen door te vertrekken vanaf de toestand in 2010 voor het ruimtemodel Vlaanderen. Er is getracht geweest om hetzelfde te doen vertrekkende van de landgebruikskaarten van Poelmans (2000). Maar door het grote periodeverschil met de huidige toestand (10 jaar) diende er een grote oppervlakte van de klasse 'Built-up land' te worden toegekend en dit op een vereenvoudigde manier (ten opzichte van de realiteit) wat een nog grotere onzekerheid zou veroorzaken. Ook was de definitie van de desbetreffende klasse 'Built-up land' moeilijk gelijk te stellen aan het ruimtebeslag. Daarvoor was het eerder aangewezen om de landgebruikskaarten van het Ruimtemodel Vlaanderen te gebruiken.

Ook er is nagegaan of er een overeenkomst was met de woonuitbreidingsgebieden en andere uitbreidingsgebieden volgens het Gewestplan om deze dan vanuit het

BAU-scenario te schrappen. Deze totale oppervlakte aan uitbreidingsgebieden is niet voldoende ondervonden om het verschil tussen het BAU-scenario en de betonstop te begroten. Er is een totaal van 30176 ha aan (niet reeds bebouwde) uitbreidingsgebieden gevonden volgens het Gewestplan, waar dat het verschil (BAU-betonstop) voor de klasse 'Built-up land' 36243 ha bedraagt [Vlaamse Overheid, 2017]. Deze denkpiste is dan ook verder niet meer beschouwd geweest.

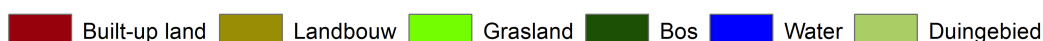
Resultaten

De resultaten van de in het vorige onderdeel uiteengezette scenario's voor de toekenning van de bijkomende oppervlakte aan 'Built-up land' (komende uit de afname van de dagelijkse ingebruikname van ruimtebeslag zoals vooropgesteld voor de betonstop) worden hier vervolgens weergegeven.

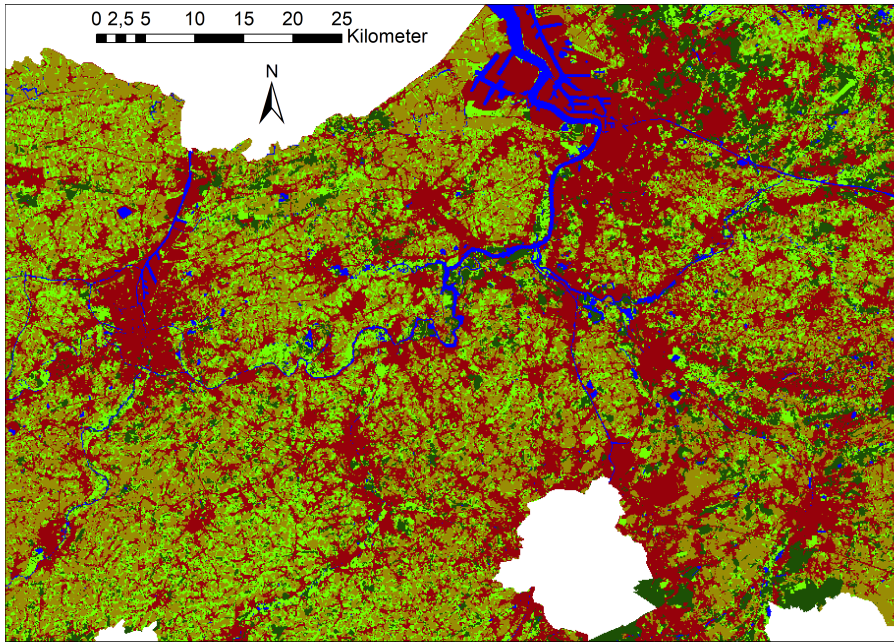
De landgebruikskaarten voor de Vlaamse Ruit voor de huidige toestand (2010), het scenario 'Rendementskans', het scenario '50% willekeur', het scenario '100% willekeur' en het BAU-scenario (2050) staan achtereenvolgens respectievelijk weergegeven op Figuur 3.9, Figuur 3.10, Figuur 3.11, Figuur 3.12 en Figuur 3.13. Uit deze Figuren is het logische gevolg zichtbaar dat er een stijging is in het 'verkernen' van Vlaanderen naargelang er minder willekeur aan te pas komt bij de betonstopscenario's. Voor het BAU-scenario is er een algemene toename van de oppervlakte van de klasse 'Built-up land'. De bekomen landgebruikskaarten voor de volledige oppervlakte van Vlaanderen staan weergegeven in de Bijlage A (Figuren A.1 tot en met A.7).

De oppervlaktes van de klasse 'Built-up land' zoals bekomen voor de hierboven besproken scenario's staan weergegeven in Tabel 3.6 (zie sectie 3.2.5). De overeenkomst tussen deze 3 scenario's ('Rendementskans', '50% willekeur' en '100% willekeur') en de omgezette oppervlakte van 'Built-up land' voor de betonstop, komende uit de dalende trend in dagelijkse ingebruikname van ruimtebeslag, is nagenoeg perfect. Dit is te verwachten en zelfs in zekere zin vereist aangezien de dalende trend de basis vormde voor deze scenario's. Hetzelfde geldt voor de percentages aan ruimtebeslag die weergegeven staan in Tabel 3.7. De percentages van het ruimtebeslag voor de totale oppervlakte van Vlaanderen staan weergegeven in Tabel 3.7.

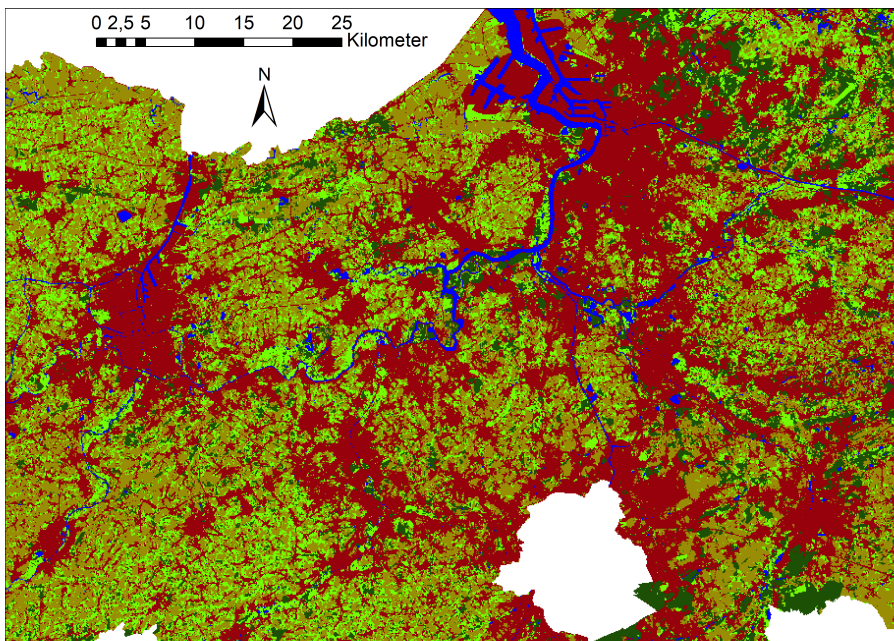
Legende



Figuur 3.8: Legende landgebruikskaarten Vlaamse Ruit.

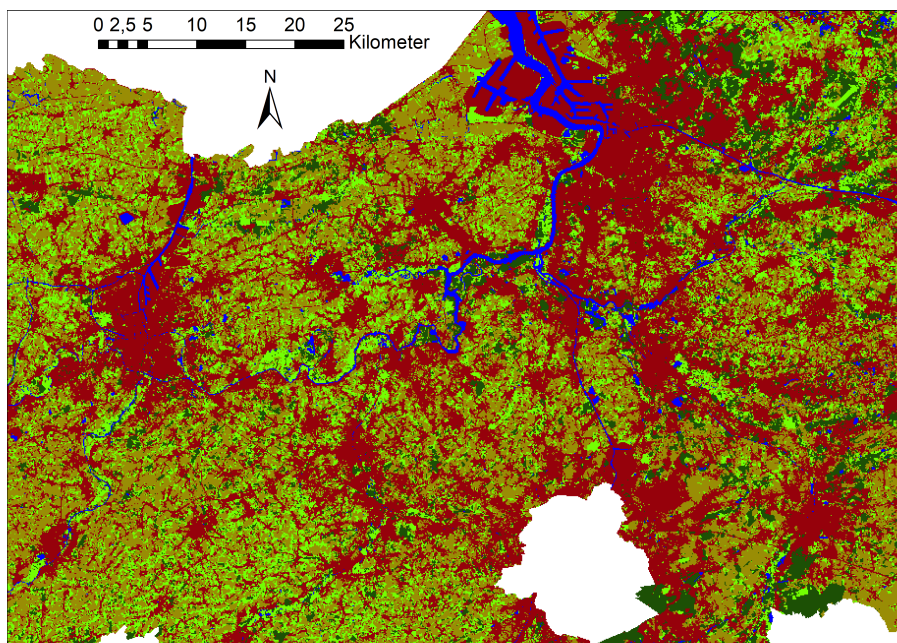


Figuur 3.9: Landgebruiksschaakart voor de huidige toestand (2010) van de Vlaamse Ruit.

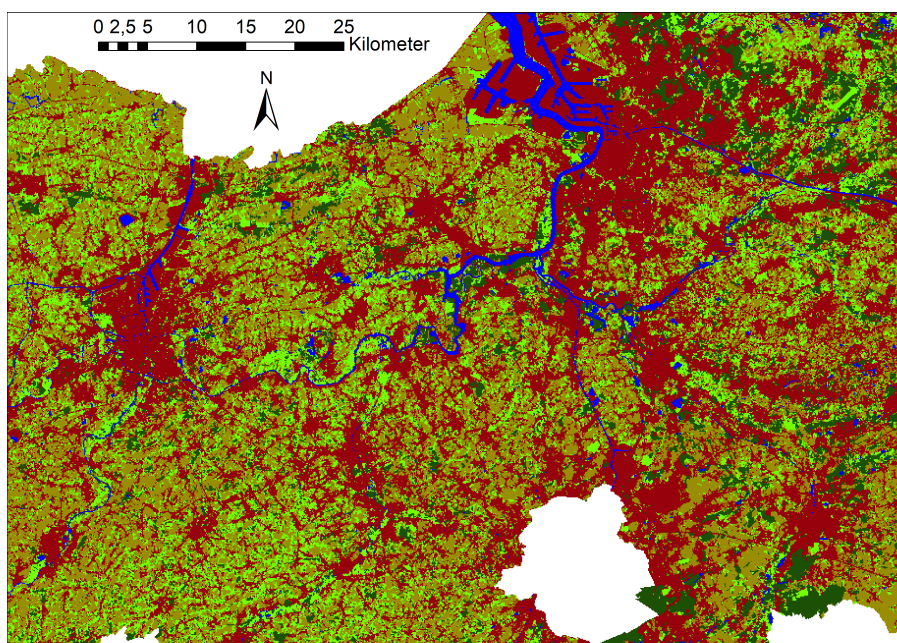


Figuur 3.10: Landgebruiksschaakart voor het scenario 'Rendementskans' (2050) van de Vlaamse Ruit.

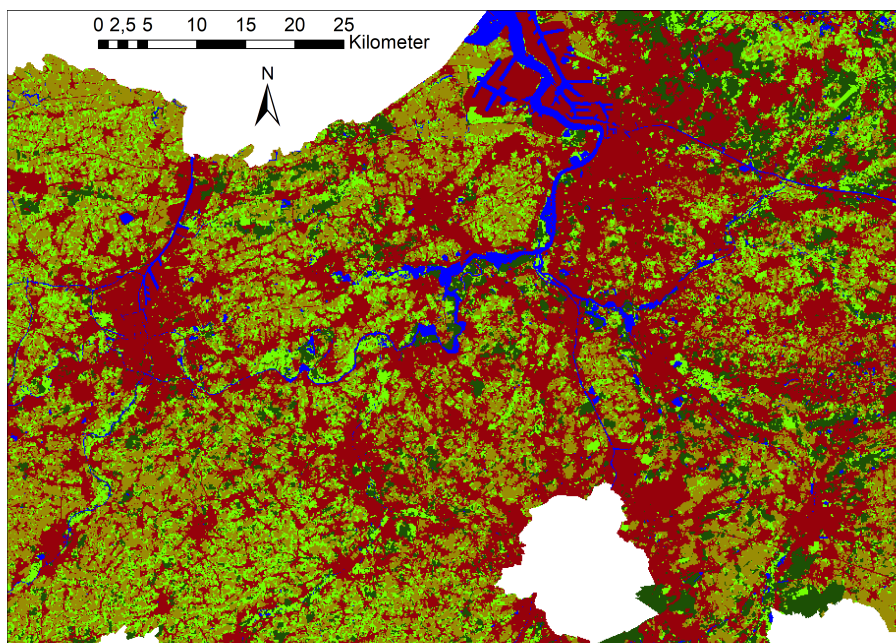
3. LANDGEBRUIKSVERANDERINGEN



Figuur 3.11: Landgebruikskartaar voor het scenario '50% willekeur' (2050) van de Vlaamse Ruit.



Figuur 3.12: Landgebruikskartaar voor het scenario '100% willekeur' (2050) van de Vlaamse Ruit.



Figuur 3.13: Landgebruiksschaakart voor het BAU-scenario (2050) van de Vlaamse Ruit.

3.2.3 Betonstop en Ruimtemodel Vlaanderen

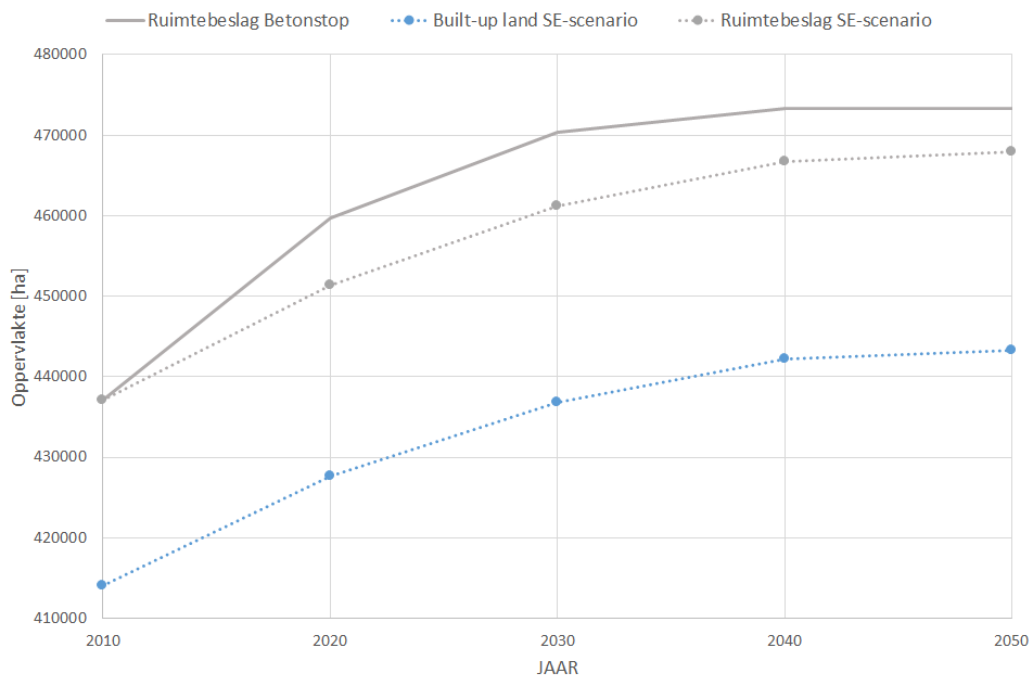
Er is ook binnen de scenario's voor de landgebruiksschaakarten van het Ruimtemodel Vlaanderen nog nagegaan dewelke eventueel nog kunnen doorgaan voor een benaderend betonstopscenario. Deze worden in dit onderdeel besproken. Zoals reeds vermeld geweest bestaan deze scenario's van het Ruimtemodel Vlaanderen uit het Business-As-Usual (BAU), Global Economy (GE), Regional Communities (RC), Strong Europe (SE) en Transatlantic Markets (TA) scenario. Uiteraard zal het BAU-scenario hier niet verder beschouwd worden als mogelijke benadering voor de betonstop [VITO, 2018].

In sectie 3.1.2 zijn de landgebruiksschaakarten van het Ruimtemodel Vlaanderen reeds besproken geweest. In Figuur 3.3 staan de oppervlaktes van de klasse 'Built-up land' weergegeven (na omzetting van de klassen), alsook die van het ruimtebeslag. In eerste instantie kan er vanuit Figuur 3.3 al worden opgemerkt dat enkel het RC- en SE-scenario mogelijks in aanmerking komen, rekening houdend met de voorheen bekomen factor 0,947 voor de omzetting van 'Built-up land' naar ruimtebeslag en het feit dat het ruimtebeslag voor de betonstop maximaal 35% kan bedragen. Deze 2 scenario's zullen enkel nog verder besproken worden.

Beide scenario's zijn voor alle jaartallen (2010, 2020, 2030, 2040 en 2050) omgezet geweest naar 5 klassen zoals weergegeven in Tabel 3.2. De factor 0,947 voor de omzetting van de oppervlakte aan 'Built-up land' naar ruimtebeslag die in sectie 3.1.2 is bekomen, wordt ook hier toegepast. Zoals te zien op Figuur 3.14 en Figuur

3. LANDGEBRUIKSVERANDERINGEN

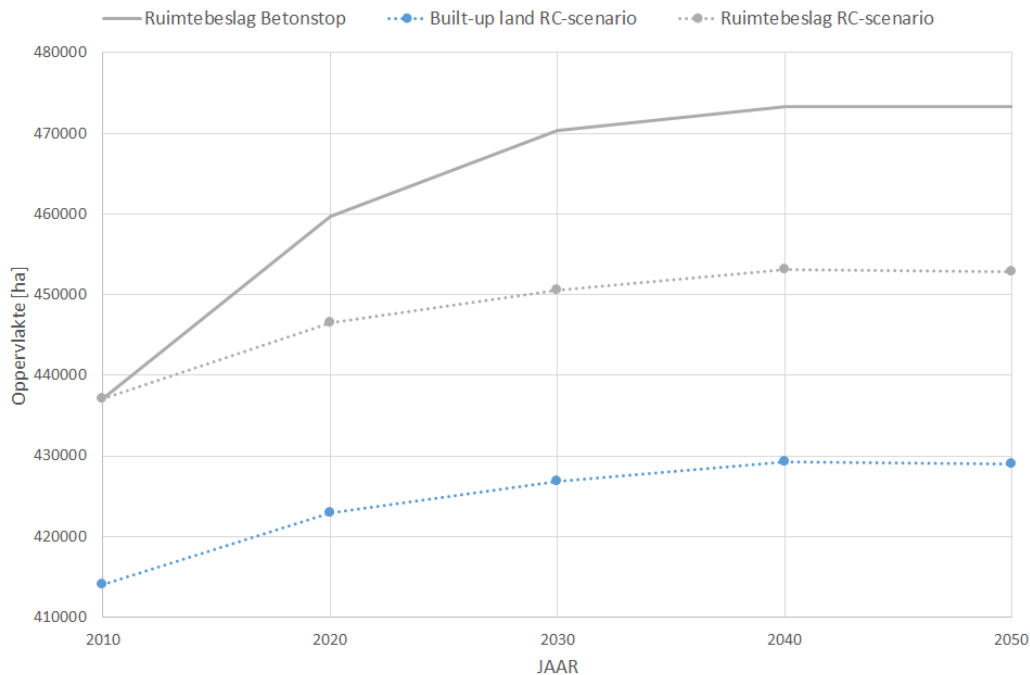
3.15 ligt de oppervlakte van het ruimtebeslag voor beide scenario's lager dan deze die bekomen is door de afname dan de dagelijkse toename in ruimtebeslag zoals vooropgesteld voor de betonstop. Hierbij is telkens gewerkt met de factor 0,947 en er is vanuit gegaan dat deze factor constant blijft.



Figuur 3.14: Oppervlakte aan 'Built-up land' en de daaruit volgende oppervlakte aan ruimtebeslag van het SE-scenario in vergelijking met de oppervlakte van ruimtebeslag volgens het scenario van de betonstop [Ruimte Vlaanderen, 2016, VITO, 2018] (eigen verwerking).

De keuze om het SE-scenario en het RC-scenario te gebruiken als mogelijk scenario voor de betonstop is ook te verantwoorden als de omschrijving horende bij elk scenario wordt beschouwd. Het SE-scenario (Strong Europe) legt de focus op onder andere overheidsingrepen en milieuzorg, en het RC-scenario (Regional Communities) legt de focus op onder andere de lokale aanpak (overheden, productie/consumptie) en beperkte overheidsmiddelen. Beide hebben in zekere mate een overeenkomst met de visie achter de betonstop [Ruimte Vlaanderen, 2016, VITO, 2018].

Zowel het SE-scenario als het RC-scenario komende uit het Ruimtemodel Vlaanderen kunnen doorgaan als mogelijke scenario's voor de betonstop. Met deze scenario's zal dus ook gerekend worden bij de hydrologische modellering. In Tabel 3.6 staan de oppervlaktes aan 'Built-up land' weergegeven voor beide scenario's. De percentages van het ruimtebeslag ten opzichte van de totale oppervlakte van Vlaanderen staan weergegeven in Tabel 3.7 van de sectie 3.2.5.



Figuur 3.15: Oppervlakte aan 'Built-up land' en de daaruit volgende oppervlakte aan ruimtebeslag van het RC-scenario in vergelijking met de oppervlakte van ruimtebeslag volgens het scenario van de betonstop [Ruimte Vlaanderen, 2016, VITO, 2018] (eigen verwerking).

3.2.4 Verharding

In voorgaande onderdelen zijn de landgebruikskaarten geanalyseerd geweest en zijn er landgebruiksscenario's uitgewerkt geweest voor de betonstop. Deze hebben allemaal betrekking tot de klasse 'Built-up land' oftewel het ruimtebeslag. Wat nog rest en zeker ook van belang is, is de verharding aangezien deze een niet te verwaarlozen impact heeft op de hydrologie. Deze zal dan ook in dit onderdeel verder worden besproken.

In sectie 3.1.1 zijn de percentages verharding voor Vlaanderen in het verleden aangehaald geweest. Deze staan hier ook weergegeven in Tabel 3.5. Vanuit de gekende verharding van het verleden kan eenvoudigweg een lineaire trendlijn worden opgemaakt om zo tot de verharding voor het BAU-scenario te komen. Deze staat weergegeven op Figuur 3.16. Een verhardingspercentage van 23,81% is bekomen voor het BAU-scenario.

Het bepalen van het verhardingspercentage waarbij er rekening wordt gehouden met de toepassing van de betonstop is complexer dan een eenvoudige lineaire trend. Hiervoor zijn 3 mogelijke verhardingsscenario's bekomen. Een eerste en laagste verhardingsscenario (Low) is bekomen door de verhouding tussen de verharding en het ruimtebeslag voor de toestand in 2013 constant te houden naar de toekomst toe.

Deze verhouding is gelijk aan 0,435. Via de oppervlakte aan ruimtebeslag volgens de betonstop in 2040 is dan een oppervlakte aan verharding bekomen die resulteert in een verhardingspercentage van 15,22%.

Een tweede en middelste verhardingsscenario (Medium) is bekomen door aanname dat er relatief gezien voor elke bijkomende hectare ruimtebeslag er eveneens een hectare verharding zal bijkomen. Via de bijkomende oppervlakte aan ruimtebeslag volgens de betonstop is er dus een oppervlakte van bijkomende verharding bekomen die zich vertaalt in een verhardingspercentage van 16,41% voor de totale oppervlakte van Vlaanderen.

Een laatste en hoogste verhardingsscenario (High) is gelijkaardig aan het vorige scenario met het verschil dat de huidige situatie (2013) is beschouwd geweest. Deze huidige situatie bestaat erin dat er per bijkomende hectare van ruimtebeslag er relatief gezien 1,35 hectare verharding bijkomt. Dit wil met andere woorden zeggen dat er in de bestaande oppervlakte van het ruimtebeslag eveneens verharde oppervlakte zal bijkomen. Gelijkaardig aan de voorgaande verhardingsscenario's is dan via de bijkomende oppervlakte aan ruimtebeslag een bijkomende verharde oppervlakte bekomen. Dit geeft een verhardingspercentage voor heel Vlaanderen van 17,15%.

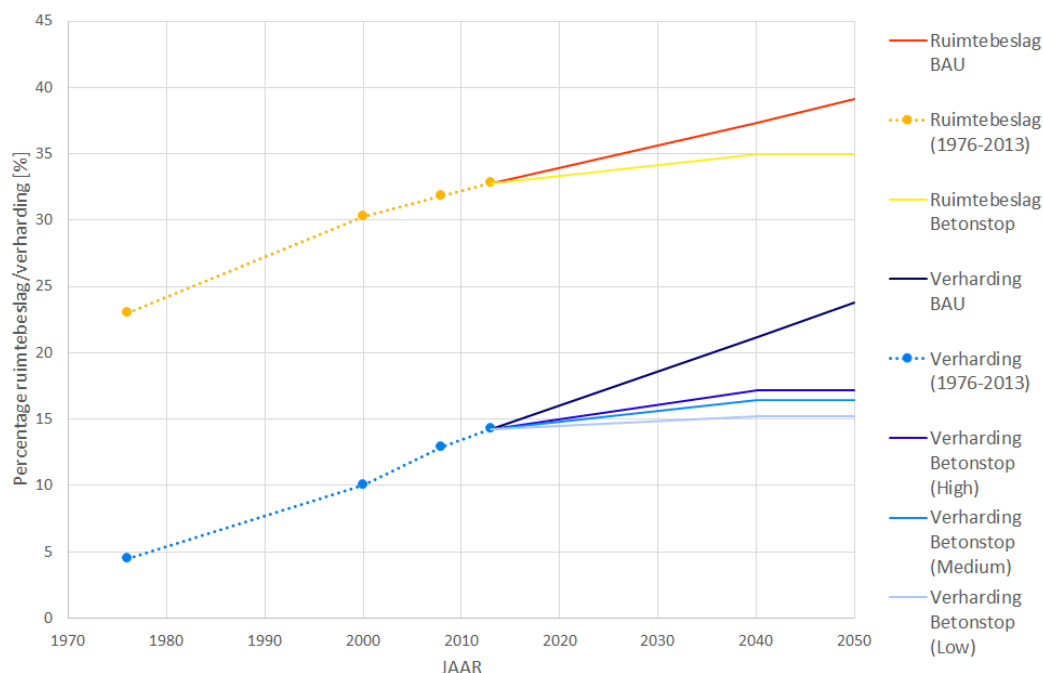
In Tabel 3.5 staan het verhardingspercentage voor de verschillende (betonstop)scenario's weergegeven rekening houdend met de verschillende verhardingsscenario's. Voor het SE- en RC-scenario is een lager verhardingspercentage bekomen door het feit dat voor deze scenario's de oppervlakte van 'Built-up land' lager ligt in vergelijking met de andere scenario's.

De aannames die gemaakt zijn om tot een verhardingspercentage voor de betonstop te komen zijn onderbouwd en kunnen dus in het verdere verloop van deze masterproef gebruikt worden, maar deze blijven enigszins ruwe aannames.

Tot slot kan er dus gesteld worden dat de betonstop een gunstig effect kan hebben op de oppervlakte die verhard is in Vlaanderen. Dit zal zich dan ook vertalen naar de hydrologie toe.

Tabel 3.5: Verhardingspercentage voor heel Vlaanderen voor de verschillende landgebruiksscenario's, verhardingsscenario's en jaartallen.

	Jaar	Verhardingsscenario		
		Low	Medium	High
Verleden	1976	4,50%		
	2000	10%		
	2008	12,9%		
	2013	14,25%		
Eigen scenario's	2040	15,22%	16,41%	17,15%
RMV - SE	2040	15,05%	16,22%	16,92%
RMV - RC	2040	14,56%	15,70%	16,29%
RMV - BAU	2050	23,81%		



Figuur 3.16: Ruimtebeslag en verhardingspercentages voor de totale oppervlakte van Vlaanderen voor het BAU-scenario en het betonstopscenario, waarvoor 3 verschillende verhardingsscenario's [Poelmans, 2010, De Meyer et al., 2011, Poelmans en Engelen, 2014, Ruimte Vlaanderen, 2016] (eigen verwerking).

3.2.5 Samenvatting resultaten

De resultaten uit voorgaande onderdelen op vlak van 'Built-up land', ruimtebeslag en verharding zijn in dit onderdeel samengevat. De dalende trend van dagelijkse ingebruikname van ruimtebeslag komende van de betonstop (zie Figuur 2.1), is logischerwijs duidelijk zichtbaar in Tabel 3.6 voor de eigen betonstopscenario's. Voor het SE- en RC-scenario van het Ruimtemodel Vlaanderen is dit in zekere mate ook het geval. Procentueel gezien (zie Tabel 3.7) is deze overeenkomst duidelijker zichtbaar.

De eigen aangemaakte betonstopscenario's (zie sectie 3.2.3) en de scenario's van het Ruimtemodel Vlaanderen die verondersteld zijn geweest een goede benadering te zijn voor de betonstop (zie 3.2.3) komen op vlak van ruimtebeslag zeer goed overeen met de 'definitie' van de betonstop. Wel dient er te worden opgemerkt dat er bij het bekomen van deze resultaten een aantal aannames en omzettingen noodzakelijk waren, zij het steeds verantwoord.

De resultaten voor de verharding volgen uit deze van het ruimtebeslag. De percentages voor de verharde oppervlakte in Vlaanderen voor de verschillende scenario's staan weergegeven in Tabel 3.8. Zoals ook eerder opgemerkt heeft de realisatie ook een gunstig effect op de verharde oppervlakte.

3. LANDGEBRUIKSVERANDERINGEN

Op Figuur 3.9 tot en met 3.13 staan de landgebruikskaarten voor de betonstop (Rendementskans, 50% willekeur, 100% willekeur, RMV - SE en RMV - RC) weergegeven voor het gebied van de Vlaamse Ruit. Voor de landgebruikskaarten voor de gehele oppervlakte van Vlaanderen wordt verwezen naar Bijlage A.

In een volgend onderdeel zullen de verschillende toekomstscenario's (BAU en betonstop) onderling vergeleken worden op een aantal aspecten.

Tabel 3.6: Oppervlaktes van de klasse 'Built-up land' voor de betonstop zelf, voor de verschillende scenario's die kunnen doorgaan als scenario's voor de betonstop en het BAU-scenario.

	2010	2020	2030	2040	2050
Betonstop [ha]	414079	435466	445522	448324	448324
Rendementskans [ha]	414079	435457	445511	448315	448315
50% willekeur [ha]	414079	435467	445525	448327	448327
100% willekeur [ha]	414079	435466	445523	448323	448323
RMV - SE [ha]	414079	427586	436851	442184	443256
RMV - RC [ha]	414079	423002	426854	429256	428982
RMV - BAU [ha]	414079	430634	452496	472842	484567

Tabel 3.7: Percentages van het ruimtebeslag ten opzichte van de totale oppervlakte van Vlaanderen voor de betonstop zelf en de eigen aangemaakte scenario's, voor de scenario's van het Ruimtemodel Vlaanderen die kunnen doorgaan als scenario's voor de betonstop en het BAU-scenario.

	2010	2020	2030	2040	2050
Betonstop(scenario's)	32,33%	34,00%	34,78%	35,00%	35,00%
RMV - SE	32,33%	33,38%	34,10%	34,52%	34,60%
RMV - RC	32,33%	33,02%	33,32%	33,51%	33,49%
RMV - BAU	32,33%	34,06%	35,63%	37,32%	39,10%

Tabel 3.8: Percentages van de verharding (Medium verhardingsscenario) ten opzichte van de totale oppervlakte van Vlaanderen voor de betonstop zelf en de eigen aange-maakte scenario's, voor de scenario's van het Ruimtemodel Vlaanderen die kunnen doorgaan als scenario's voor de betonstop en het BAU-scenario.

	2010	2020	2030	2040	2050
Betonstop(scenario's)	13,49%	15,08%	15,87%	16,41%	16,41%
RMV - SE	13,49%	14,81%	15,56%	16,18%	16,22%
RMV - RC	13,49%	14,65%	15,20%	15,71%	15,70%
RMV - BAU	13,49%	15,91%	18,55%	21,18%	23,81%

3.3 Analyse en vergelijking landgebruiksscenario's betonstop

In dit laatste onderdeel van de GIS-analyse zullen de vijf geselecteerde scenario's voor de betonstop en het BAU-scenario vergeleken worden met de toestand in 2010, alsook onderling. Een eerste aspect waarnaar zal gekeken voor elk van de landgebruiksscenario's is de centraliteit van de klasse 'Built-up land'. Een tweede aspect dat beschouwd kan worden is het aantal afzonderlijke kernen van de klasse 'Built-up land'. Beide aspecten geven in zekere mate een maat voor de verspreiding van de bebouwde oppervlakte en hierdoor dan ook voor het ruimtebeslag. De verspreiding van het stedelijk gebied is een belangrijk werkpunt voor de betonstop aangezien de Vlaamse Regering hiermee meer wil inzetten op het 'verkernen' van Vlaanderen. Een grote verspreiding komt niet overeen met de visie achter de betonstop.

Voor elk van de hierboven vermelde aspecten zal er voornamelijk gekeken worden naar de centrumsteden. De definitie van de centrumsteden komt uit het rangschikken van de steden in Vlaanderen naargelang hun uitrusting en voorzieningen. De 13 centrumsteden in Vlaanderen zijn: Aalst, Antwerpen, Brugge, Genk, Gent, Hasselt, Kortrijk, Leuven, Mechelen, Oostende, Roeselare, Sint-Niklaas en Turnhout [Van Hecke, 1997]. De totale oppervlaktes voor elk van de scenario's zijn al besproken geweest in het voorgaande onderdeel.

3.3.1 Centraliteit

De centraliteit van de verschillende landgebruiksscenario's geeft een eerste indicatie van de verspreiding van het verstedelijkt gebied voor elk scenario. Om de centraliteit van de scenario's te beschouwen en te vergelijken, zijn er verschillende mogelijkheden of indicatoren beschouwd. Een eerste mogelijkheid bestaat erin om de verhouding tussen de omtrek en de oppervlakte van een aaneengesloten oppervlakte van 'Built-up land' te vergelijken. Deze verhouding geeft een inschatting van de verspreiding van het 'Built-up land'. Een grote waarde wijst op meer versnipperde aaneengesloten oppervlakte terwijl een kleinere waarde wijst op een meer gecentreerde aaneengeslo-

ten oppervlakte. Deze verhouding kan dan bepaald worden voor elke afzonderlijke oppervlakte om vervolgens het gemiddelde van al deze waarden te bepalen. De verhoudingen bekomen voor elk landgebruiksscenario staan weergegeven in Tabel 3.9. Voor deze verhouding toegepast op enkel de centrumsteden, wordt verwezen naar de Figuur B.9 in Bijlage B.

Op Tabel 3.9 is te zien dat deze verhouding voor de scenario's vrij gelijkaardig is. Toch kunnen er enkele conclusies getrokken worden. Algemeen is er een stijging in de verhouding ten opzichte van 2010 op te merken, wat ook te verwachten was aangezien de totale oppervlakte aan 'Built-up land' stijgt voor elk toekomstscenario en dit leidt tot meer aaneengesloten oppervlaktes. Enkel voor het scenario 'RMV - RC' is er een daling, en dit omdat er bij dit scenario ingezet wordt op de lokale kernen waardoor er veel (kleinere), voornamelijk gecentreerde, aaneengesloten oppervlaktes aan 'Built-up land' zijn. Deze indicator geeft alleenstaand weinig inzicht in de verspreiding van de bebouwde oppervlakte voor elk scenario, daarom zullen er nog andere indicatoren beschouwd worden.

Een tweede mogelijkheid is de oppervlakte aangesloten aan de oppervlakte van een centrumstad te gaan beschouwen. Hoe groter de aaneengesloten oppervlakte van 'Built-up land' van de desbetreffende centrumstad, hoe meer er bebouwde oppervlakte gecentreerd is rondom de centrumstad. In Tabel 3.9 staan deze oppervlaktes weergegeven. Hieruit valt af te leiden dat er voor elk scenario een toename is aan oppervlakte aangesloten aan de centrumsteden. Verder nog dat voor de eigen betonstopscenario's ('Rendementskans', '50% willekeur', '100% willekeur') het scenario 'Rendementskans' er het meeste bebouwde oppervlakte rondom de centrumsteden gesitueerd is en omgekeerd voor het scenario '100% willekeur'. Dit is een te verwachten resultaat omdat het scenario 'Rendementskans' vertrekt vanuit het principe van de 'verkerning' van Vlaanderen. Het BAU-scenario heeft de grootste oppervlakte aangesloten bij de centrumsteden wat niet verwonderlijk is gezien er voor dit scenario veel meer oppervlakte aan 'Built-up land' is (zie ook Tabel 3.6). Het RC-scenario geeft voor deze indicator het slechte resultaat voor de centraliteit omdat voor dit scenario sterker wordt ingezet op de lokale kernen in plaats van de grote kernen zoals de centrumsteden. De oppervlakte horende bij de centrumsteden staat ook grafisch weergegeven op de Figuur B.8 in Bijlage B en in kaartvorm op de Figuren B.1 tot en met B.7.

Aanvullend op de vorige indicator geeft de derde mogelijkheid het aandeel van de oppervlakte aan 'Built-up land' aangesloten aan de centrumsteden ten opzichte van de totale oppervlakte van 'Built-up land' weer. Hieruit is opnieuw een stijging in percentage zichtbaar in Tabel 3.9, gezien vanaf de toestand in 2010. Verder blijkt nog dat het scenario 'Rendementskans' een goed resultaat geeft op vlak van centraliteit naar centrumsteden toe. Het verschil met het BAU-scenario is iets kleiner geworden. Dezelfde daling voor de eigen betonstopscenario's als voor de voorgaande indicator is opnieuw zichtbaar en dezelfde conclusies zijn geldig. Hetzelfde geldt voor het scenario 'RMV - RC'.

Een vierde en laatste mogelijkheid bestaat erin om de oppervlakte aan 'Built-up land' te beschouwen die niet aangesloten is aan de centrumsteden. Deze indicator neemt het verschil in oppervlakte tussen de landgebruiksscenario's enigszins weg. Ten opzichte van de toestand in 2010, wat hier als vergelijkingspunt gebruikt wordt, daalt de oppervlakte van 'Built-up land' dat niet hoort tot de centrumsteden enkel voor het eigen aangemaakte scenario 'Rendementskans'. Waar dat bij de voorgaande indicatoren het scenario 'RMV - BAU' als beste naar voren kwam, is dit met deze indicator niet het geval omdat de grotere oppervlakte die hoort bij het BAU-scenario hierbij minder een rol zal spelen. Het scenario 'Rendementskans' heeft dan ook de beste centraliteit.

In volgend onderdeel zal er nog dieper ingegaan worden op de oppervlaktes van de klasse 'Built-up land' aangesloten aan de centrumsteden, de afzonderlijke kernen en hoe dat deze exact zijn bepaald geweest. De opmerkingen ter verklaring van de bovenstaande resultaten voor de verschillende indicatoren zijn ook zichtbaar op de kaarten in Bijlage A en B voor Vlaanderen voor elk van de landgebruiksscenario's.

Tabel 3.9: Verschillende toetsingsmogelijkheden voor de centraliteit van de huidige toestand (2010) en deze van de scenario's voor het toekomstig landgebruik (2050).

	Om- trek/ Opp. [m/ha]	Opp. 'Built-up land' centrumsteden [ha]	'Built-up land' cen- trumsteden	Opp. 'Built-up land' niet aan centrumsteden [ha]
Toestand 2010	328,34	94804	22,90%	319275
Rendementskans	329,56	136293	30,40%	312022
50% willekeur	330,14	123593	27,57%	324734
100% willekeur	329,72	101955	22,74%	346368
RMV - SE	329,61	116637	26,31%	326619
RMV - RC	327,21	98740	23,02%	330242
RMV - BAU	329,07	149466	30,85%	335101

3.3.2 Afzonderlijke kernen

Een andere mogelijkheid om de verspreiding van de verschillende landgebruiksscenario's te kunnen vergelijken is door de afzonderlijke kernen of aaneengesloten oppervlaktes van de klasse 'Built-up land' aan de centrumsteden te beschouwen.

Om deze aangesloten oppervlaktes te bepalen dient er rekening te worden gehouden met het feit dat hoe groter de totale oppervlakte aan 'Built-up land', hoe meer waarschijnlijk het zal zijn dat er één grote oppervlakte van 'Built-up land' ontstaat die ook de centrumsteden onderling kan verbinden. Om dit tegen te gaan is er gewerkt met de invloedssfeer rondom de centrumstad die als grens dient voor de aaneengesloten

oppervlakte aan 'Built-up land'. Deze invloedssfeer voor elke centrumstad is bekomen via de regionaal stedelijke invloedssferen [De Maeyer et al., 2015]. Deze grenzen zijn te zien op de Figuren B.1 tot en met B.7 in Bijlage B.

Verder dienen de afzonderlijke kernen nog onderverdeeld te worden naargelang hun oppervlakte om zo een duidelijker beeld te krijgen van de aard en verdeling van deze kernen. Hierbij is er gekozen om enkel de afzonderlijke kernen onder te verdelen indien deze een oppervlakte hebben groter dan 50 ha om zo enkel de grotere kernen te beschouwen. In Tabel 3.10 staat deze onderverdeling weergegeven voor de huidige toestand en elk toekomstig landgebruiksscenario. Het totaal aantal afzonderlijke kernen staat eveneens hierin weergegeven. In Bijlage B staan de afzonderlijke kernen in kaartvorm weergegeven voor heel Vlaanderen.

Tabel 3.10: Onderverdeling in aantal van de afzonderlijke kernen voor de huidige toestand (2010) en voor de scenario's voor het toekomstig landgebruik (2050), zie ook de Figuren B.1 tot en met B.7 in Bijlage B.

	> 50 ha	50 - 500 ha	500 - 2500 ha	2500 - 7500 ha	7500 - 15000 ha	> 15000 ha	Tot. ker- nen
Toestand 2010	762	648	95	15	3	1	35277
Rendementskans	679	576	80	15	3	4	33825
50% willekeur	718	616	80	16	3	3	37835
100% willekeur	765	646	99	16	3	1	40322
RMV - SE	688	575	89	17	5	2	31088
RMV - RC	882	767	93	18	3	1	30382
RMV - BAU	674	561	86	16	7	4	28886

Op Tabel 3.10 is te zien dat er voor alle scenario's behalve het scenario '100% willekeur' en 'RMV - RC' een daling is in het aantal kernen groter dan 50 ha ten opzichte van de toestand in 2010. Dit is positief naar de verspreiding van het 'Built-up land' toe (minder verspreide grote kernen). Het scenario 'RMV - RC' geeft een stijging en dit omdat de lokale (kleine) kernen versterkt worden en er zo een groter aantal groter dan 50 ha zullen zijn.

Uit het middengedeelte van Tabel 3.10 kan worden afgeleid dat voor de eigen aangemaakte scenario's het scenario 'Rendementskans' het meeste grote kernen heeft, wat te verwachten was. Voor het Ruimtemodel Vlaanderen zijn dit het SE- en BAU-scenario. Het laatste voornamelijk door de grotere oppervlakte aan 'Built-up land' en dus ook een grotere mogelijkheid tot het aaneensluiten van afzonderlijke kernen.

Voor het totaal aantal kernen kan dan tenslotte worden opgemerkt dat voor de eigen scenario's zoals te verwachten het scenario 'Rendementskans' het kleinste aantal afzonderlijke kernen heeft. Doordat er met willekeur is gewerkt voor de andere twee scenario's hebben deze een veel groter aantal afzonderlijke kernen. Het verschil met

de scenario's van het Ruimtemodel Vlaanderen is groot mede door dit gebruik van een (eenvoudige) willekeur voor de verdeling. De scenario's van het Ruimtemodel Vlaanderen zijn beter gecentreerd rondom de bestaande oppervlakte van 'Built-up land' (toestand 2010) en hebben dus minder afzonderlijke (kleine) kernen. Ook is er voor deze scenario's een verandering in de bestaande oppervlakte van 'Built-up land' van de toestand in 2010 (sommige afgelegen alleenstaande zones verdwijnen), waar dit niet het geval is voor de eigen aangemaakte scenario's. Bijkomend is er voor het BAU-scenario ook nog een grotere totale oppervlakte aan 'Built-up land', dat een grotere aansluitende oppervlakte mogelijk maakt.

De verschillende afzonderlijke kernen en hun oppervlakte kunnen ook voor de huidige toestand en elk scenario weergegeven worden in kaartvorm voor heel Vlaanderen. Deze kaarten staan weergegeven in Bijlage B op de Figuren B.1 tot en met B.7. Hierop zijn duidelijk de centrumsteden zichtbaar, alsook andere kleinere steden en gemeentes. De opmerkingen ter verklaring van de bovenstaande resultaten (kernen ed.) zijn ook zichtbaar op deze kaarten, alsook op de kaarten in Bijlage A voor Vlaanderen voor elk van de landgebruiksscenario's.

3.4 Besluit

In dit hoofdstuk zijn er, door middel van een GIS-analyse waarbij de verschillende databronnen voor het landgebruik in Vlaanderen zijn geanalyseerd geweest, verschillende landgebruiksscenario's bekomen voor het realiseren van de betonstop. Hiervan zijn er drie scenario's ('Rendementskans', '50% willekeur', '100% willekeur') zelf aangemaakt vertrekkende van de toestand in 2010 volgens het Ruimtemodel Vlaanderen. Verder zijn er nog twee scenario's bekomen na enige omzetting vanuit het Ruimtemodel Vlaanderen ('RMV - SE', 'RMV - RC'). Voor het 'Business-As-Usual' landgebruik is deze van het Ruimtemodel Vlaanderen gebruikt. Deze zes landgebruiksscenario's zijn geanalyseerd geweest en onderling vergeleken.

De landgebruikskaarten van het Ruimtemodel Vlaanderen vormen de basis voor elk van de aangemaakte of geselecteerde landgebruiksscenario's. Deze hadden ten opzichte van de landgebruikskaarten van Poelmans het voordeel van recenter opgemaakte te zijn geweest [VITO, 2018]. Om deze landgebruikskaarten te kunnen gebruiken is er voor deze masterproef een omzetting uitgevoerd geweest. De resultaten benaderen het ruimtebeslag. Voor de eigen scenario's komen de totale oppervlaktes uiteraard overeen aangezien de daling in dagelijkse ingebruikname van ruimtebeslag direct als basis heeft gediend voor deze scenario's en de klasse 'Built-up land' rechtstreeks gekoppeld is aan het ruimtebeslag. Hetzelfde geldt voor de geselecteerde scenario's van het Ruimtemodel Vlaanderen. Bij de aanmaak van de eigen betonstopscenario's is er ook rekening gehouden met een aantal extra randvoorwaarden om tot een realistischer resultaat te komen. Op vlak van verharding is er terug gewerkt met drie mogelijke scenario's voor de toename in verharding.

De aannames die noodzakelijk voor het bekomen van de scenario's zijn in zekere

mate ruw maar, zoals reeds gesteld, telkens onderbouwd geweest. Omwille van de omvang van deze masterproef is een uitgebreide studie met toepassing van complexere modellen voor het voorspellen van het landgebruik niet aan de orde.

Als uiteindelijk de verschillende scenario's voor het toekomstig landgebruik onderling vergeleken worden, zijn de achterliggende ideeën horende bij elk scenario zichtbaar in de eigenschappen van het desbetreffende scenario. Zo is er telkens een stijging waar te nemen in de verspreiding van het stedelijk gebied voor de eigen betonstopscenario's bij toename van de willekeur. Ook is voor het RC-scenario de focus op de lokale kernen steeds duidelijk.

Tot slot zullen de zes scenario's voor het toekomstig landgebruik gebruikt worden voor de hydrologische modellering om zo het effect van het realiseren van de betonstop op de hydrologie in Vlaanderen te kunnen begroten. Een aantal parameters zullen aan het veranderend landgebruik gekoppeld worden in het volgende hoofdstuk, waarmee dan het effect van de betonstop ingeschat kan worden.

Hoofdstuk 4

Hydrologische modellering

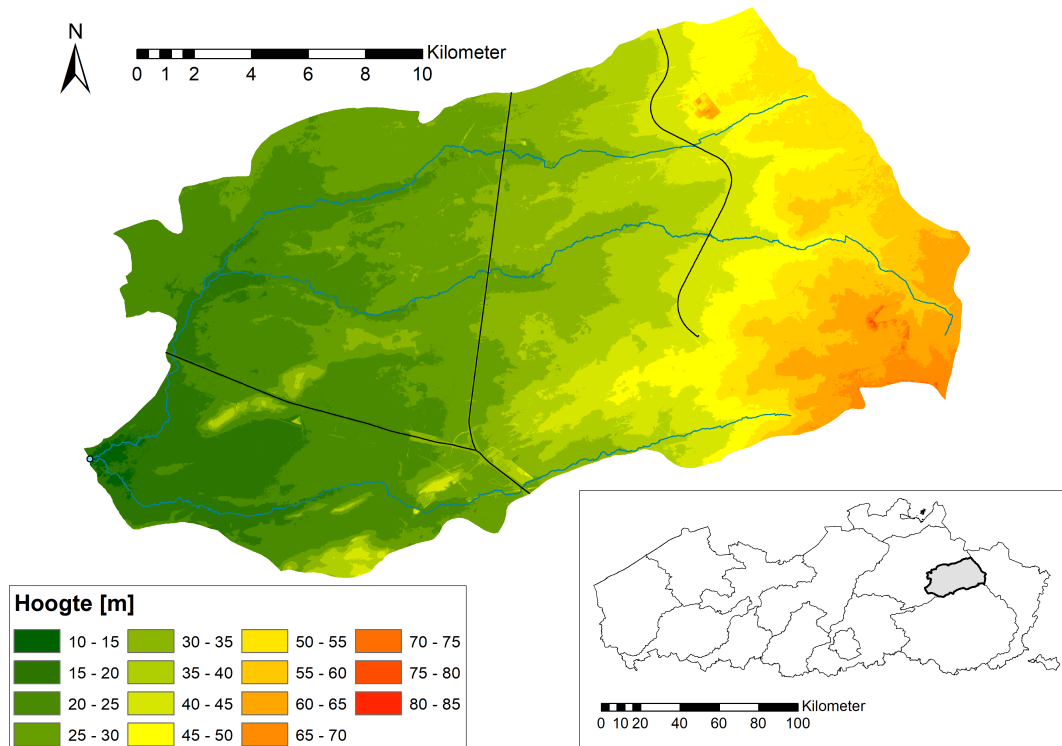
In dit hoofdstuk zullen de landgebruiksscenario's die bekomen zijn in het vorige hoofdstuk als input dienen voor de hydrologische modellering om zo het effect van het al dan niet toepassen van de betonstop in te kunnen schatten. Hiervoor zal er eerst de case study, zijnde het stroomgebied van de Grote Nete, kort besproken worden. De methodologie voor de hydrologische modellering (NAM-model, ruimtelijke disaggregatie) komt erna aan bod. Uiteindelijk zijn de resultaten nog besproken.

4.1 Case study: Stroomgebied Grote Nete

Als studiegebied is het stroomgebied van de Grote Nete geselecteerd, gelegen in het noordoosten van Vlaanderen. De Grote Nete is onderdeel van het Netebekken dat op zijn beurt onderdeel is van het Scheldebekken. Deze waterloop ontspringt in Hechtel en stroomt over naar de Nete in Lier waar de Grote Nete samenloopt met de Kleine Nete. De voornaamste zijrivers van de Grote Nete zijn de Molse Nete, de Grote Laak en de Wimp. De Grote Nete op zich heeft een lengte van ongeveer 86 km (Hechtel tot Lier) en het stroomgebied heeft een oppervlakte van ongeveer 728 km² [Vlaamse Milieumaatschappij, 2017].

Voor deze masterproef zal niet het volledige stroomgebied van de Grote Nete als studiegebied beschouwd worden. Enkel het stroomopwaarts gebied vanaf het meetstation Geel-Zammel (Varendonk) wordt beschouwd. Dit deel van het stroomgebied omslaat een oppervlakte van ongeveer 384 km². De lengte van de Grote Nete bedraagt dan ongeveer 46,5 km. Het beschouwde deel van het stroomgebied van de Grote Nete, met de situering in Vlaanderen en het Netebekken, staat weergegeven op Figuur 4.1. De Grote Nete is de middelste van de drie waterlopen (blauw) op Figuur 4.1, de Molse Nete situeert zich bovenaan en de Grote Laak onderaan. Het meetstation Geel-Zammel bevindt zich in het oosten van de kaart. Verder zijn ook nog het Albertkanaal, het kanaal Dessel-Kwaadmechelen en het Beverlokanal op deze kaart weergegeven (zwart) [Vlaamse Milieumaatschappij, 2017, Vlaamse Milieumaatschappij, 2018]. Op figuur 4.1 is eveneens het reliëf in het stroomgebied weergegeven, deze is in het verdere verloop nog van belang voor de helling van het

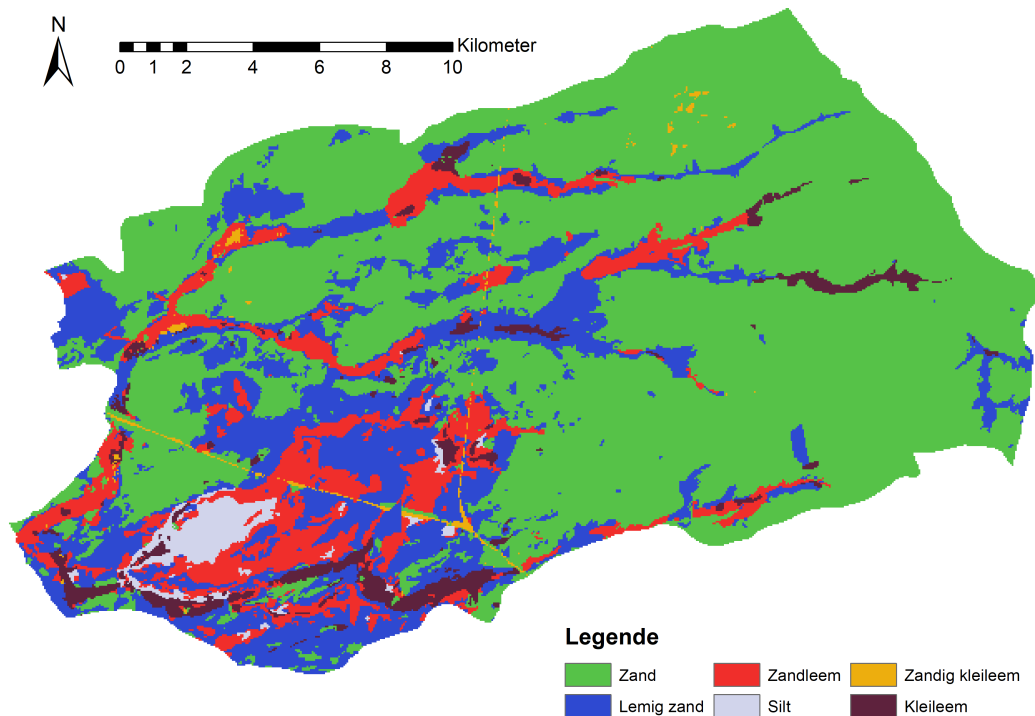
landschap te kunnen bepalen (zie sectie 4.2.2) [Agentschap Informatie Vlaanderen, 2014, Tran Quoc et al., 2015].



Figuur 4.1: Het stroomgebied van de Grote Nete, met het reliëf [m] en situering in Vlaanderen, dat in deze masterproef als studiegebied is genomen [Agentschap Informatie Vlaanderen, 2014, Vlaamse Milieumaatschappij, 2017, Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).

Later in dit hoofdstuk zal ook nog de bodem van het studiegebied van belang zijn, aangezien de ondergrond zijn invloed heeft op de hydrologie en de ervan afhankelijke parameters (zie sectie 4.2.2). De bodemkaart met een resolutie van 50 meter voor het stroomgebied van de Grote Nete staat weergegeven op Figuur 4.2 [Tran Quoc et al., 2015, VPO, 2016].

Het landgebruik in het beschouwde deel van het stroomgebied van de Grote Nete voor de huidige toestand (2010) is ook gekend vanuit het Ruimtemodel Vlaanderen dat eerder in hoofdstuk 3 besproken is geweest. Hieruit volgt dat voor dit studiegebied de oppervlakte van 'Built-up land' ongeveer 34% bedraagt. Landbouw, grasland, bos en oppervlaktewater beslaan respectievelijk ongeveer 21%, 22%, 21% en 2% van de oppervlakte van het studiegebied van de Grote Nete. De landgebruikskaart die de toestand in 2010 weergeeft kan terug gevonden worden op Figuur C.1 in Bijlage C.



Figuur 4.2: Bodemkaart voor het stroomgebied van de Grote Nete [VPO, 2016] (eigen verwerking).

Zoals reeds vermeld, is voor deze masterproef enkel het stroomopwaarts gebied van het stroomgebied van de Grote Nete gezien vanaf het meetstation Geel-Zammel beschouwd als studiegebied (zie Figuur 4.1). Voor dit meetstation zijn voornamelijk de uurlijkse en/of dagelijkse afvoerdebieten van belang. Deze debieten zullen in het verdere verloop van dit hoofdstuk gebruikt worden om de methode van de ruimtelijke disaggregatie voor het voorspellen van de verandering in parameters van het NAM-model door veranderend landgebruik te staven. Het meetstation heeft uurlijkse gegevens vanaf 22/12/1996 met significante hiaten in 2002. Voor de dagelijkse afvoerdebieten zijn er gegevens vanaf 31/12/1984 met eveneens significante hiaten in 1994, 1996 en 2002 [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018].

Omdat er voor de uurlijkse meetgegevens slechts data beschikbaar is vanaf 1996-1997, is er gekozen om voor de hydrologische modellering gebruik te maken van de dagelijkse meetgegevens om zo de methodiek van de ruimtelijke disaggregatie (zie sectie 4.2.2) over een groter tijdsvenster te kunnen staven.

4.2 Methodologie

In dit onderdeel is de methodologie voor de hydrologische modellering uiteengezet. In eerste instantie dient er een hydrologisch model te worden geselecteerd voor het

bekomen van de debietafvoeren in het stroomgebied van de Grote Nete. Voor het achterhalen van het effect van het al dan niet realiseren van de betonstop op de hydrologie dient er dan ook nog een methode te worden gebruikt waarbij landgebruik en meer bepaald veranderend landgebruik kan worden ingebracht in het hydrologisch model.

4.2.1 NAM-model

Het model dat voor deze masterproef is gekozen voor de hydrologische modellering is het NAM-model ('Nedbør-Afstrømnings-Model', ontwikkeld door 'Department of Hydrodynamics and Water Resources' aan de Technical University of Denmark (DTU)), wat een conceptueel gebiedsgemiddeld model is [DHI, 2009]. Gebiedsgemiddelde modellen hebben over het algemeen het voordeel een betere of gelijkaardige overeenkomst te geven met de meetreeksen voor een stroomgebied in vergelijking met meer complexe ruimtelijk verdeelde modellen. Ook hebben de gebiedsgemiddelde modellen het voordeel van een kleinere rekentijd en zijn eenvoudiger te kalibreren [Liu et al., 2011, Tran Quoc et al., 2015].

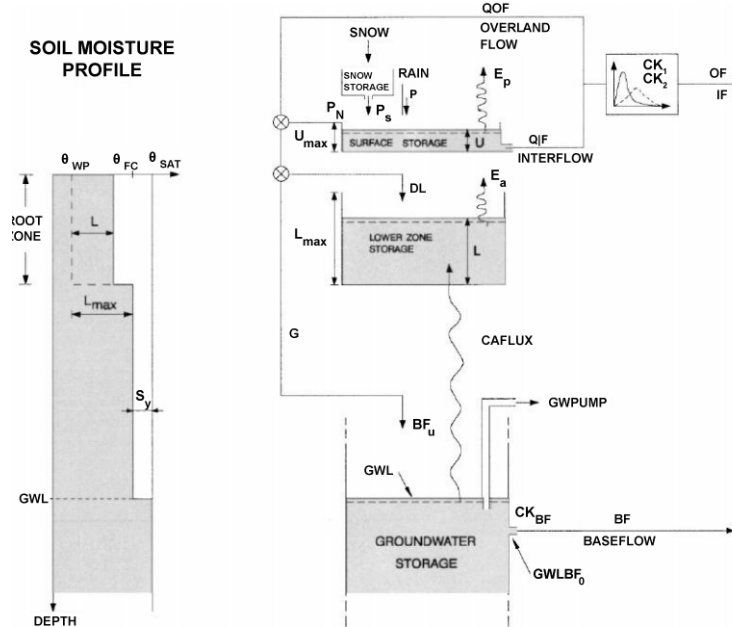
Een studie waar vijf verschillende modellen, waarvan drie gebiedsgemiddelde modellen (NAM, PDM, VHM) en twee ruimtelijk verdeelde modellen (WetSpa, MIKE SHE), met elkaar vergeleken zijn voor eveneens het stroomgebied van de Grote Nete vond dezelfde bemerkingen [Vansteenkiste et al., 2014]. Hierin is gewerkt met uurlijkse data en het uurlijks NAM-model resulteerde in een goede algemene prestatie voor hetzelfde stroomgebied van de Grote Nete.

Het conceptueel gebiedsgemiddeld NAM-model simuleert op bekkenschaal de neerslag-afvoer processen door gebruik te maken van vier verschillende met elkaar verbonden bergingsreservoirs die elk instaan voor een ander onderdeel van de hydrologie. Deze reservoirs beschrijven de opslag in de vorm van sneeuw ('snow storage', in deze masterproef niet van toepassing), de opslagcapaciteit aan de oppervlakte ('surface storage'), de opslag in de wortelzone ('lower/root zone storage') en de opslag in de diepere ondergrond of grondwateropslag ('groundwater storage'), alle over de gehele oppervlakte van het stroomgebied [DHI, 2009].

Op Figuur 4.3 staat de modelstructuur voor het NAM-model weergegeven samen met de bijhorende parameters. Deze parameters zijn, aangezien het NAM-model een gebiedsgemiddeld model is, gelijk over het hele stroomgebied waarvoor het model geldig is [DHI, 2009]. Voor de modelvergelijkingen van het NAM-model wordt verwezen naar de gebruikshandleiding van de software MIKE 11 opgesteld door DHI. Deze software laat het simuleren van neerslag-afvoer toepassingen toe, waaronder dan ook het NAM-model valt. Het NAM-model staat hierin uitvoerig beschreven [DHI, 2009].

Zoals reeds vermeld, zal er voor de hydrologische modellering in deze masterproef gebruik gemaakt worden van het dagelijks NAM-model omdat hiermee er een grotere tijdsperiode aan meetgegevens in het meetstation Geel-Zammel beschikbaar is. Het NAM-model en de modelvergelijkingen zullen hierdoor niet veranderen. Wel zullen de eenheden van de recessieconstanten veranderen van uur naar dag, alsook de een-

heden van andere input (dagelijkse neerslag en verdamping) en de output (dagelijkse afvoerdebieten).



Figuur 4.3: De structuur en parameters van het NAM-model [DHI, 2009].

4.2.2 Ruimtelijke disaggregatie

Omdat deze masterproef het effect van veranderend landgebruik met betrekking tot de betonstop tracht te begroten, spreekt het voor zich dat de ruimtelijke verdeeldheid van de modelparameters hiervoor in zekere zin vereist is. Dit is niet het geval voor het standaard NAM-model. Om dit dan wel in rekening te brengen zal gebruik gemaakt worden van ruimtelijke disaggregatie van de parameters van het NAM-model.

De methode van de ruimtelijke disaggregatie zal in dit onderdeel kort worden besproken, alsook welke parameters in aanmerking komen voor de ruimtelijke disaggregatie. Deze parameters staan beschreven in de studie omtrent de ruimtelijke disaggregatie als mogelijke werkwijze voor het omzetten van een gebiedsgemiddeld model en parameters naar een ruimtelijk verdeeld model [Tran Quoc et al., 2015]. Ook zal er in deze masterproef nog een extra parameter omgezet worden door middel van de ruimtelijke disaggregatie gebaseerd op de werkwijze uit voorgaande studie.

Methode ruimtelijke disaggregatie

De methodiek van de ruimtelijke disaggregatie van modelparameters is ontstaan met gedachte om een gebiedsgemiddeld model flexibeler te maken voor ruimtelijke variabiliteit van de modelparameters voor een bepaald stroomgebied [Tran Quoc et al., 2015]. De modelparameters van een gebiedsgemiddeld model zijn gelijk over het hele stroomgebied dat door het model beschreven wordt. Door het disaggregeren van

de modelparameters wordt dan een ruimtelijke flexibiliteit ingebracht in het gebruik van een gebiedsgemiddeld model door deze om te zetten naar een gebiedsgemiddeld model op ruimtelijk verdeelde schaal. Als er een hogere ruimtelijke resolutie van een model wordt verwacht is het gebruikelijk om de gedetailleerdheid van een model te verhogen, wat op zijn beurt kan resulteren in equifinaliteit, overparametrisatie en moeilijkheden bij het kalibreren. Door te blijven gebruik maken van gebiedsgemiddelde modellen maar aan de parameters een ruimtelijke variabiliteit te geven, worden deze problemen deels teniet gedaan. Ook heeft dit het voordeel van een betere algemene modelprestatie en accuraatheid van gebiedsgemiddelde modellen te hebben [Tran Quoc et al., 2015].

Het ruimtelijk gedisaggregeerd model is dan ook een valabele optie voor het doorrekenen van landgebruiksscenario's, wat het opzet is van deze masterproef. Het veranderend landgebruik is ingebracht door de verandering in modelparameters op de ruimtelijk verdeelde schaal aangezien het landgebruik zijn effect zal hebben op het ruimtelijk disaggregeren van de modelparameters [Tran Quoc et al., 2015].

Voor de toepassing van ruimtelijke disaggregatie wordt vertrokken van een gebiedsgemiddeld model en de gekalibreerde modelparameters. Deze parameters zijn dan in een volgende stap gedisaggregeerd op basis van eigenschappen van het stroomgebied met ruimtelijke variabiliteit, afhankelijk van de beschouwde resolutie van het grid, die verband hebben met de parameter zelf en het effect ervan op de hydrologie (topografie, landgebruik, bodem ed.). De wijze waarop het model op ruimtelijk verdeelde schaal dan gekalibreerd kan worden is onafhankelijk van de beschouwde resolutie. Het aantal modelparameters blijft constant aan die van het model op gebiedsgemiddelde schaal [Tran Quoc et al., 2015].

De ruimtelijk verdeelde modelparameters $\theta_{S,p}$ (S: 'spatially distributed' of ruimtelijk verdeeld) voor elke gridcel zijn afhankelijk van de gebiedsgemiddelde modelparameters θ_L (L: 'lumped' of gebiedsgemiddeld) en kunnen als volgt bepaald worden [Tran Quoc et al., 2015].

$$\theta_{S,p} = \theta_L + F\theta_L \left(\frac{\rho_p}{\bar{\rho}_p} - 1 \right) \quad (4.1)$$

Hierin wijst de index p op de locatie van de beschouwde gridcel, ρ_p is de fysische eigenschap die gelinkt is aan een specifieke modelparameter $\theta_{S,p}$. De wijze waarop ρ_p bepaald kan worden wordt hieronder nog verder uiteengezet. De factor F staat in voor de gevoeligheid van de modelparameter $\theta_{S,p}$ naar de fysische eigenschap ρ_p toe. Deze factor F is gelijk voor het hele stroomgebied, onafhankelijk van de beschouwde resolutie [Tran Quoc et al., 2015].

Er zijn een aantal modelparameters die in aanmerking komen voor de ruimtelijk disaggregatie. Deze kunnen dan omgezet worden naar modelparameters op ruimtelijk verdeelde schaal via onder andere ρ_p uit formule (4.1). De parameters (van het NAM-model) die kunnen gedisaggregeerd worden, afhankelijk van de fysisch gebaseerde eigenschappen van de beschouwde gridcel, zijn:

- *'Quick flow' recessieconstante*: Onder de 'quick flow' recessieconstanten vallen voor het NAM-model de parameters CKIF (recessieconstante voor interflow), CK1 en CK2 (recessieconstanten voor overland flow). De laatste twee zijn voor het NAM-model gelijk genomen aan elkaar. Deze recessieconstanten zijn dan voor de ruimtelijke disaggregatie afhankelijk van de topografie (helling S) en de Manningscoëfficiënt n . De helling kan voor het stroomgebied bepaald worden via het DHM (Digitaal Hoogte Model). De Manningscoëfficiënt is afhankelijk van het landgebruik van de beschouwde rastercel. De waarde hiervoor die aan het landgebruik gekoppeld is komt uit Table 3.2. van de WetSpa Extension Manual [Liu en De Smedt, 2004, Tran Quoc et al., 2015].

$$k_{QF} \sim n^{0.6} S^{-0.3} \quad (4.2)$$

- *'Slow flow' recessieconstante*: De 'slow flow' recessieconstante komt overeen met de recessieconstante voor baseflow CKBF van het NAM-model. De ruimtelijke disaggregatie van deze parameter is afhankelijk van de hydraulische conductiviteit van de ondergrond KH . Omdat de gevoeligheid van de 'slow flow' recessieconstante niet eenduidig lineair is, is hierbij nog een macht β aan toegevoegd gelijk aan -0,10. De waarden voor de hydraulische conductiviteit kunnen voor verschillende bodemtypes terug gevonden worden in Table 3.1. van de WetSpa Extension Manual [Liu en De Smedt, 2004, Tran Quoc et al., 2015].

$$k_{SF} \sim KH^\beta \quad (4.3)$$

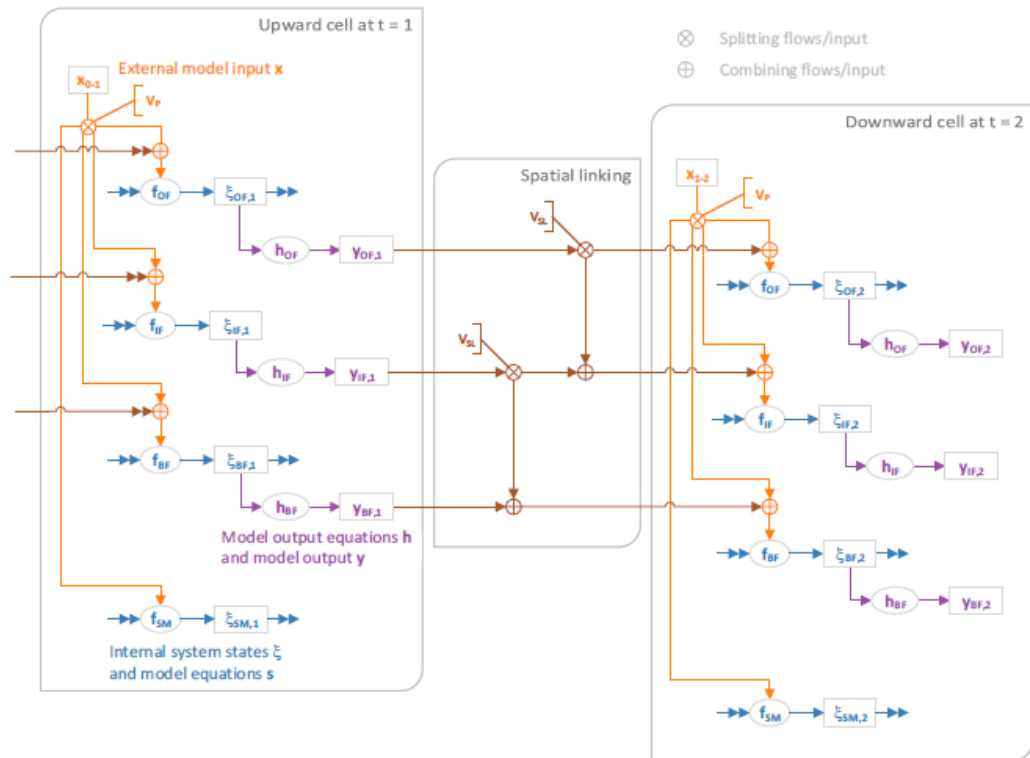
- *Opslag in de ondergrond*: Van de parameters van het NAM-model komt de opslagcapaciteit in de wortelzone L_{max} overeen met de opslag in de ondergrond. Het ruimtelijk disaggregeren is afhankelijk van het TAW ('Total Available Water') van de bodem, dat gelijk is aan het verschil tussen de veldcapaciteit ('field capacity') en de bodemvochtigheid van het verwelkingspunt ('soil moisture at wilting point'), en de worteldiepte d ('rooting depth') afhankelijk van het landgebruik. Voor het bepalen van TAW en de worteldiepte d kan verwezen worden naar respectievelijk Table 3.1. en Table 3.2. van de WetSpa extension Manual [Liu en De Smedt, 2004, Tran Quoc et al., 2015].

$$SM_{max} \sim d \times TAW \quad (4.4)$$

De bovenstaande formules (4.2), (4.3) en (4.4) geven de waarde per gridcel voor ρ_p afhankelijk van de beschouwde gebiedsgemiddelde modelparameter θ_L waarmee dan via formule (4.1) de modelparameter op ruimtelijk verdeelde schaal $\theta_{S,p}$ kan bepaald worden.

Als dan alle modelparameters op ruimtelijk verdeelde schaal zijn bepaald, rest er enkel nog het inbrengen van de input. Deze bestaat uit een externe input en een interne input. De externe input is gelijk aan die voor een gebiedsgemiddeld model (neerslag, verdamping). De interne input komt van de aangrenzende cellen

van de beschouwde gridcel. Alle cellen zijn verbonden in een gridstructuur ('spatial linking'), rekening houdend met de topografie van het beschouwde stroomgebied. Deze structuur staat weergegeven op Figuur 4.4 [Tran Quoc et al., 2015]. Hierin zijn een stroomopwaartse en stroomafwaartse gridcel weergegeven met de 'spatial linking'. Output van de stroomopwaartse gridcel vormt de input voor de stroomafwaartse cel, waarbij de neerslagafvoer is onderverdeeld in drie gescheiden stromen (overland flow, interflow, baseflow) en de gedeeltelijke indringing van deze in dieper gelegen lagen bij afstroming naar een stroomafwaarts gelegen gridcel [Tran Quoc et al., 2015].



Figuur 4.4: Gridstructuur tussen aangrenzende cellen voor de ruimtelijke disaggregatie [Tran Quoc et al., 2015].

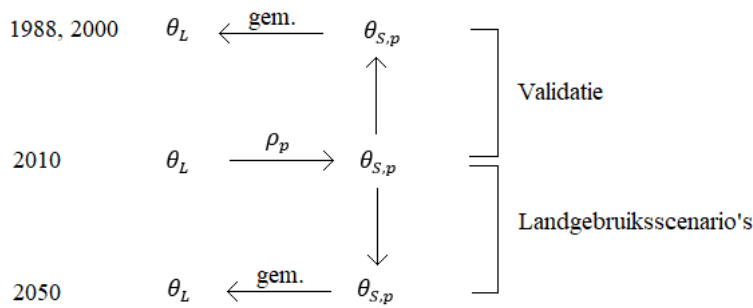
Het koppelen van al deze gridcellen en hiermee dan voor een bepaalde tijdsreeks het hele model laten doorrekenen zal in deze masterproef niet uitgevoerd worden. De methode van de ruimtelijke disaggregatie zal slechts gedeeltelijk worden uitgevoerd, en dit om rekentijd door landgebruiksscenario's met een relatief hoge resolutie te minimaliseren. In de studie omtrent de ruimtelijke disaggregatie is een rekentijd vermeld geweest dat de rekentijd voor één jaar simulatie ongeveer 5 minuten bedraagt voor uurlijkse data en een resolutie van 250 meter [Tran Quoc et al., 2015]. In dit geval zal er gewerkt worden met een resolutie van 50 meter (resolutie bodemkaart), dagelijkse data, lagere specificaties wat betreft het rekenvermogen en dient er een dagelijks hydrologisch model voor de huidige toestand gekalibreerd te worden. Voor de huidige toestand en de zes landgebruiksscenario's (per decennia) zal er gerekend

worden met tien simulatiejaren. Voor het landgebruik in het verleden zal dit ongeveer vijf simulatiejaren zijn.

Wel zal er voor de ruimtelijke disaggregatie gebruik gemaakt worden van de formule (4.1) om per gridcel een modelparameter te bekomen op ruimtelijk verdeelde schaal.

Toepassing ruimtelijke disaggregatie

In deze masterthesis zal de methode van de ruimtelijke disaggregatie toegepast worden maar, zoals eerder gesteld, slecht voor een gedeelte. De modelparameters op ruimtelijk verdeelde schaal $\theta_{S,p}$ kunnen bepaald worden voor elk landgebruiksscenario of landgebruikskaart in het verleden op basis van formule (4.1) en de hierboven beschreven methode voor het achterhalen van de fysisch gebaseerde eigenschappen ρ_p voor elke rastercel. Met deze ruimtelijk verdeelde modelparameters kan dan gemakkelijk opnieuw een gebiedsgemiddelde modelparameter voor het stroomgebied bekomen worden door eenvoudigweg het gemiddelde te nemen van alle modelparameters op ruimtelijk verdeelde schaal. Zo kan er dan terug voor elk landgebruiksscenario gerekend worden met het gebiedsgemiddeld NAM-model in de plaats van ruimtelijk verdeeld. Deze werkwijze staat schematisch weergegeven op Figuur 4.5.



Figuur 4.5: De methode van de ruimtelijke disaggregatie zoals toegepast in deze masterproef voor het achterhalen van het effect van veranderend landgebruik op de hydrologie.

Voor de modelparameters op ruimtelijk verdeelde schaal te kunnen bepalen zijn de gebiedsgemiddelde parameters verondersteld gekend en gekalibreerd te zijn. Er is een gekalibreerd uurlijks NAM-model voor het stroomgebied van de Grote Nete voorhanden voor de periode 31/08/2003 tot 31/12/2008, komende van de studie over de ruimtelijke disaggregatie [Tran Quoc et al., 2015]. Dit model en de bijhorende parameters kan niet direct gebruikt worden in deze masterproef aangezien er hier gekozen is om te werken met dagelijkse gegevens (zie sectie 4.1) en het model zou gekalibreerd moeten zijn voor de periode rondom 2010 (startpunt landgebruiksscenario's). Het kan wel gebruikt worden als basis om een nieuw NAM-model te kalibreren voor de periode rondom 2010, rekening houdend met het verschil in eenheden voor de recessieconstanten.

De kalibratie van het dagelijks NAM-model voor de periode 2010 met de bijhorende gebiedsgemiddelde parameters die gedissaggregeerd kunnen worden zijn besproken in sectie 4.3.1. De validatie van het model staat in sectie 4.3.2.

Verder is ook nog de factor F nodig voor het bepalen van de modelparameters op ruimtelijk verdeelde schaal. Deze is gelijk genomen aan 1 voor alle parameters behalve deze behorende tot de opslag in de ondergrond (SM_{max}) die gelijk is aan 0,4 zoals bekomen voor het stroomgebied van de Grote Nete in de studie omtrent de ruimtelijke disaggregatie [Tran Quoc et al., 2015].

Ten slotte rest dan enkel nog het bepalen van de fysisch gebaseerde eigenschap ρ_p voor elke rastercel. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de formules (4.2), (4.3) en (4.4). De parameters van het NAM-model die hiermee dan gedissaggregeerd kunnen worden zijn CKIF, CK1, CK2, CKBF en L_{max} . De parameter CKBF zal verder niet meer beschouwd worden aangezien deze constant blijft omdat de bodem niet verandert met veranderend landgebruik in dit geval.

Voor deze masterproef is er nog een extra parameter van het NAM-model beschouwd voor de ruimtelijke disaggregatie, namelijk de oppervlakteafstromingscoëfficiënt CQOF. De fysisch gebaseerde eigenschap ρ_p van een gridcel voor de oppervlakteafstroming wordt hier verder C genoemd (gelijkaardig aan de hierboven besproken k_{QF} , k_{SF} en SM_{max}). De ruimtelijke disaggregatie van de oppervlakteafstromingscoëfficiënt C is verondersteld afhankelijk te zijn van de topografie (helling S), het landgebruik en de bodem. Voor landgebruik dat niet behoort tot urbaan gebied (de klasse 'Built-up land') staan de waardes voor C weergegeven in Tabel 4.1. Voor de klasse 'Built-up land' is de waarde van de oppervlakteafstromingscoëfficiënt C_u bepaald via onderstaande formule [Liu en De Smedt, 2004].

$$C_u = IMP + (1 - IMP) C_{grasland} \quad (4.5)$$

Hierin is $C_{grasland}$ te bepalen via Tabel 4.1. De factor IMP is het aandeel verharding binnen de oppervlakte van de klasse 'Built-up land'. Voor de toestand in 2010 is deze gelijk aan 0,441. Deze is afhankelijk van het beschouwde landgebruik- en verhardingsscenario (zie hoofdstuk 3).

De oppervlakteafstromingscoëfficiënt voor elke rastercel van het stroomgebied van de Grote Nete staat weergegeven op Figuur 4.6. Hierop is duidelijk de hogere oppervlakteafstroming te zien voor verstedelijkt gebied ('Built-up land', zie ook Figuur C.1 in Bijlage C).

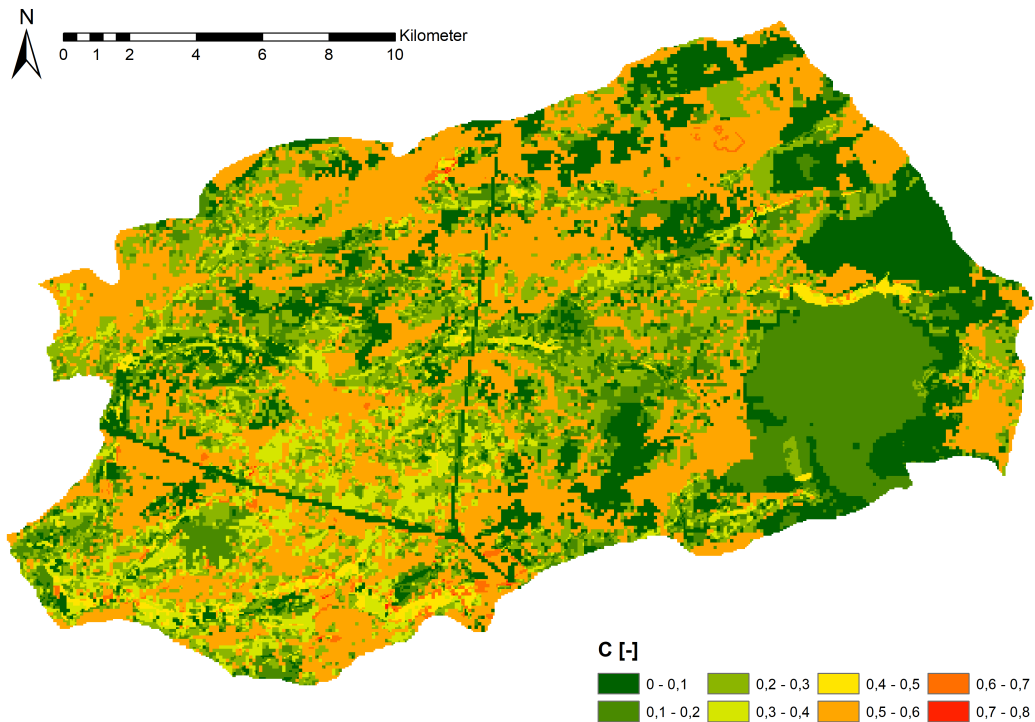
Tabel 4.1: Waardes voor de oppervlakteafstromingscoëfficiënt C afhankelijk van het landgebruik, de helling en de bodem [Liu en De Smedt, 2004].

Landgebruik	Helling [%]	Bodem					
		Zand	Lemig zand	Zand-leem	Silt	Zandig klei-leem	Klei-leem
Landbouw	<0,5	0,23	0,27	0,3	0,37	0,43	0,5
	0,5-5	0,27	0,31	0,34	0,41	0,47	0,54
	5-10	0,33	0,37	0,4	0,47	0,53	0,6
	>10	0,45	0,49	0,52	0,59	0,65	0,72
Grasland	<0,5	0,13	0,17	0,2	0,27	0,33	0,4
	0,5-5	0,17	0,21	0,24	0,31	0,37	0,44
	5-10	0,23	0,27	0,3	0,37	0,43	0,5
	>10	0,35	0,39	0,42	0,49	0,55	0,62
Bos	<0,5	0,03	0,07	0,1	0,17	0,23	0,3
	0,5-5	0,07	0,11	0,14	0,21	0,27	0,34
	5-10	0,13	0,17	0,2	0,27	0,33	0,4
	>10	0,25	0,29	0,32	0,39	0,45	0,52

4.3 Resultaten

Met de methodologie, zoals hierboven uiteengezet (zie sectie 4.2), kan dan de hydrologische modellering worden uitgevoerd. Eerst dient er een nieuw dagelijks NAM-model voor het stroomgebied van de Grote Nete bekomen te worden. Dit NAM-model zal gekalibreerd en gevalideerd worden. Met dit gekalibreerd en gevalideerd NAM-model kunnen dan de verschillende landgebruiksscenario's doorgerekend worden, waar dat dan eerst de methode van de ruimtelijke disaggregatie voor het voorspellen van het effect van veranderend landgebruik op de hydrologische parameters wordt gestaafd met metingen uit het verleden. Tot slot worden de bevindingen nog kort samengevat.

De kalibratie en validatie gebeuren voor de periode rondom 2010. De kalibratieperiode loopt van 22/05/2004 tot 10/01/2010, de validatieperiode loopt van 10/01/2010 tot 15/09/2014. Voor zowel de kalibratie als de validatie wordt de eerste maand als 'opwarmingsperiode' voor het model genomen. De methode van de ruimtelijke disaggregatie zal gestaafd worden via het landgebruik in 1988 en 2000 [Poelmans, 2010] en de debietmeetgegevens van het meetstation Geel-Zammel van respectievelijk 01/01/1986 tot 31/12/1990 en 01/01/1997 tot 31/12/2001. Deze tijdsvensters zijn zo gekozen om het beschouwde jaartal symmetrisch te omgrenzen waar mogelijk (rekening houdend met hiaten in de data) [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018].



Figuur 4.6: De oppervlakteafstromingscoëfficiënt C (zoals bepaald via Tabel 4.1 en formule (4.5)) van elke rastercel (50 meter resolutie) voor het stroomgebied van de Grote Nete.

4.3.1 Kalibratie

Alvorens de kalibratie te kunnen uitvoeren dienen eerst de modelparameters te worden bepaald voor het nieuwe dagelijkse NAM-model voor het stroomgebied van de Grote Nete. Zoals eerder gesteld (zie sectie 4.2.2), is er een gekalibreerd uurlijks NAM-model beschikbaar voor de periode rondom 2005. Dit model kan voor het bekomen van een nieuw model enkel indirect gebruikt worden aangezien de uurlijkse modelparameters in zekere zin in de buurt zullen liggen van de nieuwe dagelijkse modelparameters rekening houdend met het verschil in eenheden. De uurlijkse modelparameters (2005) staan weergegeven in Tabel 4.2 [Tran Quoc et al., 2015].

De dagelijkse modelparameters (2010) zijn bekomen vertrekkende van de uurlijkse modelparameters (2005). Deze modelparameters staan weergegeven in Tabel 4.2 en zijn bekomen na het kalibreren van de output (afvoerdebieten aan stroomafwaarts van het beschouwde stroomgebied) van het desbetreffende NAM-model op de debietgegevens van het meetstation Geel-Zammel [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018]. De kalibratie van het dagelijks NAM-model is hieronder nog in meer detail uiteengezet.

De wijze waarop de kalibratie gebeurt, is iteratief. De modelparameters worden zo aangepast om tot een bevredigend resultaat te komen. Hierbij kan de prestatie

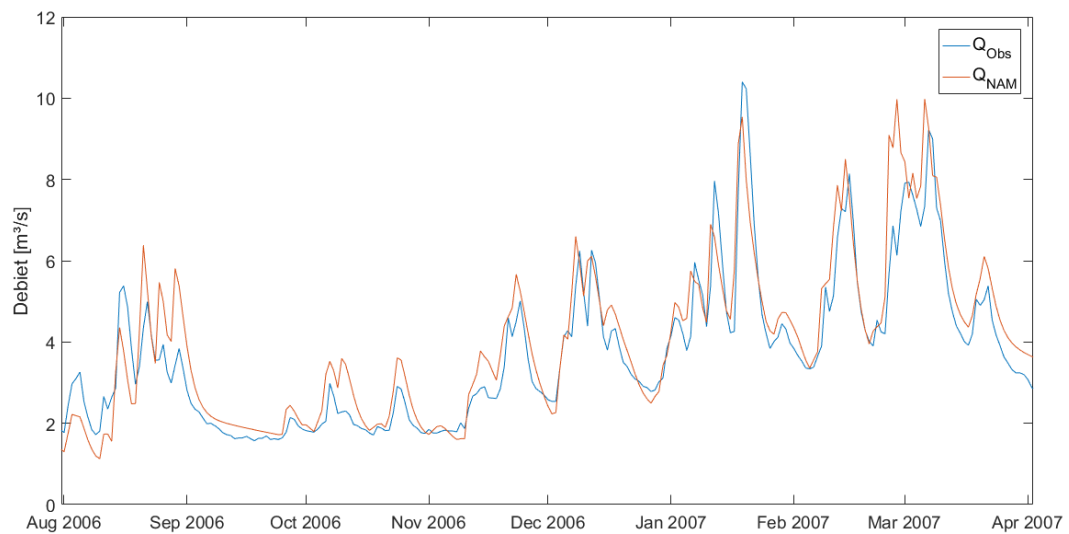
Tabel 4.2: De parameters hun omschrijving voor het stroomgebied van de Grote Nete voor het uurlijks NAM-model (2005) en het nieuwe dagelijkse NAM-model (2010) [Tran Quoc et al., 2015].

Parameter	Omschrijving	Uurlijks model (2005)	Dagelijks model (2010)
U_{max}	Maximale opslagcapaciteit oppervlakte	3,4 mm	3,4 mm
L_{max}	Maximale opslagcapaciteit wortelzone	225 mm	225 mm
CQOF	Oppervlakteafstromingscoëfficiënt	0,15	0,2
CKIF	Recessieconstante interflow	120 h	7 d
CK1	Recessieconstante overland flow	20 h	1,6 d
CK2	Recessieconstante overland flow	20 h	1,6 d
TOF	Drempelwaarde overland flow	0,12	0,12
TIF	Drempelwaarde interflow voor wortelzone	0,26	0,26
TG	Drempelwaarde grondwateraanvulling voor wortelzone	0,3	0,3
CKBF	Recessieconstante baseflow	2100 h	90 d
A	Oppervlakte stroomgebied	385 km ²	385 km ²

van het model op verschillende manieren beoordeeld worden, zoals voorgesteld door Willems [Willems, 2009]. In deze masterproef zal er een deel visuele evaluatie gebeuren, namelijk de overeenkomst tussen de geobserveerde debieten en de debieten gesimuleerd via het NAM-model (met de modelparameters vanuit Tabel 4.2) door de afzonderlijke pieken ('hydrographs') te beschouwen. Ook zal de overeenkomst tussen de extreme waarden verdeling van de observaties en de simulatie met het NAM-model geëvalueerd worden. Verder is er nog een kwantitatieve evaluatie gebeurd door de waarde van de NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency) te beschouwen en het verschil in de waterbalans of cumulatieve volumes (ook visueel) [Willems, 2009, Tran Quoc et al., 2015].

Op Figuur 4.7 staat een tijdsreeks weergegeven van de periode rondom de winter van 2006 met de gesimuleerde debieten vanuit het NAM-model en de geobserveerde debieten voor het stroomgebied van de Grote Nete. Hierop kan gezien worden dat de gesimuleerde debieten (Q_{NAM}) het verloop van de geobserveerde debieten (Q_{Obs}) min of meer correct beschrijven. Ook de vorm van de pieken ('hydrographs') is gelijkaardig, dewelke bepaald wordt door de waarde van de recessieconstanten.

Door de extreme waarden verdeling van de geobserveerde debieten en de gesimuleerde debieten onderling te vergelijken kan worden achterhaald in welke mate het NAM-model de extreme waarden benaderd, welke belangrijk zijn voor het maken van voorspellingen voor overstromingen en gerelateerde beslissingen. De extreme waarden verdelingen staan weergegeven op Figuur 4.8. Hierop is te zien dat de ex-



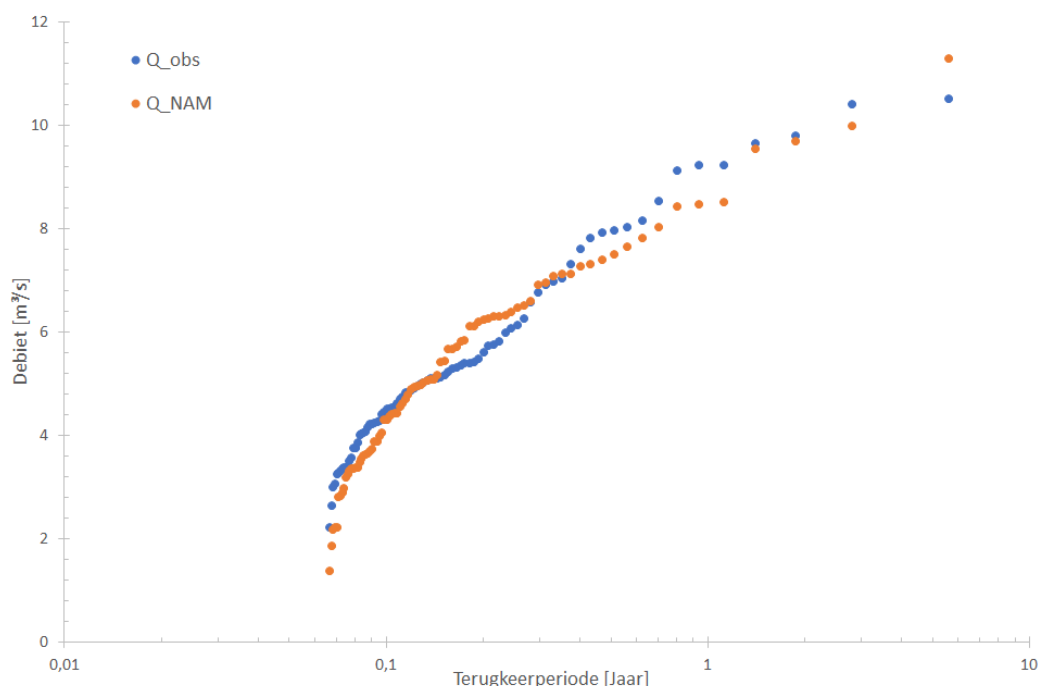
Figuur 4.7: Geobserveerde en gesimuleerde debieten (NAM-model) voor de periode van augustus 2006 tot april 2007 [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).

treme waarden verdeling van de geobserveerde en gesimuleerde debieten een relatief goede overeenkomst hebben. Het NAM-model resulteert voor sommige piekafvoeren in een onderschatting of overschatting maar over de globale lijn is de verdeling bij benadering correct.

De gesimuleerde debieten komende van het nieuwe dagelijkse NAM-model kunnen ook kwantitatief geëvalueerd worden door de NSE-waarde te bepalen. Dit dimensieloos getal heeft een waarde tussen 0 en 1, en geeft een indicatie van hoe goed het model de geobserveerde debieten benaderd waarbij een NSE-waarde van 1 staat voor een perfecte fit of benadering [Willems, 2009]. Voor de kalibratieperiode is een NSE-waarde van 0,66 bekomen, wat wijst op een relatief goede fit van het NAM-model op de geobserveerde debieten.

Ten slotte zijn de cumulatieve volumes nog beschouwd worden en het verschil in de waterbalans. De cumulatieve volumes staan weergegeven op Figuur 4.9. Hierop is te zien dat voor de hele kalibratieperiode de gesimuleerde debieten vanuit het NAM-model op de periode rondom 2006-2007 (onderschatting) na bijna volledig overeenkomen met de geobserveerde debieten. Het verschil op het einde van de kalibratieperiode tussen het cumulatief debiet bedraagt slechts $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit wijst op een goede waterbalans en fit van het NAM-model in vergelijking met de geobserveerde debieten.

Het nieuwe dagelijkse NAM-model dat voor de periode van 2010 is opgesteld geweest (voor de modelparameters, zie Tabel 4.2), is voldoende gekalibreerd. Met deze gekalibreerde modelparameters kan het nieuwe dagelijkse NAM-model in een volgende



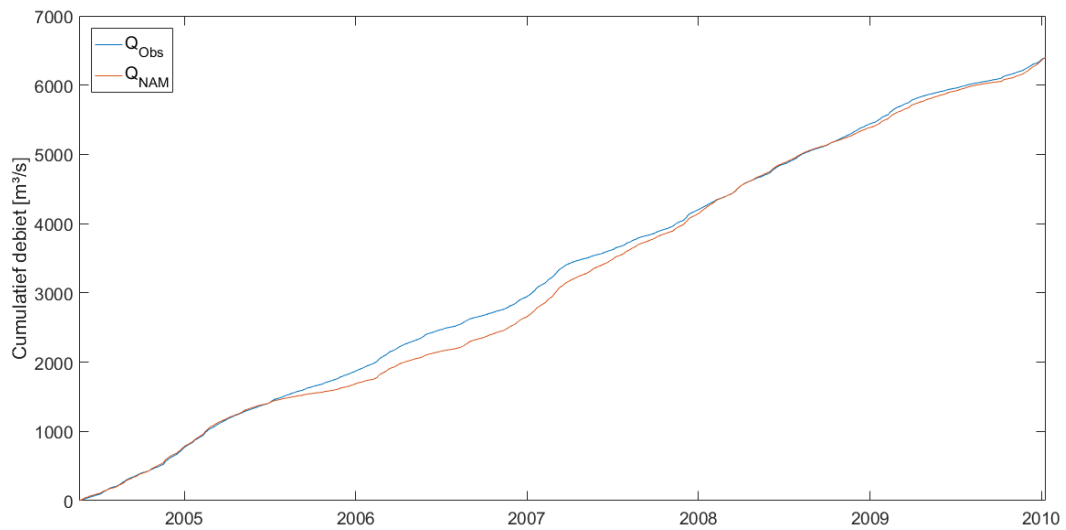
Figuur 4.8: De extreme waarden verdeling van de geobserveerde debieten (Q_{obs}) en de via het NAM-model gesimuleerde debieten (Q_{NAM}) voor de kalibratieperiode [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).

stap gevalideerd worden.

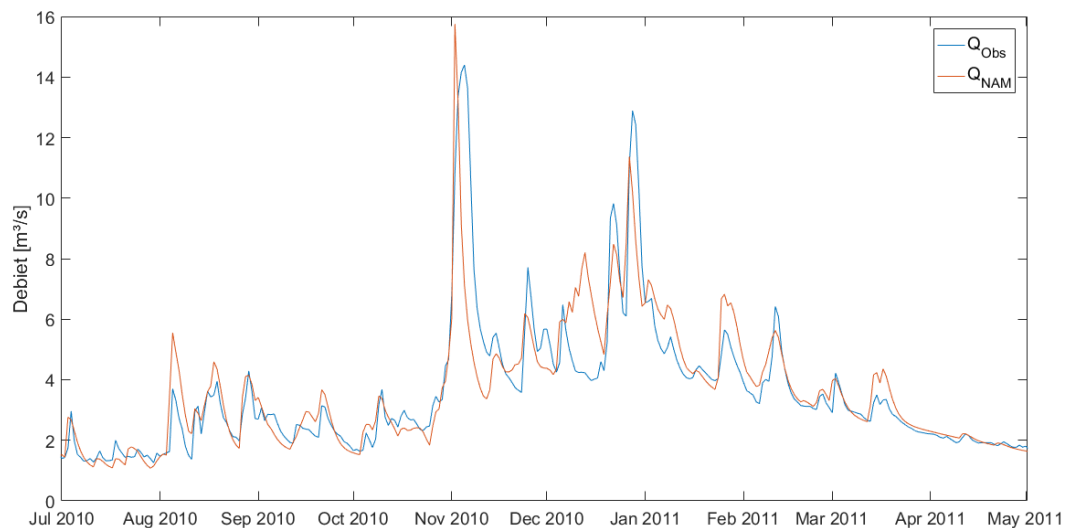
4.3.2 Validatie

Na de kalibratie volgt de validatie van het nieuwe dagelijkse NAM-model voor het stroomgebied van de Grote Nete (voor de modelparameters, zie Tabel 4.2). De wijze waarop het model gevalideerd zal worden, is gelijkaardig aan de wijze waarop dat deze gekalibreerd is, met het verschil dat de validatie louter als controle dient en enkel kleine aanpassingen nog zullen gebeuren. Het iteratief proces vindt plaats bij de kalibratie. Dezelfde aspecten (overeenkomst debieten, extreme waarden verdeling, NSE en cumulatieve volumes) als voor de kalibratie zullen ook voor de validatie beschouwd worden.

Op Figuur 4.10 staat de tijdreeks voor de validatieperiode weergegeven rondom de periode van de winter van 2010 met zowel de geobserveerde debieten als de gesimuleerde debieten via het NAM-model voor het stroomgebied van de Grote Nete. De gesimuleerde debieten (Q_{NAM}) benaderen de geobserveerde debieten (Q_{Obs}) iets minder correct dan dat het geval was voor de validatieperiode, maar de resultaten zijn nog acceptabel.

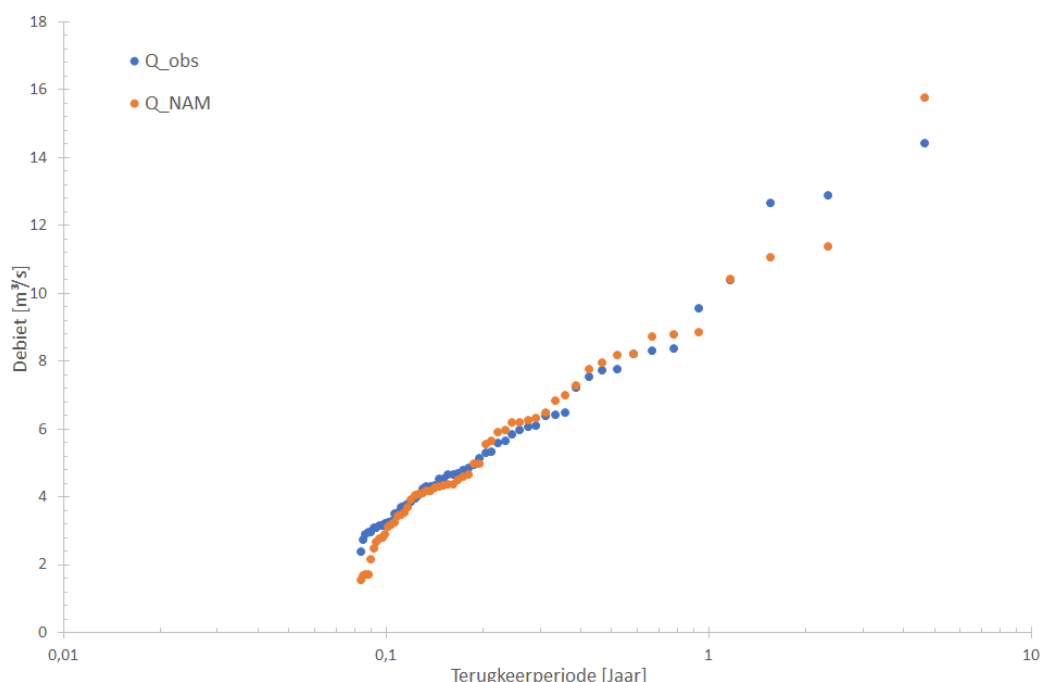


Figuur 4.9: De cumulatieve volumes van de geobserveerde debieten en de gesimuleerde debieten (NAM-model) voor de hele kalibratieperiode [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).



Figuur 4.10: Geobserveerde en gesimuleerde debieten (NAM-model) voor de periode van juli 2010 tot mei 2011 [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).

Verder kan nog de extreme waarden verdeling beschouwd worden. De extreme waarden verdeling voor de validatieperiode staat weergegeven op Figuur 4.11. De overeenkomst tussen de extreme waarden verdeling van de via het NAM-model gesimuleerde debieten en de geobserveerde debieten is groter voor de validatieperiode dan deze voor de kalibratieperiode. Enkel voor de hogere piekafvoeren is er een onderschatting door het model, maar voor het overgrote deel van de piekafvoeren zijn de gesimuleerde piekafvoeren nagenoeg identiek aan de geobserveerde piekafvoeren.

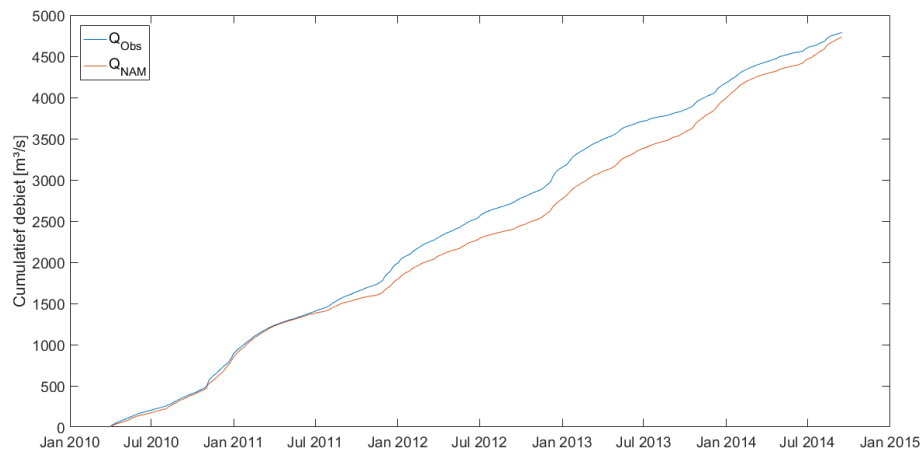


Figuur 4.11: De extreme waarden verdeling van de geobserveerde debieten (Q_{obs}) en de via het NAM-model gesimuleerde debieten (Q_{NAM}) voor de validatieperiode [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).

Als de gesimuleerde debieten vanuit het dagelijkse NAM-model dan nog kwantitatief geëvalueerd worden door de NSE-waarde te bepalen, dan is eveneens een NSE-waarde van 0,66 gekomen. Deze NSE-waarde wijst net zoals voor de kalibratieperiode op een goede fit van het gekalibreerde NAM-model op de geobserveerde debieten.

Ten slotte kunnen dan ook nog de cumulatieve debieten en het verschil in de waterbalans op het einde van de beschouwde periode geëvalueerd worden. De cumulatieve volumes staan weergegeven op Figuur 4.12. De cumulatieve volumes zijn in het begin van de validatieperiode nagenoeg identiek, maar vanaf de winterperiode in 2011 treedt er een onderschatting van het NAM-model op die loopt tot het einde van de validatieperiode. Op het einde van de validatieperiode bedraagt het verschil in de waterbalans $56 \text{ m}^3/\text{s}$.

Het dagelijkse NAM-model voor de periode van 2010, waarvan de modelparameters terug te vinden zijn in Tabel 4.2, is hierbij voldoende gekalibreerd en gevalideerd. Met dit model kan dan het onderdeel van de hydrologische modellering, dat handelt over de landgebruiksveranderingen, aangevat worden. Het is dit NAM-model met de bijhorende parameters dat onderworpen zal worden aan de methode van de ruimtelijk disaggregatie (zoals besproken in sectie 4.2.2) in het volgend onderdeel.



Figuur 4.12: De cumulatieve volumes van de geobserveerde debieten en de gesimuleerde debieten (NAM-model) voor de hele validatieperiode [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).

4.3.3 Landgebruiksveranderingen

In dit onderdeel is het effect van veranderend landgebruik achterhaald op de hydrologie. Hiervoor is de methode van de ruimtelijke disaggregatie toegepast op het gekalibreerde (en gevalideerde) dagelijkse NAM-model met de bijhorende parameters voor het stroomgebied van de Grote Nete (zie sectie 4.3.1 en Tabel 4.2). De werkwijze hiervoor staat schematische weergegeven op Figuur 4.5.

De methode van de ruimtelijke disaggregatie voor het inschatten van het effect van veranderend landgebruik op de hydrologie dient eerst nog gevalideerd te worden met behulp van het landgebruik en de debietmeetgegevens voor het stroomgebied van de Grote Nete in het verleden [Poelmans, 2010, Vlaamse Milieumaatschappij, 2018]. Hierna kunnen de landgebruiksscenario's onderworpen worden aan de ruimtelijk disaggregatie om zo het effect ervan op de hydrologie te achterhalen.

Validatie methode ruimtelijke disaggregatie

De methode van de ruimtelijke disaggregatie voor het inschatten van het effect van veranderend landgebruik op de hydrologie dient eerst te worden gevalideerd. De ruimtelijke disaggregatie zal gebruikt worden om tot een verandering in de parameters van het NAM-model te komen gebaseerd op de verandering in het landgebruik. Deze verandering in modelparameters zal zich dan vertalen naar een verandering van modelafvoerdebieten. De validatie van deze werkwijze gebeurt aan de hand van gegevens uit het verleden (landgebruik, dagelijkse afvoerdebieten).

De validatie van de methode van de ruimtelijke disaggregatie gebeurt op basis van het landgebruik in 1988 en 2000 [Poelmans, 2010]. Dit zijn de periodes waarvoor

er ook dagelijkse meetgegevens beschikbaar zijn voor het meetstation Geel-Zammel van het beschouwde stroomgebied van de Grote Nete (01/01/1986 tot 31/12/1990 en 01/01/1997 tot 31/12/2001) [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018]. Ook zal het landgebruik in het jaartal 1976 nog beschouwd worden, ook al zijn er voor deze periode geen meetgegevens voor de debieten beschikbaar. Het landgebruik voor de jaartallen 1976, 1988 en 2000 staat weergegeven op Figuur C.8, Figuur C.9 en Figuur C.10 in Bijlage C.

Met het landgebruik in het verleden zijn dan via de ruimtelijke disaggregatie nieuwe gebiedsgemiddelde modelparameters bekomen. Deze zijn terug te vinden in Tabel 4.3. Hierop is te zien dat de recessieconstanten van het NAM-model in het verleden hoger liggen dan deze voor 2010, wat logisch is gezien een kleinere oppervlakte aan verharding (komende van de oppervlakte van het bebouwd gebied). De kleinere oppervlakte aan verharding is ook zichtbaar in de parameter CQOF die daalt. Al deze veranderingen zijn niet enkel te verklaren door een verschil in verhard oppervlak, ook andere omschakelingen in landgebruik hebben hun invloed. Voor het veranderend landgebruik wordt verwezen naar de Figuren C.8 tot en met C.10 in Bijlage C.

Tabel 4.3: De parameters voor het NAM-model van het stroomgebied van de Grote Nete in het verleden na toepassen van de ruimtelijke disaggregatie op de modelparameters van 2010.

Parameter	Model			
	2010	2000	1988	1976
U_{max} [mm]	3,4	3,4	3,4	3,4
L_{max} [mm]	225	234,26	234,22	233,68
CQOF [-]	0,2	0,155	0,158	0,152
CKIF [d]	7	8,22	8,34	8,32
CK1 [d]	1,6	1,88	1,91	1,90
CK2 [d]	1,6	1,88	1,91	1,90
TOF [-]	0,12	0,12	0,12	0,12
TIF [-]	0,26	0,26	0,26	0,26
TG [-]	0,3	0,3	0,3	0,3
CKBF [d]	90	90	90	90
A [km ²]	385	385	385	385

Uit Tabel 4.3 valt ook het grote verschil op tussen de modelparameters van 2010 en 2000. Dit valt te verklaren door het grote verschil in landgebruik voor het stroomgebied van de Grote Nete tussen beide jaartallen door het feit dat er gewerkt is met 2 verschillende landgebruikskarten en bijhorende definities ook al zijn de klassen dezelfde. Het voornaamste verschil zit in de klasse 'Built-up land' (zie ook sectie 3.1.2), dat meer dan gehalveerd wordt in 2000 ten opzichte van 2010 ten voordele van de oppervlakte van de andere klassen. Een daling in zowel 'Built-up land' als landbouw (-53% en -44%) gecombineerd met een stijging in grasland en bos (77%

en 48%) resulteren in een grote daling in de oppervlakteafstromingscoëfficiënt en een grote stijging voor de recessieconstanten (hogere Manning's coëfficiënt, zie sectie 4.2.2). Beide zullen resulteren in een daling van de via het NAM-model gesimuleerde piekafvoerdebieten in het verleden ten opzichte van deze bekomen via de modelparameters voor 2010, wat verder in dit onderdeel ook zal blijken.

Het verschil verder naar het verleden toe is kleiner. Voor de overgang van 2000 naar 1988 is een te verwachten stijging in de recessieconstanten op te merken. Dit is veroorzaakt door de daling (-26%) in de oppervlakte van 'Built-up land' die dan wel deels afgezwakt wordt door een daling in de oppervlakte van bos (-15%). De oppervlakte aan landbouw neemt sterk toe (85%), wat over het algemeen een hogere Manning's coëfficiënt heeft (0,35). De stijging in recessieconstanten is ook zichtbaar in de gemiddelde waarde voor de Manning's coëfficiënt voor het stroomgebied van de Grote Nete aangezien deze bepalend is voor de ruimtelijke disaggregatie (zie sectie 4.2.2). Voor 2000 is deze gelijk aan 0,340 en voor 1988 is deze 0,343. De oppervlakteafstromingscoëfficiënt is stijgt in dit geval door de grote toename in landbouw dat een relatief hoge oppervlakteafstromingscoëfficiënt heeft.

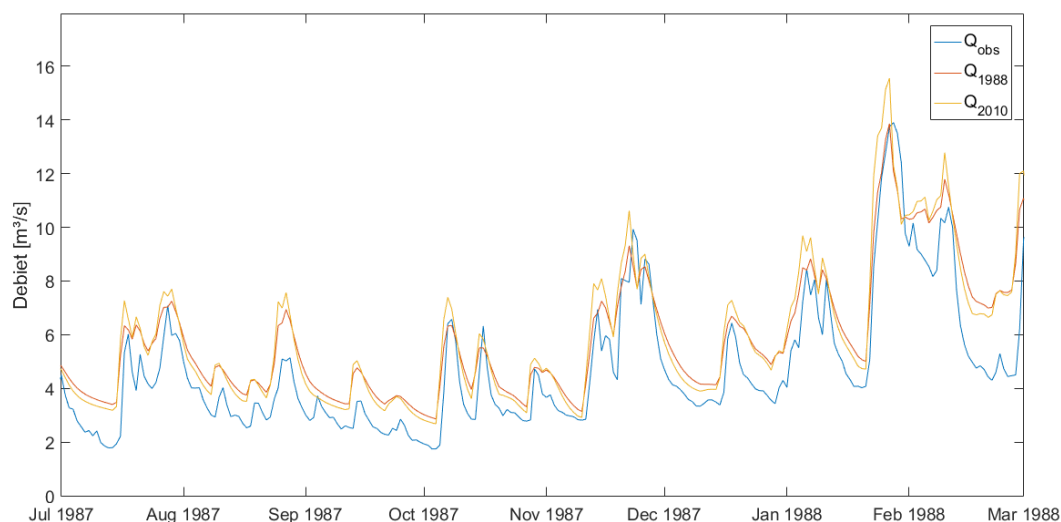
Voor de overgang van 1988 naar 1976 is er terug een lichte daling voor de recessieconstanten omwille van een daling (-21%) in de oppervlakte aan bos (hogere Manning's coëfficiënt) dat een daling (-28%) in de oppervlakte aan 'Built-up land' compenseert omwille van het grote verschil in de Mannings coëfficiënt (0,55 ten opzichte van 0,05) en de omzetting van de oppervlakte aan bos naar grasland (Mannings coëfficiënt 0,30) en landbouw (Mannings coëfficiënt 0,35), die beide stijgen qua oppervlakte. De daling in de recessieconstanten valt ook te verklaren door eveneens de gemiddelde waarde van de Manning's coëfficiënt voor het stroomgebied van de Grote Nete te beschouwen. In 1988 bedraagt deze 0,343 terwijl in 1976 deze gelijk is aan 0,338. De oppervlakteafstromingscoëfficiënt daalt in 1976 ten opzichte van 1988 omwille van de daling van 'Built-up land' (-28%) en een stijging in de oppervlakte van grasland (17%).

Ondanks het verschil in de modelparameters tussen 2010 en 2000, worden de via ruimtelijke disaggregatie aangepaste parameters toch verder nog gebruikt om de methodologie voor het achterhalen van het effect van veranderend landgebruik op de hydrologie te kunnen staven.

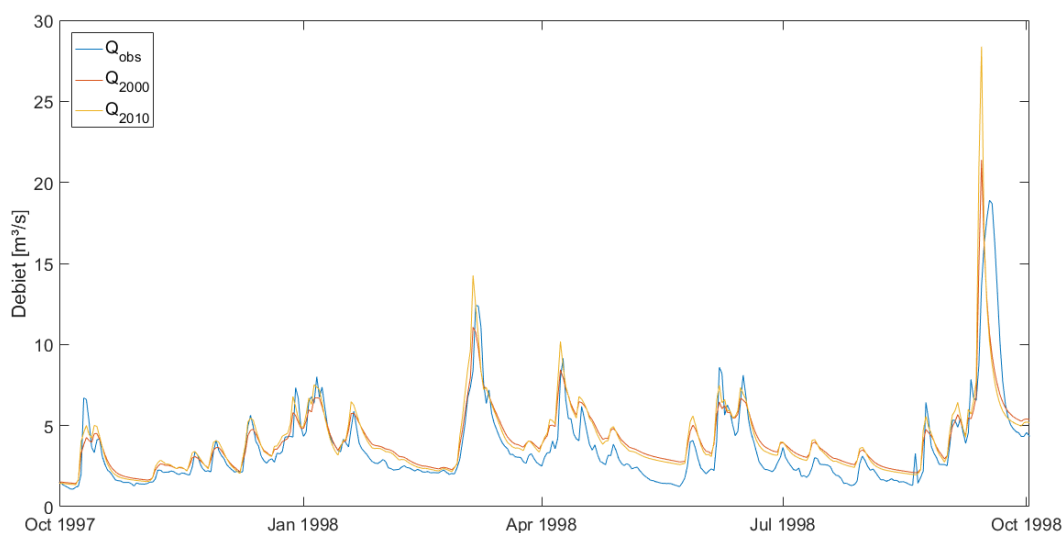
Met de aangepaste parameters voor 1988 en 2000 voor het NAM-model kunnen de gesimuleerde debieten geëvalueerd worden op basis van de waargenomen debieten voor de periodes rondom 1988 en 2000. Deze evaluatie gebeurt gelijkaardig zoals voor de kalibratie en validatie van het NAM-model (zie sectie 4.3.1 en 4.3.2).

In eerste instantie kan de vorm van de rivierafvoerdebieten zoals bekomen via het NAM-model vergeleken worden met de debietmeetgegevens. Dit is te zien op Figuur 4.13 voor 1988 en Figuur 4.14 voor 2000. Op beide figuren is een relatief goede overeenkomst te zien.

Naast de rivierafvoeren op zich te beschouwen kan ook de extreme waarden verdeling beschouwd worden dat een inschatting geeft over hoe correct het model de piekaf-



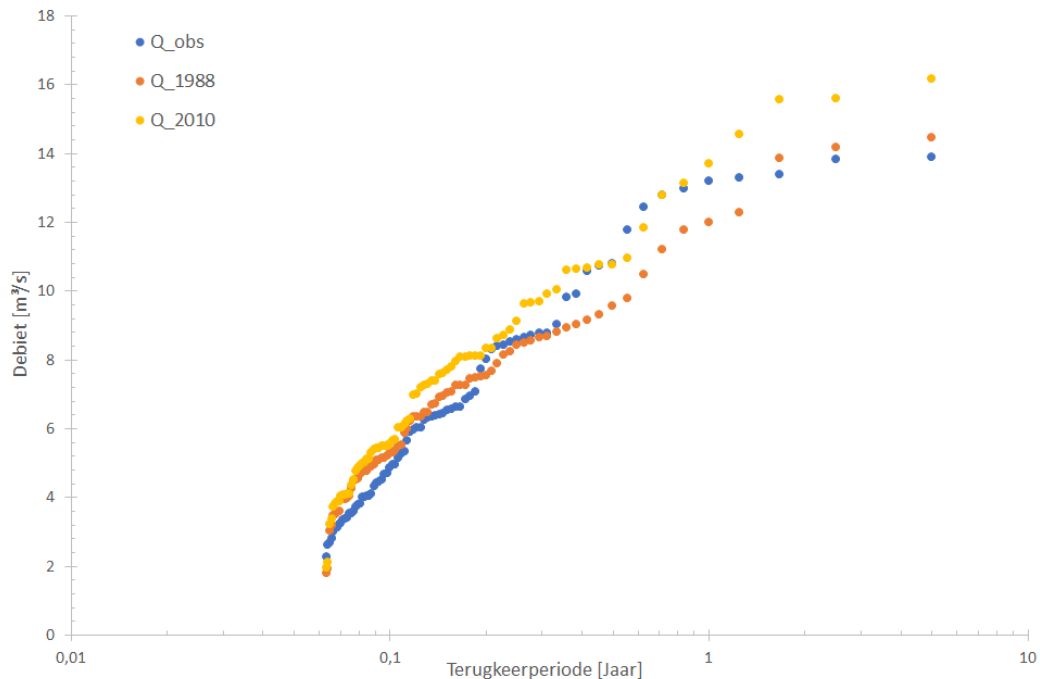
Figuur 4.13: Geobserveerde en gesimuleerde debieten (parameters voor 1988 in vergelijking met parameters voor 2010) voor de periode van juli 1987 tot maart 1988 [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).



Figuur 4.14: Geobserveerde en gesimuleerde debieten (parameters voor 2000 in vergelijking met parameters voor 2010) voor de periode van oktober 1997 tot oktober 1998 [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).

voeren benadert wat in deze masterproef van groter belang is. De extreme waarde verdeling voor de periodes rondom 1988 en 2000 staat weergegeven in respectievelijk Figuur 4.15 en Figuur 4.16. Op beide figuren kan worden opgemerkt dat de gesimuleerde debieten (met de modelparameters van het desbetreffende jaartal) een goede overeenkomst geven met de gemeten debieten. Het NAM-model met de aangepaste parameters bekomen via de toepassing van de ruimtelijke disaggregatie geeft correcte

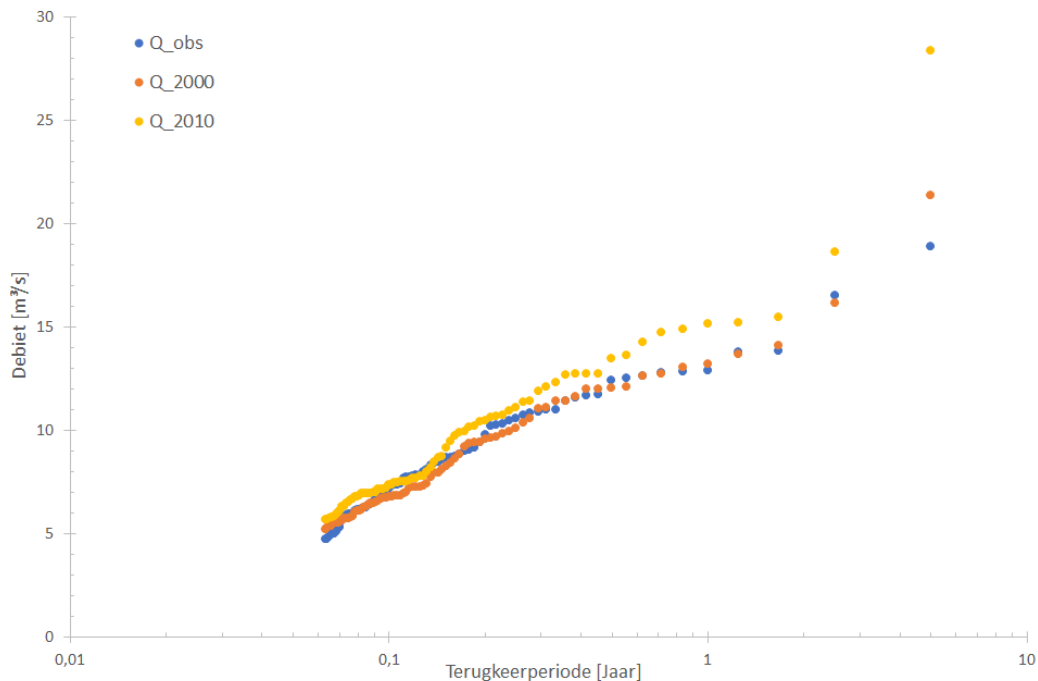
resultaten in vergelijking met de meetgegevens voor de extreme waarden.



Figuur 4.15: De extreme waarden verdeling van de geobserveerde debieten (Q_{obs}) voor de periode rondom 1988 en de via het NAM-model gesimuleerde debieten met de modelparameters van 1988 (Q_{1988}) en 2010 (Q_{2010}) [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).

Verder kan nog de NSE-waarde voor beide periodes bepaald worden. Voor de periode van 1988 bedraagt de NSE-waarde 0,65 ongeacht met welke parameterset er gerekend is. Voor de periode van 2000 bedraagt de NSE-waarde 0,48 waarbij de parameterset eveneens geen invloed heeft. De waarde voor 1988 wijst op een goede fit van de gesimuleerde debieten op de observaties. Voor 2000 ligt de NSE-waarde veel lager, wat wijst op een minder goede fit van de simulaties op de observaties. Wel komt voor de periode rondom 2000 de extreme waarden verdeling beter overeen met deze van de geobserveerde debieten dan dat het geval is voor de periode rondom 1988. De extreme waarden verdeling is meer doorslaggevend dan de louter statistische indicatie van de NSE-waarde.

Vervolgens kunnen dan nog de cumulatieve volumes beschouwd worden. Deze staan voor de periode rondom 1988 weergegeven op Figuur 4.17. Voor de periode rondom 2000 staan de cumulatieve debieten weergegeven op Figuur 4.18. Het verschil in de waterbalans voor beide periodes op het einde van de tijdsreeks is relatief groot. Voor 1988 bedraagt dit verschil $1246 \text{ m}^3/\text{s}$, voor 2000 bedraagt dit verschil $2273 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit verschil valt te verklaren door een systematische overschatting van de

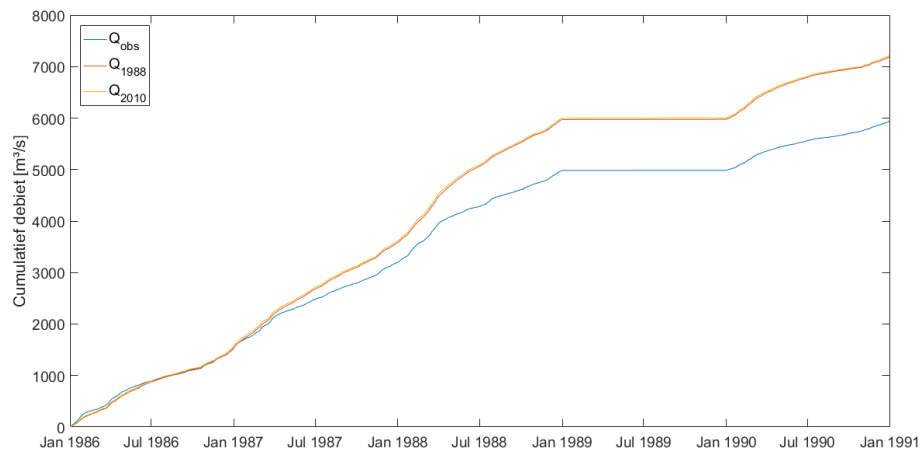


Figuur 4.16: De extreme waarden verdeling van de geobserveerde debieten (Q_{obs}) voor de periode rondom 2000 en de via het NAM-model gesimuleerde debieten met de modelparameters van 2000 (Q_{2000}) en 2010 (Q_{2010}) [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).

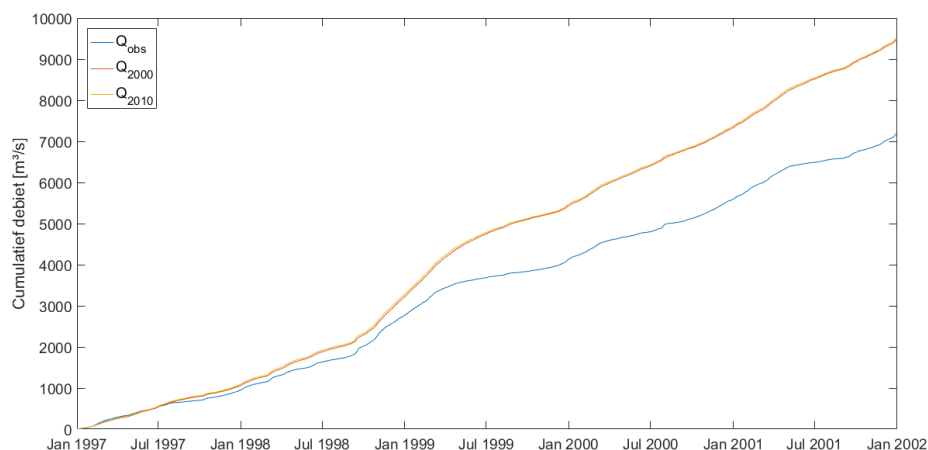
gesimuleerde debieten met het NAM-model vanaf februari 1987 voor de periode van 1988, die zich daarna blijft voortzetten. Het horizontaal gedeelte op Figuur 4.17 is veroorzaakt door een hiaat in de meetgegevens. Voor 2000 kan grotendeels dezelfde opmerking worden gemaakt. Het verschil is hier eveneens veroorzaakt door een overschatting van het NAM-model vanaf de winter van 1998-1999.

Het onevenwicht in de waterbalans kan worden aangepast door de modelparameters aan te passen, maar aangezien deze validatie dient om de methode van de ruimtelijke disaggregatie te staven met de meetgegevens van het verleden zal dit niet uitgevoerd worden.

De methode van de ruimtelijke disaggregatie resulteert in aangepaste parameters die leiden tot lagere piekafvoeren dan voor de oorspronkelijke gekalibreerde parameters van het NAM-model (zie Figuren 4.15 en 4.16), wat ook te verwachten was gezien het landgebruik voor het verleden (minder verharding en gunstiger landgebruik voor de hydrologie). Op vlak van de extreme waarden verdeling geeft de ruimtelijke disaggregatie goede resultaten en zijn ook de te verwachten lagere piekafvoeren voor het landgebruik in het verleden zichtbaar.



Figuur 4.17: De cumulatieve volumes van de geobserveerde debieten en de gesimuleerde debieten (NAM-model) voor de periode rondom 1988 [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).



Figuur 4.18: De cumulatieve volumes van de geobserveerde debieten en de gesimuleerde debieten (NAM-model) voor de periode rondom 2000 [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).

Omdat de modelparameters vanuit Tabel 4.3 vrij dicht bij elkaar liggen, zal er voor elk jaartal (1988, 2000) ook gerekend worden met de oorspronkelijke modelparameters van 2010. Zoals eerder gesteld, is op de Figuren 4.15 en 4.16 de te verwachten daling in piekafvoeren resulterend uit het landgebruik van het verleden (door de veranderde modelparameters via ruimtelijke disaggregatie) duidelijk zichtbaar. Dit is ook te zien op de Figuren 4.13 en 4.14 waar eveneens de gesimuleerde debieten via de modelparameters voor 2010 voor dezelfde tijdsreeks weergegeven staan. Deze

gesimuleerde debieten liggen hoger dan deze die bekomen zijn door te rekenen met de veranderde modelparameters voor de desbetreffende periode (1988, 2000). De NSE-waardes die bekomen zijn voor de periode 1988 en 2000 indien gerekend met de modelparameters voor 2010 staan weergegeven in Tabel 4.4. Deze blijven gelijk voor de hele periode.

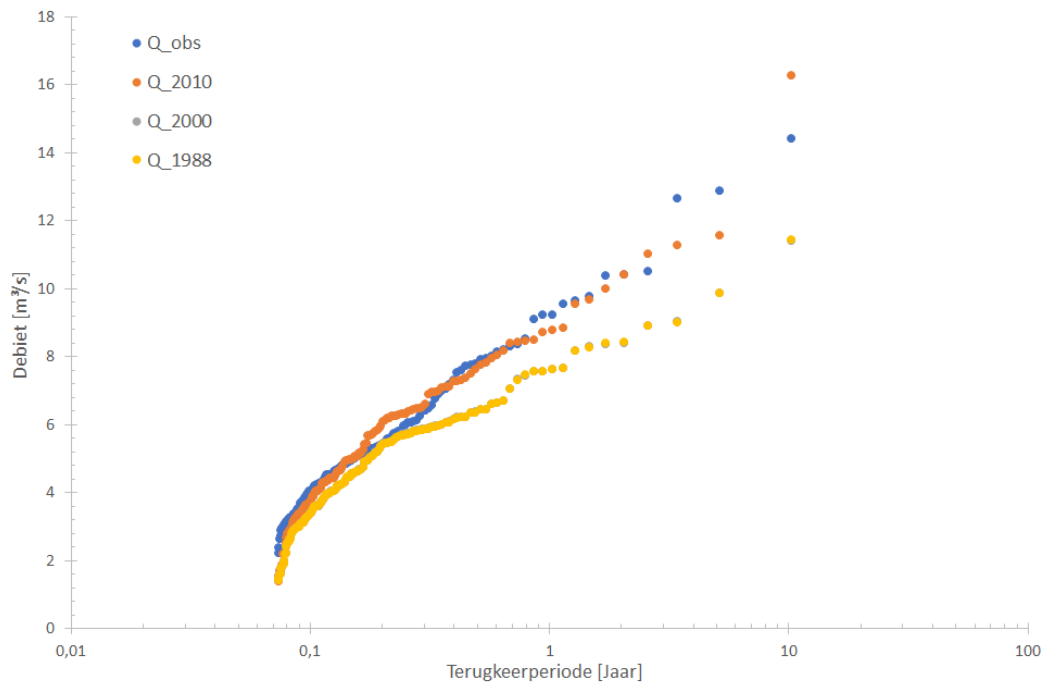
Tabel 4.4: NSE-waardes voor de verschillende periodes, gerekend met de verschillende sets van modelparameters.

		Periode			
		1988	2000	2010 kalibratie	2010 validatie
Parameterset	1988	0,65	0,48	0,68	0,67
	2000	0,65	0,48	0,67	0,67
	2010	0,65	0,48	0,66	0,66

In Tabel 4.4 kan worden opgemerkt dat voor de kalibratie- en validatieperiode van 2010 de NSE-waarde stijgt indien de modelparameters van het verleden, bekomen na toepassen van de ruimtelijke disaggregatie, gebruikt worden. Ook al is het verschil tussen de NSE-waardes relatief klein, toch kan dit een indicatie geven dat de gekalibreerde modelparameters van 2010 niet de beste benadering geven. Aangezien er bij de kalibratie en validatie meerdere aspecten zijn beschouwd, wordt er hier verder ook nog naar de extreme waarden verdeling voor de verschillende parametersets gekeken. Op Figuur 4.19 staat de extreme waarden verdeling voor de hele periode rondom 2010 (kalibratie en validatie) weergegeven waarbij er voor de gesimuleerde debieten gerekend is met de parameterset voor 2010, 2000 en deze voor 1988. Hierop is te zien dat ondanks het feit dat de modelparameter van 2000 en 1988 een hogere NSE-waarde geven (zie Tabel 4.4), de extreme waarden analyse van de modelparameters van 2010 een correctere weergave is van de werkelijkheid voor de toestand in 2010. Het verschil tussen de piekafvoeren van 1988 en 2000 is klein door het kleine verschil tussen de modelparameters (en het landgebruik) zoals te zien in Tabel 4.3.

Vanuit Figuur 4.17, Figuur 4.18 en Tabel 4.4 kan opgemerkt worden dat voor het valideren van de methode van de ruimtelijk disaggregatie voornamelijk de extreme waarden verdeling van belang is gezien het kleine verschil voor de totale afvoer (NSE, cumulatieve volumes). De extreme waarden verdelingen geven hierbij goede overeenkomsten (zie Figuur 4.15, 4.16 en 4.19).

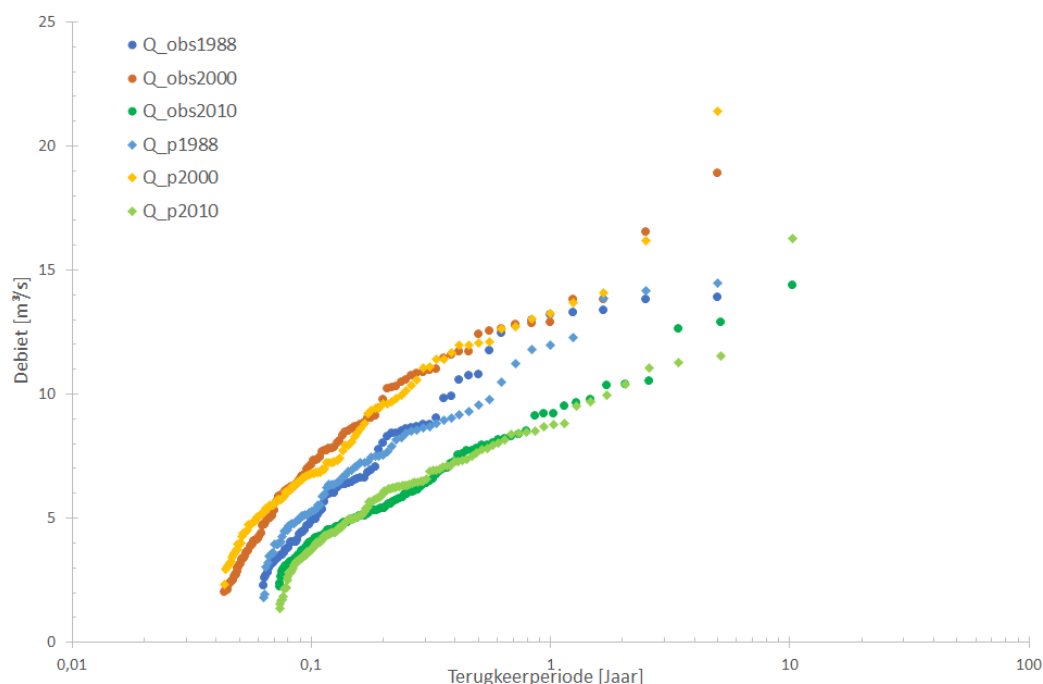
Tot slot zijn de extreme waarden verdelingen van de geobserveerde en gesimuleerd debieten voor de tijdsreeksen rondom 1988, 2000 en 2010 weergegeven in Figuur 4.20. Hierop is te zien dat de gesimuleerde waardes de observaties goed benaderen. Ook kan er worden opgemerkt dat de extreme waarden in de periode rondom 2000 het hoogst lagen terwijl deze in 2010 het laagst lagen. De natuurlijke klimaatoscillaties zijn hiermee duidelijk zichtbaar. De modelparameters liggen relatief dicht bij elkaar en in stijgende lijn op vlak van piekafvoer van verleden naar 2010 waardoor normaliter



Figuur 4.19: De extreme waarden verdeling voor de geobserveerde debieten (Q_{obs}) voor de periode rondom 2010 (kalibratie en validatie) en de via het NAM-model gesimuleerde debieten met de modelparameters voor 2010, 2000 en 1988 [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).

dit zoals te verwachten ook zichtbaar zou moeten zijn op Figuur 4.20. Het verschil is dus te wijten aan de klimaatgegevens die als input dienden voor het NAM-model (neerslag, verdamping) [Willems, 2013].

Finaal kan dan gesteld worden dat de methode van de ruimtelijke disaggregatie de modelparameters aanpast afhankelijk van het (veranderend) landgebruik. Deze veranderde parameters hebben hun invloed op de afvoerdebieten en indien vergeleken met de metingen voor het stroomgebied van de Grote Nete komen de simulaties voldoende overeen, voornamelijk op vlak van de extreme waarden verdelingen. De methode van de ruimtelijke disaggregatie voor het doorrekenen van landgebruiksscenario's kan dan in een volgend onderdeel worden uitgevoerd voor de verschillende landgebruiksscenario's.



Figuur 4.20: De extreme waarden verdeling voor de geobserveerde debieten (Q_{obs}) en de via het NAM-model gesimuleerde debieten (Q_p) voor de periodes rondom 1988, 2000 en 2010 [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] (eigen verwerking).

Ruimtelijke disaggregatie en landgebruiksscenario's

De onderzoeksvraag van deze masterproef, namelijk het achterhalen van de invloed van het al dan niet realiseren van de betonstop in Vlaanderen op de hydrologie, kan beantwoord worden door het toepassen van de methode van de ruimtelijke disaggregatie op de landgebruiksscenario's voor het BAU-scenario en de betonstopscenario's voor het stroomgebied van de Grote Nete. In dit onderdeel zal de ruimtelijke disaggregatie (zie sectie 4.2.2) worden toegepast op de landgebruikskaarten voor de betonstop ('Rendementskans', '50% willekeur', '100% willekeur', 'RMV - SE', 'RMV - RC') en het BAU-scenario ('RMV - BAU'). Het landgebruik voor al deze scenario's staat achtereenvolgens weergegeven op de Figuren C.2 tot en met C.7 in Bijlage C. Met de omgevormde parameters (ten opzichte van de modelparameters voor 2010) kan dan het NAM-model opnieuw simuleren om zo de verandering in rivierafvoerdebieten ten gevolge van de landgebruiksveranderingen te kunnen begroten door te rekenen met dezelfde tijdsreeks van de periode rondom 2010 (22/05/2004 tot 15/09/2014).

Als eerste stap dienen dus de aangepaste modelparameters te worden bepaald via de methode van de ruimtelijke disaggregatie. Deze aangepaste modelparameters voor alle landgebruiksscenario's staan weergegeven in Tabel 4.5.

Tabel 4.5: De parameters van het NAM-model voor de huidige toestand (2010) en voor de verschillende landgebruiksscenario's (2050).

Parameter	Model						
	2010	Rendements- kans	50% wille- keur	100% wille- keur	RMV - SE	RMV - RC	RMV - BAU
U_{max} [mm]	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
L_{max} [mm]	225,00	224,55	224,30	223,97	223,51	225,25	223,18
CQOF [-]	0,200	0,213	0,215	0,216	0,217	0,210	0,258
CKIF [d]	7,00	6,92	6,89	6,84	6,73	6,98	6,66
CK1 [d]	1,60	1,58	1,57	1,56	1,54	1,59	1,52
CK2 [d]	1,60	1,58	1,57	1,56	1,54	1,59	1,52
TOF [-]	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
TIF [-]	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
TG [-]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
CKBF [d]	90	90	90	90	90	90	90
A [km ²]	385	385	385	385	385	385	385

In de Tabel 4.5 is over het algemeen op te merken dat de recessieconstanten dalen voor de toekomstige landgebruiksscenario's voor 2050 ten opzichte van 2010, als ook de maximale opslagcapaciteit van de wortelzone L_{max} . Deze daling ligt geheel binnen de verwachtingen gezien het feit dat de voornaamste verandering voor de landgebruiksscenario's de oppervlakte aan 'Built-up land' is en deze voor alle landgebruiksscenario's stijgt. Enkel voor het scenario 'RMV - RC' is er een stijging van L_{max} op te merken in Tabel 4.5. Dit is veroorzaakt door de stijging in de oppervlakte aan bos (9%) en de lichte stijging in de oppervlakte aan grasland (1,3%), die beide een grotere worteldiepte hebben (1 m en 0,8 m) die bepalend is voor de ruimtelijke disaggregatie (zie sectie 4.2.2).

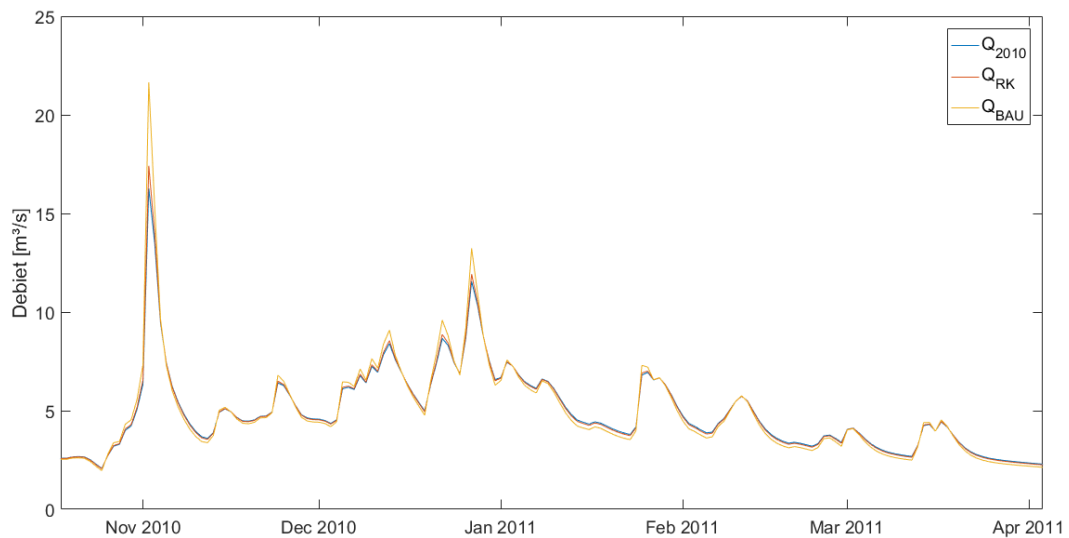
De stijging in de oppervlakte van 'Built-up land' vertaalt zich, zoals eerder gesteld, in een daling van de recessieconstanten. Wel is er een verschil in de daling op te merken naargelang het beschouwde scenario. Voor de eigen aangemaakte betonstopscenario's 'Rendementskans', '50% willekeur' en '100% willekeur' bedraagt de stijging in de oppervlakte van 'Built-up land' respectievelijk ongeveer 4%, 5% en 7%. Hierbij is het verschil tussen deze drie scenario's zichtbaar aangezien deze dezelfde toename van oppervlakte aan 'Built-up land' hebben ten opzichte van 2010 en het overige landgebruik onveranderd blijft maar er toch een verschil is tussen de oppervlaktes aan 'Built-up land' voor het stroomgebied van de Grote Nete. Dit verschil valt te verklaren door het feit dat er door het in rekening brengen van de willekeur er minder focus zal liggen op de kernen en er dus meer 'Built-up land' zal bijkomen voor de meer landelijke gebieden zoals het geval is voor het stroomgebied van de Grote Nete. Dezelfde bemerking kan gemaakt worden voor de parameter

L_{max} en de oppervlakteafstromingscoëfficiënt CQOF.

Voor de landgebruiksscenario's van het Ruimtemodel Vlaanderen geldt eveneens dat er meer oppervlakte aan 'Built-up land' is bijgekomen ten opzichte van de toestand voor 2010, zeker voor het BAU-scenario. Dit vertaalt zich dan ook naar lagere recessieconstanten, een hogere oppervlakteafstromingscoëfficiënt en een lagere waarde voor L_{max} . Enkel voor het scenario 'RMV - RC' is het laatste niet van toepassing, zoals al eerder verklaard. Dit scenario heeft ook de kleinste daling in recessieconstanten en de kleinste stijging in oppervlakteafstromingscoëfficiënt om dezelfde redenen. Het 'RMV - SE' scenario kent ook nog een daling in de oppervlakte aan bos (-10%), dat resulteert in een grotere daling van de recessieconstante en L_{max} , en een stijging van de oppervlakteafstromingscoëfficiënt. Het verschil in de stijging van de oppervlakte aan 'Built-up land' voor het stroomgebied van de Grote Nete heeft de voornaamste invloed op de modelparameters. Voor het scenario 'RMV - SE' bedraagt de stijging ongeveer 9%, voor 'RMV - RC' 4% en voor 'RMV - BAU' is dit 19%. Dit percentage komt proportioneel overeen met de verandering van de modelparameters, rekening houdend met de hierboven genoemde extra verandering in landgebruik.

De verandering van de modelparameters zoals te zien in Tabel 4.5 zal leiden tot een verandering in de gesimuleerde rivierafvoerdebieten bekomen via het NAM-model en dit omdat de recessieconstanten van de snelle afvoer over het algemeen dalen en de oppervlakteafstromingscoëfficiënt zal toenemen. Deze verwachtingen liggen in dezelfde lijn als de ondervindingen in de literatuur (zie hoofdstuk 2). Om de verandering op de rivierafvoerdebieten te kunnen begroten zal er voor dezelfde tijdsreeks als die van de periode rondom 2010 telkens ook gesimuleerd worden met de modelparameters voor de verschillende landgebruiksscenario's bekomen via ruimtelijke disaggregatie (zie Tabel 4.5).

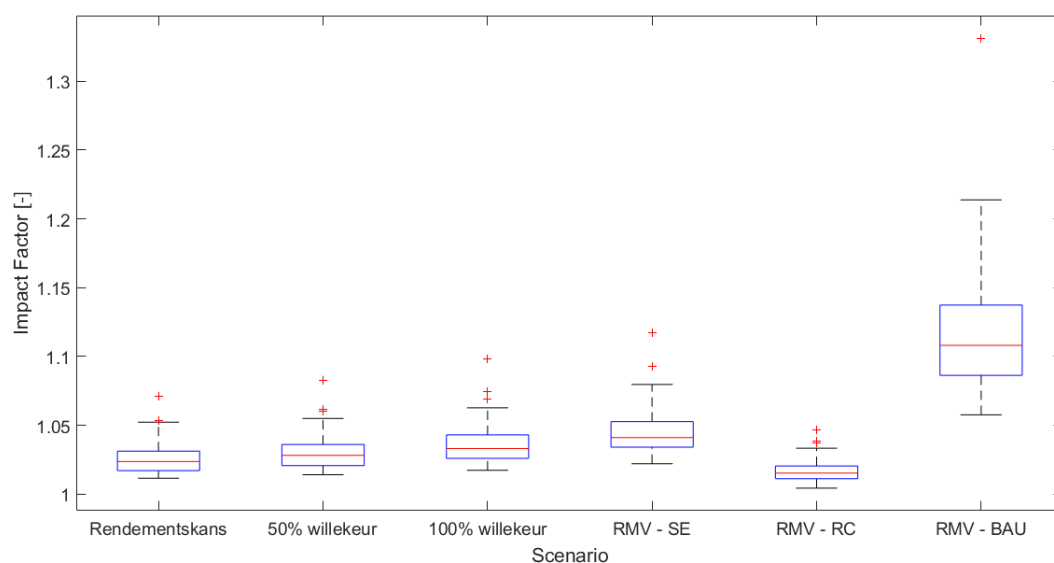
Als eerste kan de invloed van de veranderde parameters voor elk landgebruiksscenario op de rivierafvoerdebieten visueel bepaald worden door het verloop van de via het NAM-model gesimuleerde debieten te beschouwen. De gesimuleerde debieten bekomen via de modelparameters voor 2010, het scenario 'Rendementskans' en het scenario 'RMV - BAU' staan weergegeven op Figuur 4.21. Deze zijn gekozen aangezien het scenario 'Rendementskans' het meest strenge eigen betonstopscenario is en het BAU-scenario daartegenover het meeste verschil toont. Op de Figuur 4.21 is duidelijk de toename in piekhoogte te zien voor de beide scenario's ten opzichte van het landgebruik in 2010. Het BAU-scenario resulteert zoals te verwachten in een veel grotere piekhoogte dan het geval is voor de betonstop. De grootteorde is natuurlijk afhankelijk van de beschouwde piek in de rivierafvoer. Het omgekeerd geldt voor de lagere afvoerdebieten, waar het BAU-scenario de laagste waardes heeft door de snellere piekafvoer. Voor de overige scenario's die niet weergegeven staan op Figuur 4.21 kunnen dezelfde bemerkingen gemaakt worden rekening houdend met de verandering in de modelparameters ten opzichte van 2010 en de invloed ervan op de gesimuleerde rivierafvoerdebieten.



Figuur 4.21: Gesimuleerde afvoerdebieten met de modelparameters van 2010 (Q_{2010}), het scenario 'Rendementskans' (Q_{RK}) en 'RMV - BAU' (Q_{BAU}).

Daarnaast kan het verschil beschouwd worden tussen de piekafvoeren van de gesimuleerde debieten bekomen met de modelparameters van 2010 en deze bekomen met de modelparameters voor de verschillende landgebruiksscenario's (zie Tabel 4.5). De verschillen in piekafvoer voor de verschillende landgebruiksscenario's kunnen vergeleken worden door de piekafvoeren of extreme waarden naar grootte te rangschikken. Dan kan voor elke piekafvoer de empirische terugkeerperiode bepaald worden om vervolgens voor elke terugkeerperiode de impactfactor (factor van verandering) te bepalen tussen de piekafvoer voor het beschouwde toekomstig landgebruiksscenario en deze voor 2010, wat ook al in een eerste inschatting bleek uit Figuur 4.21. Deze impactfactor is bepaald voor alle terugkeerperiodes groter dan 0,1 jaar. Om deze dan gemakkelijk te kunnen vergelijken voor elk landgebruiksscenario kunnen deze weergegeven worden in een box-plot. Dit staat weergegeven op Figuur 4.22. Hierop is duidelijk te zien dat de piekafvoeren voor het BAU-scenario ('RMV - BAU') sterk zullen toenemen ten opzichte van 2010. Voor de betonstopscenario's is de toename in piekafvoer kleiner. Het verschil in piekafvoer tussen de scenario's onderling is een logisch gevolg van de aangepaste modelparameters, zoals te zien in Tabel 4.5, en volgt dezelfde trend als het verschil tussen deze parameters van elk landgebruiksscenario.

De impact factor geeft een belangrijke indicatie van de impact van het veranderend landgebruik op de hydrologie, en meer bepaald de piekafvoeren. Vanuit Figuur 4.22 volgt dan duidelijk het effect van het al dan niet toepassen van de betonstop. Bij het uitvoeren van de betonstop zullen de piekafvoeren in het slechtste geval gemiddeld gezien 4,11% stijgen ('RMV - SE') en in het beste geval 1,53% stijgen ('RMV - RC') in vergelijking met de toestand in 2010. Ten opzichte van het niet uitvoeren van de betonstop, wat gelijk staat met het BAU-scenario ('RMV - BAU'), zullen de piekafvoeren gemiddeld gezien 10,81% toenemen. Zoals te zien op Figuur 4.22 zijn

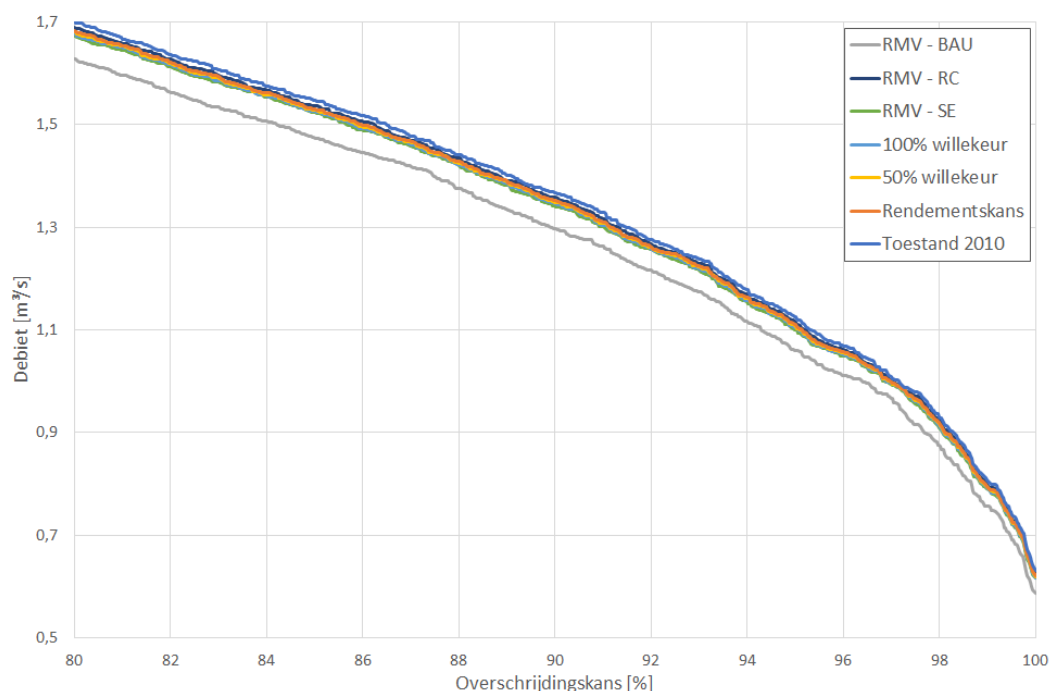


Figuur 4.22: Box-plots voor de impact factor (verandering in piekafvoer ten opzichte van 2010) van de terugkeerperiodes groter dan 0,1 jaar voor de verschillende landgebruiksscenario's.

deze toenames niet éénduidig bepaald en kunnen deze verschillend zijn per piekafvoer.

Aangezien de impact factor enkel het effect van veranderend landgebruik in kader van de betonstop begroot op vlak van de piekafvoeren, dient er ook nog een manier gevonden te worden om het effect op de laagwaterafvoeren te kunnen achterhalen. Dit effect op de lage piekafvoeren kan ingeschat worden door het bepalen van een zogenaamde baseflow indicator. In dit geval zijn alle gesimuleerde afvoerdebieten bekomen via de modelparameters voor elk landgebruiksscenario voor de hele tijdreeks rondom 2010 gerangschikt van laag naar hoog. Vervolgens kan hiervoor dan de overschrijdingskans bepaald worden waarbij een hoge overschrijdingskans overeen stemt met de lage afvoerdebieten. Dit staat weergegeven op Figuur 4.23. Ten opzichte van de toestand in 2010 is hierop een daling te zien in de laagwaterafvoer voor de landgebruiksscenario's in kader van de betonstop en nog sterker voor het BAU-scenario. Net zoals voor de piekafvoeren ligt het verschil voor elk scenario ten opzichte van 2010 logischerwijs in dezelfde lijn als de verandering in modelparameters. Het betonstopscenario 'RMV - RC' kent het kleinste verschil terwijl 'RMV - SE' het grootste verschil kent van de betonstopscenario's. De eigen aangemaakte betonstopscenario's liggen hier tussenin naargelang de hoeveelheid willekeur waarmee rekening is gehouden.

Het verschil tussen de verschillende landgebruiksscenario's kan dan duidelijker achterhaald worden door de waarde van het afvoerdebiet horende bij een bepaalde overschrijdingskans te gaan vergelijken met deze bekomen voor het landgebruik in 2010. Het procentuele verschil ten opzichte van 2010 staat weergegeven in Tabel 4.6.



Figuur 4.23: Overschrijdingskans voor de gesimuleerde debieten van elk landgebruiksscenario en de toestand in 2010.

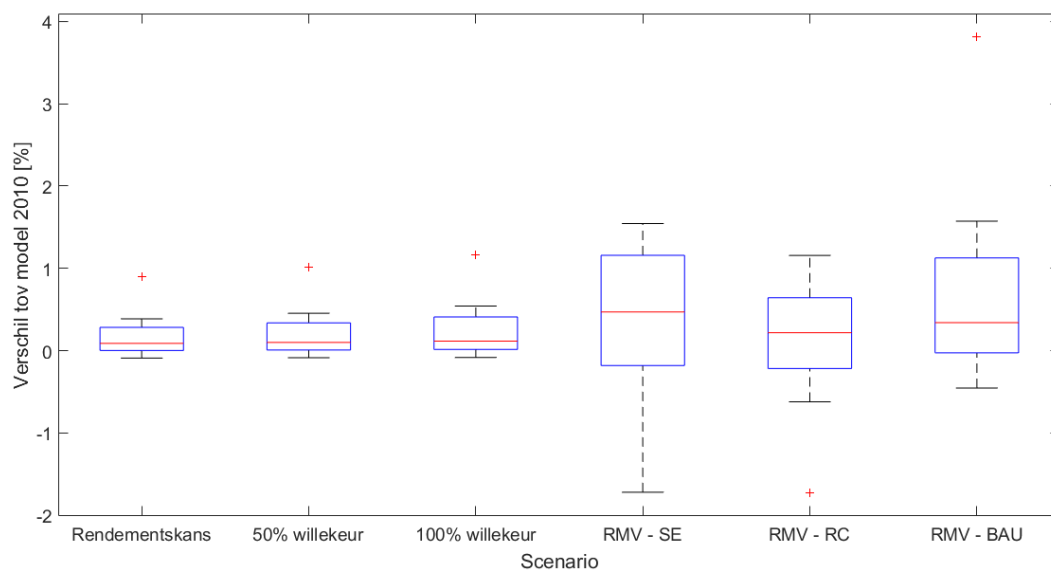
Hierin is duidelijk het effect van het veranderend landgebruik op de laagwaterafvoer zichtbaar, zoals ook in eerste (ruwe) instantie bleek uit Figuur 4.23. Hoe groter de overschrijdingskans (laagste gesimuleerde afvoerdebieten), hoe groter het verschil ten opzichte van de toestand in 2010 en hoe lager de laagwaterafvoer zal zijn. Het veranderend landgebruik in kader van de betonstop heeft dus een verlagend effect op de minima in rivierafvoer. Deze afname is afhankelijk van het beschouwde scenario en is het sterkst voor het BAU-scenario (zoals ook het geval voor de maxima in afvoer). Voor het betonstopscenario 'RMV - RC' is deze afname het kleinst. Het meest ongunstige betonstopscenario voor het stroomgebied van de Grote Nete is 'RMV - SE', wat hiervoor ook al meermaals het geval was. De afname is eveneens in lijn met de verandering in modelparameters (zie Tabel 4.5).

Vervolgens is nog het effect van het veranderend landgebruik via de verschillende scenario's op de jaarlijkse totalen beschouwd. De jaarlijkse totalen zijn de som van de debieten over een volledig hydrologisch jaar (1 okt - 30 sept). Deze staan weergegeven op de Figuur 4.24. Het verschil tussen de jaarlijkse totalen voor het model van 2010 en de jaarlijkse totalen zoals bekomen met de modelparameters voor de verschillende landgebruiksscenario's is relatief klein. Globaal gezien kan er van een zeer lichte stijging van ongeveer een kleine 0,2% gesproken worden, dewelke te verklaren valt door de algemene toename in piekafvoer voor de verschillende landgebruiksscenario's. De scenario's die resulteren in de grootste toename van de jaarlijkse totalen hebben

Tabel 4.6: Verschil [%] tussen het debiet horende bij de overschrijdingskans voor elk landgebruiksscenario en de toestand in 2010 (zie ook Figuur 4.23).

Overschrij- dingskans [%]	Scenario					
	Rendeme- ntskans	50% wil- lekeur	100% willekeur	RMV - SE	RMV - RC	RMV - BAU
100	-1,7%	-2,0%	-2,3%	-2,6%	-1,1%	-7,3%
90	-1,1%	-1,4%	-1,6%	-2,0%	-0,7%	-5,1%
80	-1,0%	-1,1%	-1,3%	-1,6%	-0,6%	-4,2%
70	-0,8%	-0,9%	-1,1%	-1,2%	-0,6%	-3,6%
60	-0,8%	-0,8%	-0,9%	-1,2%	-0,5%	-3,1%

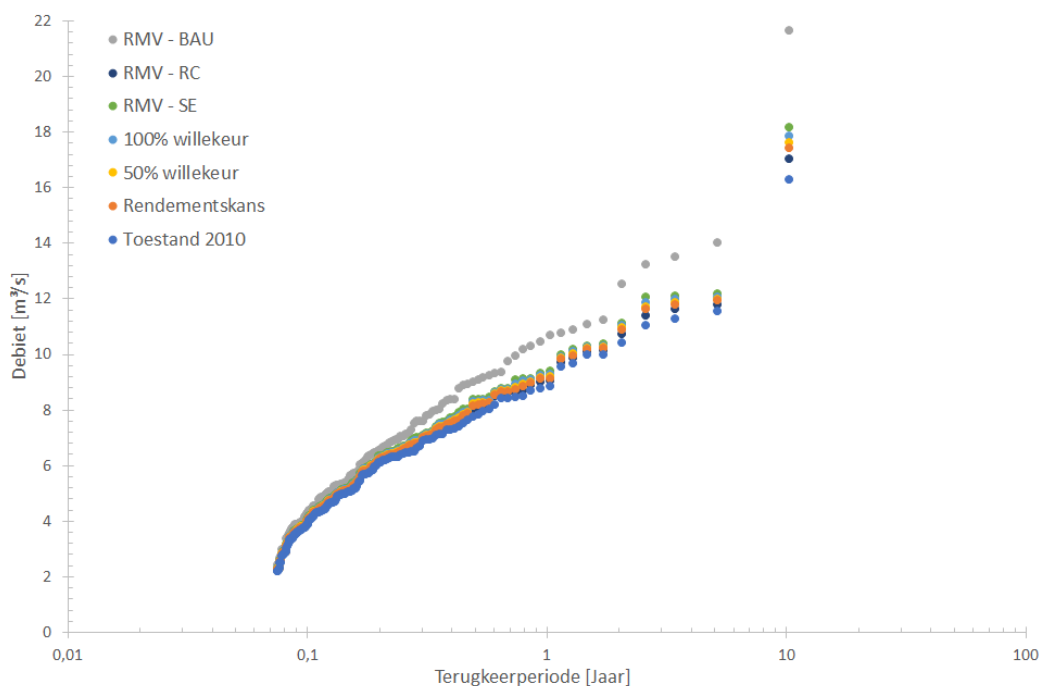
ook de grootste toename in piekafvoer. Het kleine verschil in de jaarlijkse totalen valt te verklaren door het feit dat er zowel een stijging is in piekafvoer als een daling in de laagwaterafvoer voor de verschillende landgebruiksscenario's, dewelke elkaar dan min of meer opheffen.



Figuur 4.24: Het verschil tussen de jaarlijkse totalen (per hydrologisch jaar) gerekend met de modelparameters van de verschillende landgebruiksscenario's en de jaarlijkse totalen via de modelparameters voor 2010.

Als laatste kan het effect van de betonstop op de hydrologie nog begroot worden door de extreme waarden te beschouwen van de gesimuleerde debieten bekomen via de aangepaste modelparameters voor alle landgebruiksscenario's (zie Tabel 4.5). De extreme waarden verdeling van de verschillende landgebruiksscenario's en het landgebruik in 2010 staat weergegeven op Figuur 4.25. De globale stijging in extreme

waarden, zoals reeds bleek uit de piekafvoeren, is ook hier duidelijk. Het scenario met de grootste stijging is opnieuw het BAU-scenario, de grootteorde van stijging ligt dan ook opnieuw in lijn met de verandering van de modelparameters. Zo kent het scenario 'RMV - RC' de kleinste stijging terwijl 'RMV - SE' de grootste stijging van de betonstopscenario's kent. De eigen aangemaakte betonstopscenario's liggen hier tussenin naargelang de hoeveelheid willekeur waarmee gerekend is.



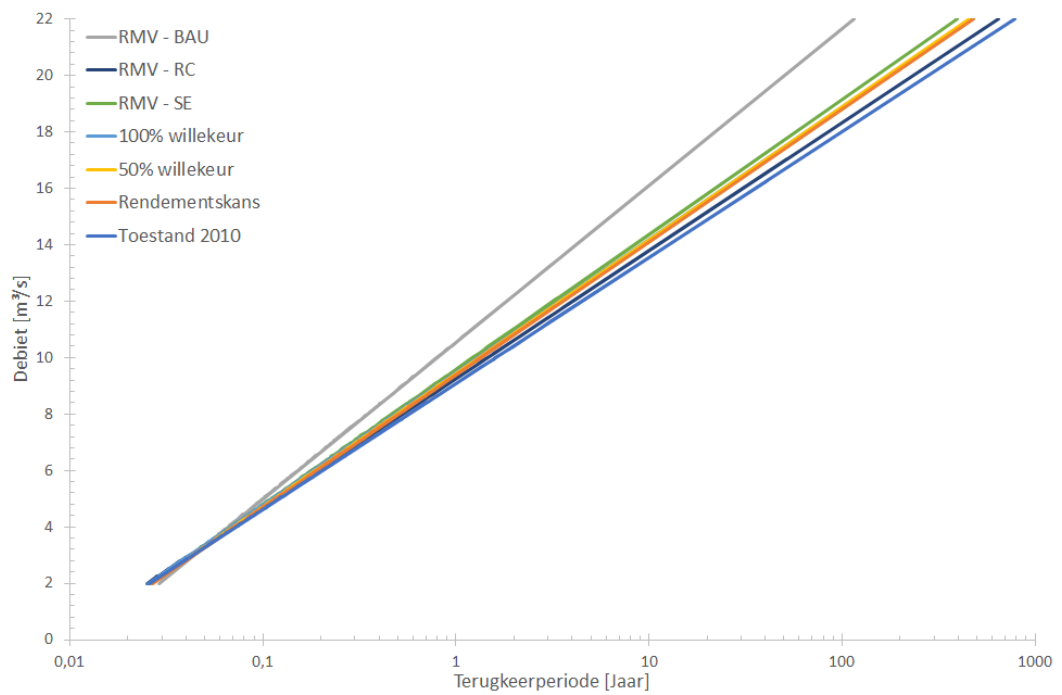
Figuur 4.25: De extreme waarden verdeling van de gesimuleerde debieten voor de verschillende landgebruiksscenario's en de toestand in 2010.

Via de extreme waarden verdeling voor alle landgebruiksscenario's kan dan de verandering in terugkeerperiode voor hetzelfde afvoerdebiet bepaald worden ten opzichte van de toestand in 2010. Zoals te zien op Figuur 4.25 zal de terugkeerperiode voor een bepaald afvoerdebiet kleiner worden naargelang welk landgebruiksscenario wordt beschouwd. Het afvoerdebiet horende bij een bepaalde terugkeerperiode voor de toestand in 2010 staat weergegeven in Tabel 4.7. De terugkeerperiode voor hetzelfde debiet voor de verschillende landgebruiksscenario's staat eveneens weergegeven in Tabel 4.7. De terugkeerperiode hierin zijn bekomen via de extreme waarden verdeling (exponentiële verdeling) die bepaald is voor de gesimuleerde debieten. Voor alle beschouwde landgebruiksscenario's staat deze weergegeven in Figuur 4.26. In Bijlage D staan de extreme waarden verdelingen voor elk landgebruiksscenario met daarbij de exponentiële verdeling weergegeven op Figuur D.1 tot en met D.7.

Tabel 4.7: De terugkeerperiodes horend bij een bepaald afvoerdebiet voor de verschillende landgebruiksscenario's in vergelijking met de terugkeerperiodes voor het landgebruik in 2010.

Q [m ³ /s]	Terugkeerperiode [Jaar]						
	2010	Rendeme- ntskans	50% wil- lekeur	100% willekeur	RMV - SE	RMV - RC	RMV - BAU
18,00	100	68,0	65,0	64,9	57,4	85,0	22,0
16,66	50	35,2	33,8	33,6	30,1	43,0	12,6
13,54	10	7,6	7,4	7,3	6,7	8,8	3,5
12,20	5	4,0	3,8	3,8	3,5	4,5	2,0
9,08	1	0,9	0,8	0,8	0,8	0,9	0,5
7,74	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,3

In Tabel 4.7 is het effect van het veranderend landgebruik op de hydrologie nogmaals zichtbaar. De terugkeerperiodes voor hetzelfde afvoerdebiet zullen kleiner worden voor de verschillende landgebruiksscenario's ten opzichte van 2010. De daling van de terugkeerperiodes ligt eveneens in dezelfde lijn als de verandering van de modelparameters voor elk scenario. Het BAU-scenario is, zoals te verwachten, het meest ongunstige scenario. De betonstopscenario's hebben een kleinere daling, hiervan is het meest gunstige scenario 'RMV - RC'. Dit alles is ook zichtbaar op Figuur 4.26. In de praktijk zal dalen van de terugkeerperiode voor hetzelfde afvoerdebiet van de Grote Nete betekenen dat bijvoorbeeld een gebeurtenis die nu eens om de 5 jaar voorkomt in de toekomst (2050) met toepassing van de betonstop ongeveer eens in de 4 jaar zal voorkomen waar dit voor het BAU-scenario eens om de 2 jaar zal zijn. Wel dient er nog te worden opgemerkt dat een grotere terugkeerperiode, zoals bijvoorbeeld een terugkeerperiode van 100 jaar, gepaard gaat met een grotere onzekerheid.



Figuur 4.26: Extreme waarden verdeling (exponentiële verdeling) voor het landgebruik in 2010 en de verschillende landgebruiksscenario's (zie ook Figuur D.1 tot en met D.7 in Bijlage D).

Relatie verharding en effect landgebruiksveranderingen

Aangezien de toename in verharding gekend is van 1976 tot 2010 en deze voor de toekomst (2050) ingeschat is geweest (zie sectie 3.2.4), kan de relatie tussen de toename in verharding en het effect van de landgebruiksveranderingen op de hydrologie achterhaald worden. Hierbij wordt er telkens gerekend met de tijdsreeks rondom 2010 (22/05/2004 tot 15/09/2014), zoals ook het geval in vorig onderdeel, om zo het effect van de landgebruiksveranderingen te kunnen isoleren. Omdat voor de landgebruiksscenario's en de hydrologie de toename in stedelijk gebied en bijhorend de verharding het voornaamste effect heeft op de rivierafvoer, is het interessant om deze relatie te begroten voor het stroomgebied van de Grote Nete. De toestand in 2010 wordt genomen als referentiepunt voor het effect van het veranderend landgebruik op de hydrologie.

Tabel 4.8: Toename/afname van de verharding, piekafvoer en laagwaterafvoer (afhankelijk van de overschrijdingskans) voor het verleden ten opzichte van de toestand in 2010.

Jaar	1976	1988	2000
Opp. verharding [ha]	2245	3021	3470
Afname verharding	-60,7%	-47,2%	-39,3%
Afname piekafvoer	-14,0%	-13,5%	-13,3%
Toename laagwaterafvoer (100%)	9,5%	8,9%	9,1%
Toename laagwaterafvoer (90%)	5,2%	4,9%	5,0%
Toename laagwaterafvoer (80%)	4,6%	4,4%	4,4%
Toename laagwaterafvoer (70%)	2,4%	2,4%	2,4%

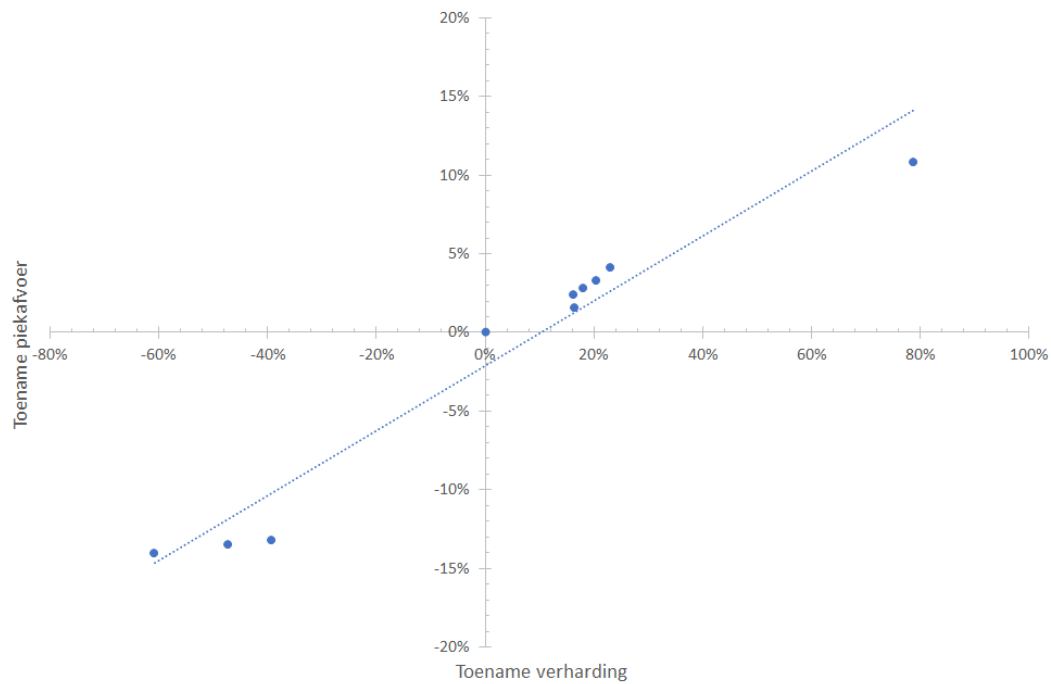
De toenames en/of afnames van de verharding, piekafvoer en laagwaterafvoer (afhankelijk van de beschouwde overschrijdingskans) staat weergegeven in Tabel 4.8 voor het verleden en in Tabel 4.9 voor het toekomstig landgebruik. Deze resultaten zijn bekomen in het vorig onderdeel voor de toekomst. De percentages voor de afname in piekafvoer zijn de mediaanwaarden van de impact factor (zie Figuur 4.22 voor de toekomst). De percentages van de toenames in laagwaterafvoer zijn voor het verleden op gelijke wijze bekomen zoals voor de toekomst (zie Tabel 4.6). Ten opzichte van 2010 zijn de toekomstige resultaten tegengesteld aan deze bekomen voor het verleden.

Vervolgens kan het verband tussen de toename/afname in verharding en de toename/afname in piekafvoer achterhaald worden, alsook het verband tussen de toename/afname in verharding en de toename/afname in laagwaterafvoer. Deze twee verbanden staan grafisch weergegeven op respectievelijk Figuur 4.27 en Figuur 4.28. Hierop is duidelijk een positieve correlatie te zien tussen de toename in verharding en de toename in piekafvoer. Een negatieve correlatie is gevonden voor de toename in verharding en de toename (afname) in laagwaterafvoer. Voor de piekafvoer en verharding is een correlatiecoëfficiënt van 0,975 bekomen. Voor de laagwaterafvoer

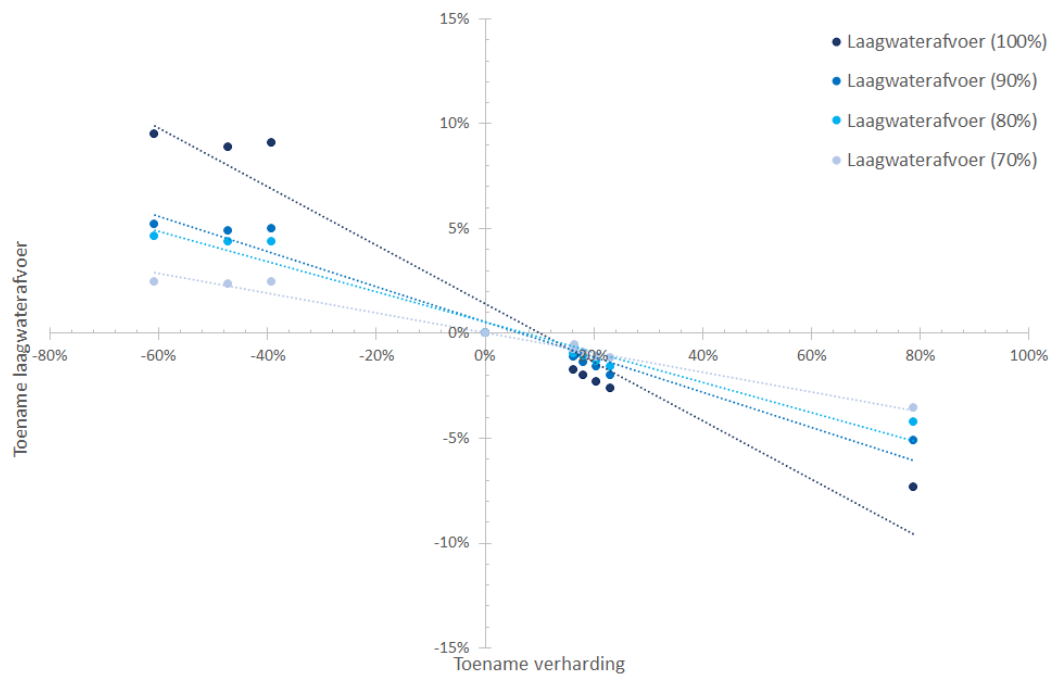
Tabel 4.9: Toename/afname van de verharding, piekafvoer en laagwaterafvoer (afhankelijk van de overschrijdingskans) voor de verschillende landgebruiksscenario's ten opzichte van de toestand in 2010.

Jaar	2050					
Scenario	Rendementskans	50% willekeur	100% willekeur	RMV - SE	RMV - RC	RMV - BAU
Opp. verharding [ha]	6651	6749	6888	7033	6665	10224
Toename verharding	16,3%	18,0%	20,4%	23,0%	16,5%	78,8%
Toename piekafvoer	2,4%	2,8%	3,3%	4,1%	1,5%	10,8%
Afname laagwaterafvoer (100%)	-1,7%	-2,0%	-2,3%	-2,6%	-1,1%	-7,3%
Afname laagwaterafvoer (90%)	-1,1%	-1,4%	-1,6%	-2,0%	-0,7%	-5,1%
Afname laagwaterafvoer (80%)	-1,0%	-1,1%	-1,3%	-1,6%	-0,6%	-4,2%
Afname laagwaterafvoer (70%)	-0,8%	-0,9%	-1,1%	-1,2%	-0,6%	-3,6%

en verharding is een correlatiecoëfficiënt van -0,975; -0,983; -0,982 en -0,991 bekomen voor een overschrijdingskans van respectievelijk 100%, 90%, 80% en 70%. Naarmate er een hogere laagwaterafvoer is beschouwd stijgt de correlatie maar de daling in laagwaterafvoer met stijgende verharding is minder sterk. Meer bepaald zal per % stijging in verharding de piekafvoer ongeveer 0,21% toenemen en de laagwaterafvoer 0,14%, 0,08%, 0,07% en 0,05% dalen voor een overschrijdingskans van respectievelijk 100%, 90%, 80% en 70%. Hierbij dient te worden opgemerkt dat de resultaten bekomen via de aangepaste modelparameters niet louter toe te schrijven zijn aan de verandering in verharding, maar ook aan ander landgebruik. De toename in stedelijk gebied en daardoor verharding heeft wel de voornaamste impact.



Figuur 4.27: Toename in verharding (horizontaal) ten opzichte van toename in piekafvoer (verticaal) voor het stroomgebied van de Grote Nete.



Figuur 4.28: Toename in verharding (horizontaal) ten opzichte van toename (afname) in laagwaterafvoer (verticaal) voor het stroomgebied van de Grote Nete.

4.4 Besluit

Dit hoofdstuk tracht een antwoord te geven op de onderzoeksvraag van deze masterproef, namelijk wat het effect is van het veranderend landgebruik door het al dan niet toepassen van de betonstop op de hydrologie. Hiervoor is de methode van de ruimtelijke disaggregatie naar voor geschoven als mogelijke methode om het veranderend landgebruik in rekening te brengen. Qua landgebruik gaat het hierbij dan om de verschillende landgebruiksscenario's zoals bekomen in hoofdstuk 3 ('Rendementskans', '50% willekeur', '100% willekeur', 'RMV - SE', 'RMV - RC' en 'RMV - BAU'). Als studiegebied is het stroomgebied van de Grote Nete gekozen.

Alvorens de methode van de ruimtelijke disaggregatie kon toegepast worden is eerst een nieuw dagelijks gebaseerd NAM-model gekalibreerd en gevalideerd. Dit NAM-model is dan gebruikt voor de ruimtelijke disaggregatie. Hiermee zijn dan de modelparameters aangepast volgens het landgebruik voor het stroomgebied van de Grote Nete. De methode van de ruimtelijke disaggregatie is dan vervolgens gevalideerd aan de hand van het landgebruik en de observaties in het verleden.

Om tot het uiteindelijke opzet van deze masterproef te komen zijn de verschillende landgebruiksscenario's (betonstopscenario's en BAU-scenario) onderworpen aan de methode van de ruimtelijke disaggregatie om zo het effect van het veranderend landgebruik te achterhalen op het stroomgebied van de Grote Nete. Met de via het landgebruik aangepaste parameters van het NAM-model is dan dezelfde tijdsreeks als voor de toestand in 2010 doorgerekend om zo de vergelijking tussen 2010 en de landgebruiksscenario's te kunnen uitvoeren.

Zoals te verwachten resulteerde dit in een toename in de piekafvoer (maxima) naargelang het beschouwde landgebruiksscenario, en een daling van de laagwaterafvoer (minima). Voor beide was het effect het grootst voor het BAU-scenario aangezien deze het meeste toename in stedelijk gebied heeft. De betonstopscenario's hadden een minder nadelig effect. Voor het stroomgebied van de Grote Nete was het scenario 'RMV - RC' het minst nadelig, terwijl 'RMV - SE' meer nadelig was. De eigen aangemaakte betonstopscenario's lagen hier tussenin volgens de hoeveelheid willekeur waarmee rekening is gehouden. De invloed op de jaarlijkse totalen was miniem. De terugkeerperiode zullen verkorten voor hetzelfde afvoerdebiet ten opzichte van de toestand in 2010. Tenslotte is ook nog een positieve correlatie gevonden tussen de toename in verharding en de toename in piekafvoer. Ook is er een negatieve correlatie gevonden tussen de toename in verharding en de toename (afname) in laagwaterafvoer.

Tot slot dient er nog te worden opgemerkt dat de bekomen resultaten geldig zijn voor het stroomgebied van de Grote Nete. Deze kunnen een indicatie geven voor de hele oppervlakte van Vlaanderen, maar zijn afhankelijk van het landgebruiksscenario en hoe dat deze zich zal vertalen naar een verandering binnenin de oppervlakte van het beschouwde stroomgebied zelf.

Hoofdstuk 5

Algemene conclusie & discussie

In dit laatste hoofdstuk zal de algemene conclusie van deze masterproef gevormd worden met betrekking tot de bekomen resultaten. Ook zullen de aannames en mogelijke tekortkomingen bediscussieerd worden met zicht op mogelijks verdergaand onderzoek hieromtrent.

5.1 Conclusie

Als voornaamste startpunt voor deze masterproef is het Witboek Ruimte Vlaanderen genomen, waarin de hele omkadering van de Vlaamse Regering omtrent de ruimtelijke ordening staat uiteengezet. Hierin valt één specifieke grafiek en doelstelling op, namelijk die van de terugdringing van de dagelijkse toename van het ruimtebeslag (zie Figuur 2.1) [Ruimte Vlaanderen, 2016]. Deze te behalen maatregel staat beter bekend als de betonstop en vormt de belangrijkste randvoorwaarde voor deze masterproef. In het Witboek zijn de doelstellingen uiteengezet maar ontbreekt een landgebruiksscenario voor het toepassen van de betonstop.

Aangezien er in deze masterproef onderzocht wordt welke de impact gaat zijn op de hydrologie van het realiseren van de betonstop en het landgebruik hiervoor de voornaamste invloed zal hebben, is het noodzakelijk om een landgebruiksscenario of meerdere te verkrijgen die de betonstop trachten te omschrijven. Dit is uitgevoerd in hoofdstuk 3 waarin er vertrokken is met de bestaande landgebruikskaarten en scenario's te vergelijken en hun mogelijkheid om als basis te dienen voor de eigen aangemaakte betonstopscenario's te achterhalen. Uiteindelijk is er gekozen om te vertrekken vanuit de landgebruikskaarten van het Ruimtemodel Vlaanderen (na omzetting) omdat deze recenter zijn en de definitie van het ruimtebeslag, dat als basis dient voor het toekomstig landgebruik voor de betonstop, hierbij eenduidiger te omschrijven is [VITO, 2018].

Hoe dat de maximaal toegelaten bijkomende oppervlakte aan ruimtebeslag ('Built-up land' na omzetting voor de landgebruikskaarten) dan dient te worden toegekend over de hele oppervlakte van Vlaanderen is de volgende stap. Hiervoor zijn er drie scenario's bekomen waarbij de rendementskaart een voorname in rol in speelt [Verachtert et al., 2016]. Verder is er ook nog rekening gehouden met een vorm

van willekeur. Dit resulteerde in de scenario's 'Rendementskans', '50% willekeur' en '100% willekeur'. Vanuit het Ruimtemodel Vlaanderen zijn er dan nog twee scenario's die onder de maximaal toelaatbare oppervlakte van ruimtebeslag blijven en dus ook als mogelijk scenario voor de betonstop zijn beschouwd ('RMV - SE' en 'RMV - RC') [VITO, 2018]. Ten slotte zijn er nog drie scenario's voor de verharding bepaald bij toepassen van de betonstop. Voor het BAU-scenario kon de verharding bekomen worden door eenvoudige lineaire regressie.

Uiteindelijk zijn er dan in totaal zes landgebruiksscenario's waarmee verder zal gerekend worden voor de hydrologische modellering. Vijf hiervan dienen als mogelijk scenario voor de betonstop en één hiervan is het BAU-scenario komende van het Ruimtemodel Vlaanderen. Deze landgebruiksscenario's zijn onderling dan ook nog vergeleken op vlak van centraliteit en de kernvorming. Hierbij heeft elk scenario zijn eigenschappen en zijn de scenario's 'Rendementskans' en 'RMV - SE' als meest gunstig voor de 'verkerning' van Vlaanderen naar voren gekomen, wat ook een doelstelling is in het Witboek om zo meer open ruimte te creëren [Ruimte Vlaanderen, 2016].

Deze landgebruiksscenario's zijn dan verder gebruikt voor de hydrologische modellering waarbij er gekozen is om het stroomgebied van de Grote Nete als studiegebied te nemen. Het toekomstig landgebruik komende van de verschillende landgebruiksscenario's (2050) voor dit stroomgebied is dan ook gekend. De methode van de ruimtelijke disaggregatie is voorgesteld als methode om het veranderend landgebruik in te brengen in de hydrologie via het aanpassen van de modelparameters (in dit geval het NAM-model).

Omdat de methode van de ruimtelijke disaggregatie nog niet is toegepast geweest voor het inbrengen van toekomstig landgebruik is deze methode eerst gestaafd geweest via het landgebruik en geobserveerde debieten voor het stroomgebied van de Grote Nete uit het verleden (1988, 2000) [Poelmans, 2010, Vlaamse Milieumaatschappij, 2018]. Hiervoor diende eerst een nieuw dagelijks NAM-model te worden gekalibreerd en gevalideerd voor de periode rondom 2010. De modelparameters van het NAM-model voor 2010 zijn dan aangepast via het landgebruik uit het verleden en de gesimuleerde debieten vergeleken met de observaties uit het verleden.

Na validatie van de methode van de ruimtelijke disaggregatie is deze toegepast op de zes landgebruiksscenario's. De verandering in het landgebruik voor elk scenario zal zich vertalen naar een verandering in de modelparameters door het toepassen van de ruimtelijke disaggregatie. De veranderde modelparameters resulteren dan in een toename in de piekafvoer voor alle scenario's en het sterkst, zoals te verwachten, voor het BAU-scenario. Ook zal er een daling optreden in de laagwaterafvoer, waarvoor eveneens het BAU-scenario het sterkste verschil geeft ten opzichte van de toestand in 2010. Verder is er nog een positieve correlatie gevonden tussen de toename in verharding en de piekafvoer, en een negatieve correlatie voor de toename in verharding en laagwaterafvoer.

Uit bovenstaande resultaten volgt dan duidelijk het gunstig effect van het realiseren van de betonstop op de hydrologie en meer bepaald de rivieroverstromingen, in

vergelijking met het BAU-scenario. Dit is hoofdzakelijk te wijten aan het feit dat er bij het BAU-scenario meer bebouwde oppervlakte zal bijkomen in vergelijking met de betonstopscenario's. Via de bovenstaande resultaten kan dus geconcludeerd worden dat het uitvoeren van de betonstop wel degelijk zijn nut heeft in het beperken van rivieroverstromingen.

5.2 Discussie

De hierboven kort besproken resultaten geven een antwoord op de onderzoeksvraag van deze masterproef, namelijk het achterhalen van het effect op de hydrologie van het al dan niet toepassen van de betonstop. Alle landgebruiksscenario's geven een stijging in piekafvoer en een daling in de laagwaterafvoer voor het stroomgebied van de Grote Nete, maar de grootteorde ervan is verschillend. Zo zal het BAU-scenario een beduidend negatievere impact hebben op de piekafvoer en laagwaterafvoer. Alle landgebruiksscenario's kennen een toename in stedelijk gebied, maar voor het BAU-scenario is deze het sterkst wat de bekomen resultaten verklaard. Het terugdringen van de dagelijkse toename in ruimtebeslag heeft een gunstig effect op de hydrologie in vergelijking met het BAU-scenario. Dit zal leiden tot kleinere stijging in piekafvoer, en dus minder rivieroverstromingen, en een kleinere daling in laagwaterafvoer wat zorgt voor minder droogtes. Dit is ook zichtbaar in de verkleining van de terugkeerperiodes ten opzichte van 2010 voor hetzelfde afvoerdebiet. De bekomen resultaten stemmen overeen met de ondervindingen in de literatuur (zie hoofdstuk 2).

Bij het aanmaken van de landgebruiksscenario's zijn, zoals eerder aangehaald, verschillende steeds onderbouwde aannames noodzakelijk geweest gezien de omvang van deze thesis. Het bekomen toekomstig landgebruik is maar een benadering van wat zich werkelijk kan gaan voordoen bij het uitvoeren van de betonstop. Een meer gedetailleerd model voor het voorspellen van het toekomstig landgebruik kan een eerste suggestie voor toekomstig onderzoek zijn (Geomod [Poelmans, 2010]). Hierbij kan er gewerkt worden met een kaart die de geschiktheid van de verandering naar stedelijk gebied weergeeft (in deze masterproef de rendementskaart [Verachtert et al., 2016]) in combinatie met andere aspecten die doorwegen op de 'beslissing' van het al dan niet omvormen van de beschouwde rastercel (bv.: wegennetwerk, werkzekerheid,...). In dit opzicht zijn de meer gedetailleerde landgebruikskaarten van het Ruimtemodel Vlaanderen beschikbaar, waarvan er twee zijn weerhouden voor verder gebruik in deze masterproef [VITO, 2018].

Na het afronden van de GIS-analyse van deze masterproef (hoofdstuk 3), is duidelijk geworden dat er een gelijkaardige omzetting van het Ruimtemodel Vlaanderen is uitgevoerd geweest naar het ruimtebeslag (wel met een andere definitie en rekening houden met het Brussels Hoofdstedelijk Gewest) [Engelen, 2016]. Een mogelijkheid zou zijn om deze op te vragen en hiermee verder te werken, maar gezien de eigen omzetting tot benadering van het ruimtebeslag logisch is opgebouwd en de totale oppervlakte goed benaderd is hiermee verder gewerkt, ook om te grote overschattingen voor het stroomgebied van de Grote Nete te vermijden (militaire voorzieningen). Ook

hiervoor geldt de suggestie tot verder onderzoek bij het opmaken van nauwkeurigere voorspellingen voor het landgebruik bij toepassen van de betonstop.

Net zoals voor het landgebruik zijn er aannames gemaakt voor de toename in verharding te bekomen voor het realiseren van de betonstop. Hierbij is telkens aangenomen dat er een toename is in verharding, en er dus geen maatregelen zijn genomen die ertoe zouden leiden dat er in feite geen verharding meer bijkomt ten opzichte van de huidige toestand. Bij het finaliseren van de hydrologische modellering is duidelijk geworden dat ernaar gestreefd wordt binnen de Vlaamse Regering om dit in kader van de betonstop wel effectief te realiseren. Dit betekent dat de verharding constant blijft op ongeveer 14% en er dus meer maatregelen naar het bevorderen van infiltratie toe zullen genomen worden. In deze masterproef is in tegenstelling tot bovenstaande wel gerekend met een toename in verharding.

Aangezien de methode van de ruimtelijke disaggregatie gebaseerd is op het landgebruik van een bepaald stroomgebied, is het percentage van verharding en de invloed ervan op de hydrologie niet eenduidig bepaald. De methode van de ruimtelijke disaggregatie baseert zich op het stedelijk landgebruik en de parameters worden hierop aangepast zonder effectief rekening te houden met de hoeveelheid verharding dat dit landgebruik kent. Hiermee is wel rekening gehouden bij het bepalen van de oppervlakteafstromingscoëfficiënt waarbij het percentage verharding binnen het stedelijk landgebruik wel een invloed heeft. Het verschil met de bekomen effecten van het toepassen van de betonstop op de hydrologie waarbij er gerekend is met een toename in verharding in vergelijking met een constante verharding zal dus eerder klein zijn. Dit omdat voor de meeste parameter enkel de toename van het stedelijk landgebruik van belang is en deze voor beide hetzelfde is. Enkel voor de oppervlakte afstromingscoëfficiënt zal er een verschil zijn. De bekomen resultaten geven dus een lichte overschatting van het effect van de realisatie van de betonstop op de hydrologie.

De methode van de ruimtelijke disaggregatie is afhankelijk van de gebruikte landgebruikskaart en hoe dat deze zich zal vertalen naar de verandering van de parameters toe. Ook is deze methode in deze masterproef slechts beperkt toegepast, namelijk zonder het volledig uitvoeren van de 'spatial linking'. Een tweede suggestie voor verder onderzoek bestaat er dan ook in om voor het stroomgebied van de Grote Nete de volledige methode van de ruimtelijke disaggregatie toe te passen en deze te vergelijken met de resultaten bekomen in deze masterproef, gebruik makend van dezelfde landgebruiksscenario's. De resultaten zouden gelijkaardig moeten zijn.

In deze masterproef is de methode van de ruimtelijke disaggregatie enkel toegepast op het stroomgebied van de Grote Nete. Daardoor is het aan te raden om deze methode op meerdere rivierbekkens toe te passen waar de meetgegevens dit toelaten. Dit laat toe om de methode van de ruimtelijke disaggregatie beter te staven, alsook om het effect van de betonstop op meerdere rivierbekkens in Vlaanderen te achterhalen, waar dit nu enkel het stroomgebied van de Grote Nete is. Dit neemt ook het probleem weg dat een landgebruiksscenario verschillend is naar de invulling toe van het ene stroomgebied ten opzichte van het andere stroomgebied. Zo is voor het stroomgebied van de Grote Nete de sterkte van het effect op de hydrologie voor

de betonstopscenario's van laag naar hoog 'RMV - SE', 'Rendementskans', '50% willekeur', '100% willekeur' en 'RMV - SE'. Dit valt hoofdzakelijk te verklaren door de oppervlakte van het stedelijk gebied ('Built-up land') voor elk scenario binnen het stroomgebied van de Grote Nete dat dezelfde volgorde in grootte van oppervlakte heeft. Als dezelfde rangschikking wordt gemaakt voor heel Vlaanderen, rekening houdend met de totale oppervlakte van het stedelijk gebied in heel Vlaanderen, is dit 'RMV - SE', 'RMV - SE', 'Rendementskans', '50% willekeur' en '100% willekeur'. Ook de andere landgebruiksklassen kunnen hierop hun invloed hebben (bos ed.).

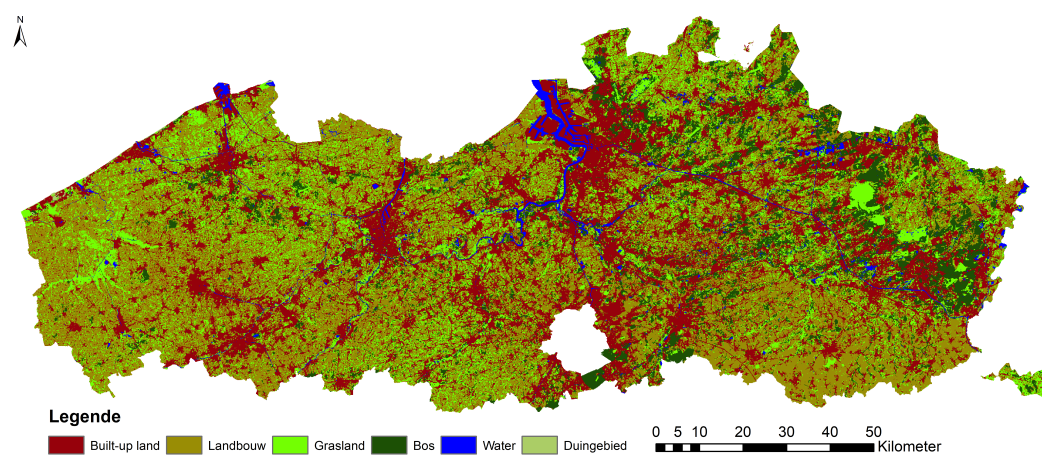
Een derde suggestie voor verder onderzoek bestaat erin om het effect van mitigerende maatregelen verder te achterhalen. Dit kadert dan ook opnieuw in het hierboven aangehaalde aspect met betrekking tot het realiseren van geen bijkomende verharding met uitvoering van de betonstop. Hieronder vallen dan de bronmaatregelen zoals meer infiltratievoorzieningen alsook retentiemaatregelen aan de waterlopen en afwateringsvoorzieningen zelf. Al deze maatregelen vallen dan onder het vooropgestelde groenblauwe netwerk (en realisatie van meer geconnecteerde open ruimtes) dat onderdeel is van de doelstellingen in het Witboek [Ruimte Vlaanderen, 2016]. Deze komen in deze masterproef niet aan bod.

Een vierde en laatste suggestie voor verder onderzoek is het inschatten van het effect van de klimaatverandering op de hydrologie met en zonder realiseren van de betonstop. In de literatuurstudie (zie hoofdstuk 2) zijn in deze masterproef wel al de ondervindingen wereldwijd omtrent de impact van de klimaatverandering, al dan niet in combinatie met veranderend landgebruik, beschouwd geweest. In de meeste gevallen leidt het gecombineerd effect van toename in stedelijk gebied en klimaatverandering tot een grotere stijging in piekafvoer en daling in laagwaterafvoer, afhankelijk van het beschouwde klimaatscenario [Poelmans et al., 2011]. Verder onderzoek kan hierbij de impact van de klimaatverandering begroten op de rivieroverstromingen in kader van de betonstop.

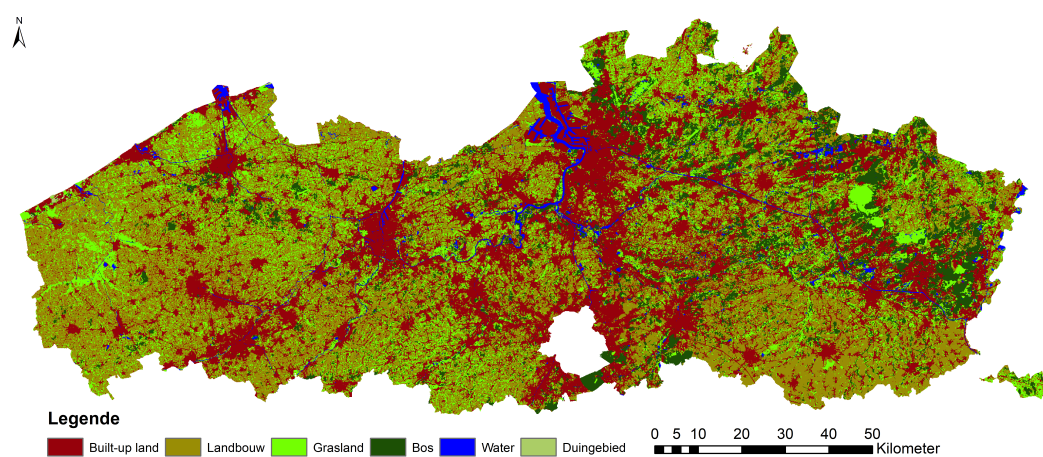
Bijlagen

Bijlage A

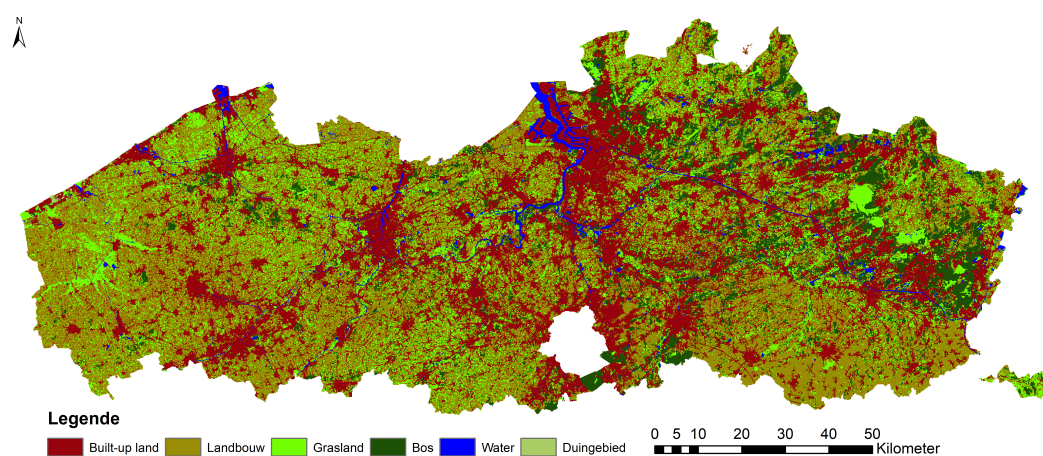
Landgebruikskaarten Vlaanderen



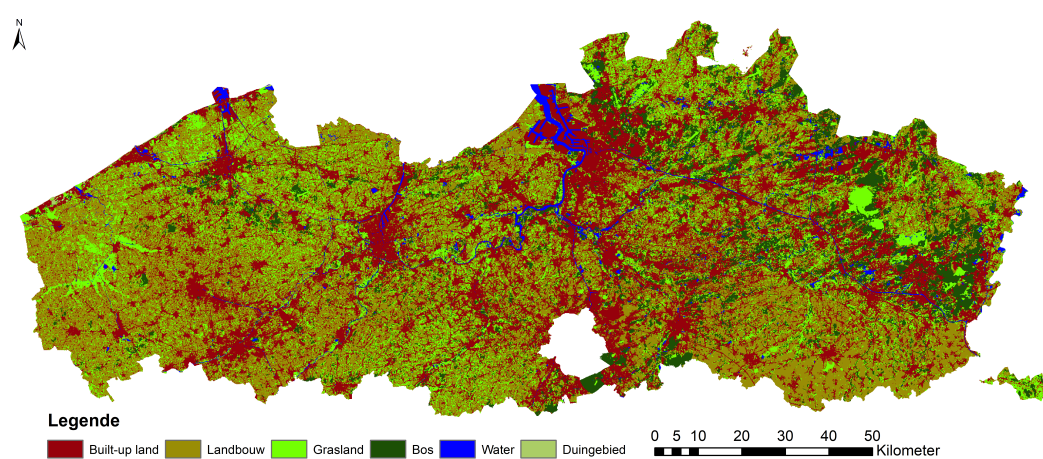
Figuur A.1: Landgebruik Vlaanderen huidige toestand (2010).



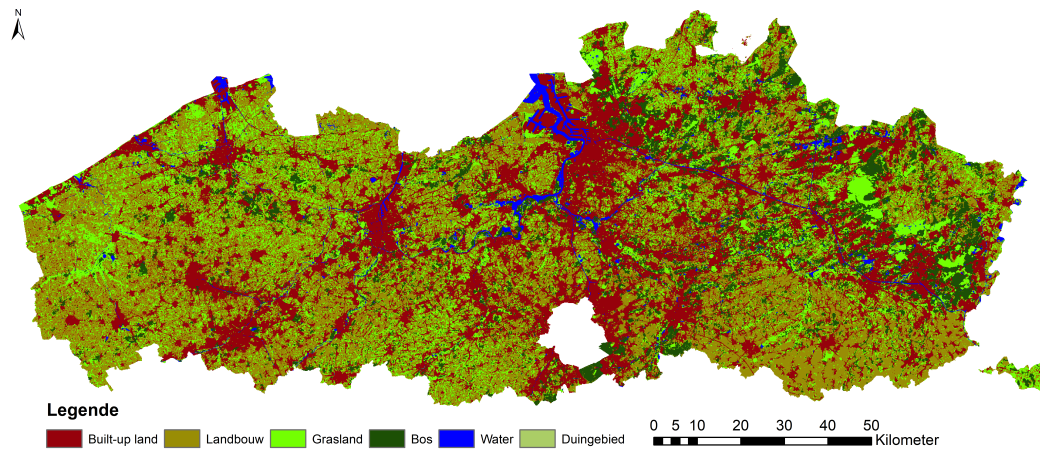
Figuur A.2: Landgebruik Vlaanderen scenario 'Rendementskans' (2050).



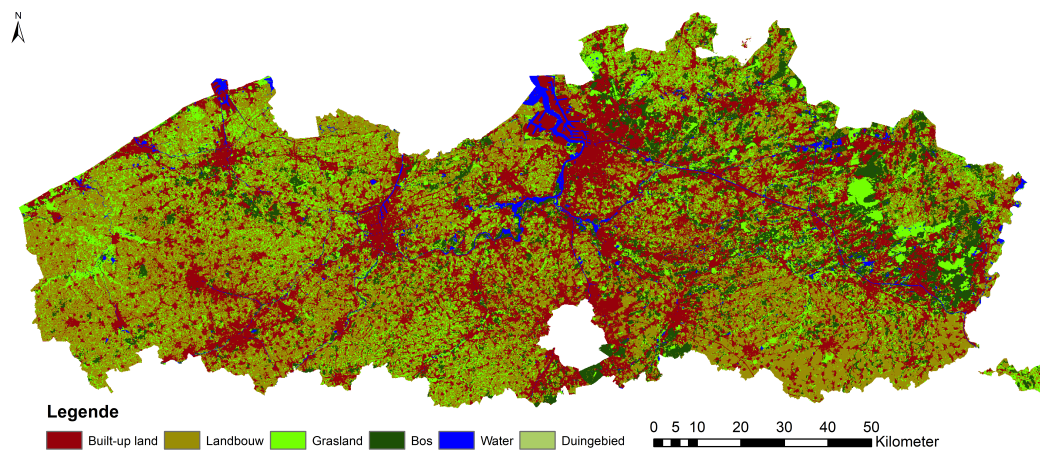
Figuur A.3: Landgebruik Vlaanderen scenario '50% willekeur' (2050).



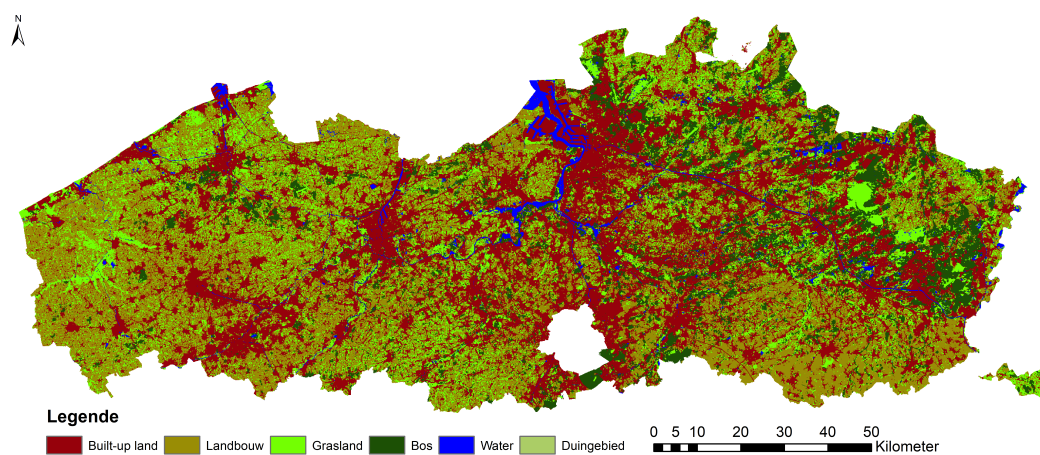
Figuur A.4: Landgebruik Vlaanderen scenario '100% willekeur' (2050).



Figuur A.5: Landgebruik Vlaanderen scenario 'RMV - SE' (2050).



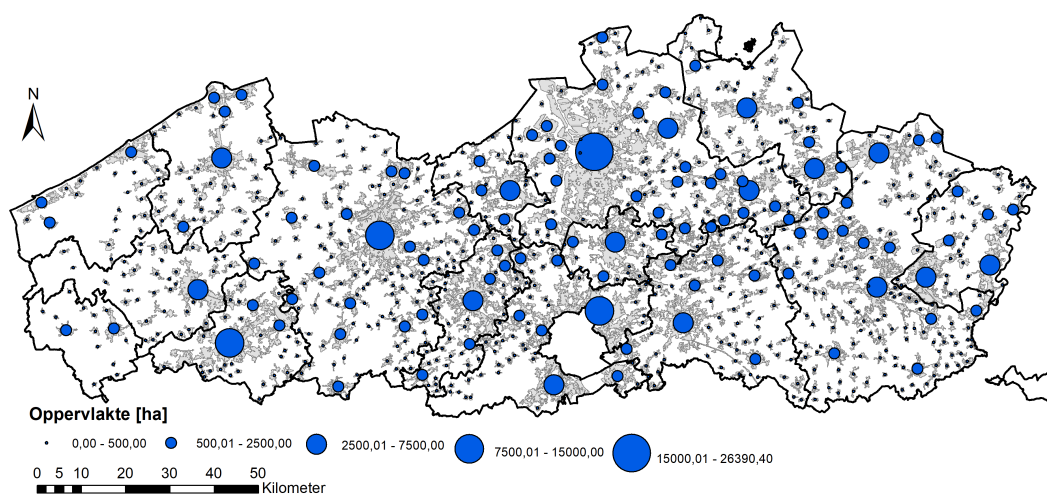
Figuur A.6: Landgebruik Vlaanderen scenario 'RMV - RC' (2050).



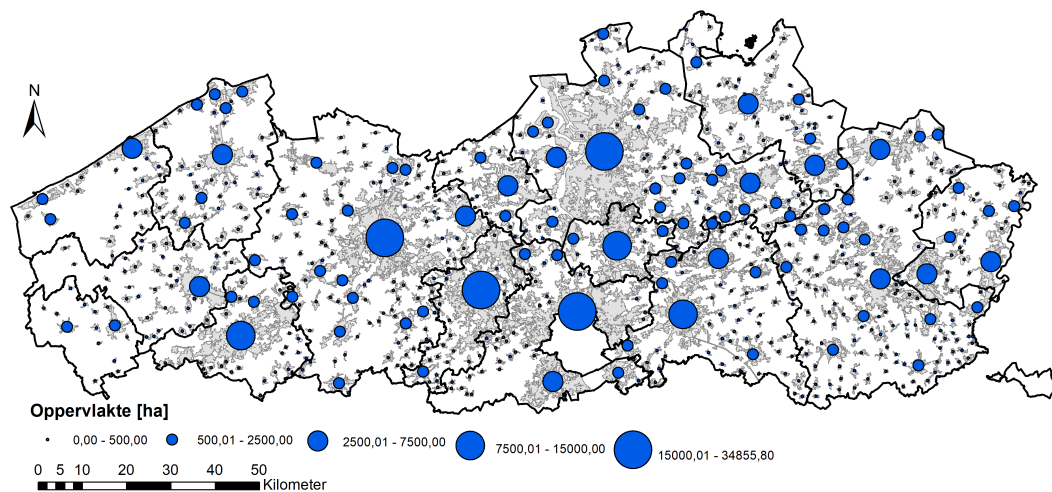
Figuur A.7: Landgebruik Vlaanderen scenario 'RMV - BAU' (2050).

Bijlage B

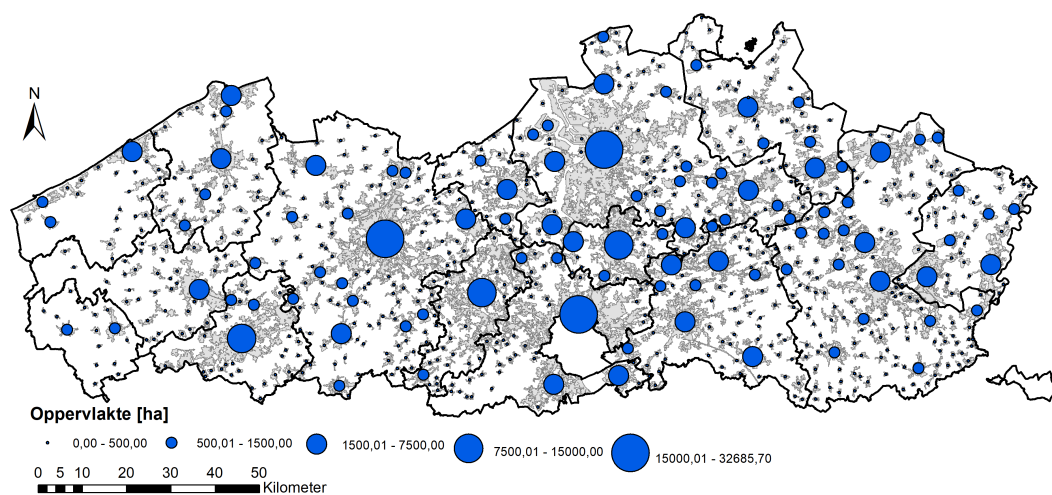
Analyse landgebruikskaarten Vlaanderen



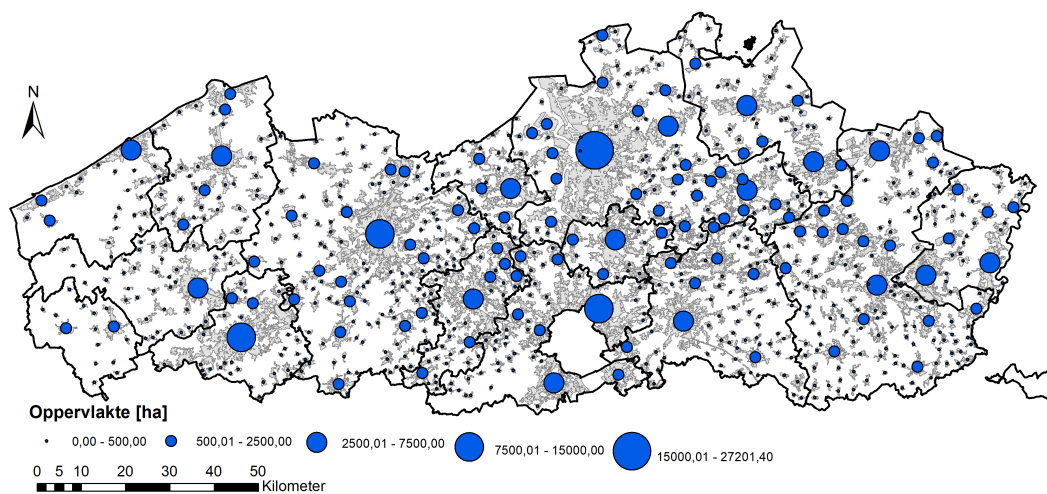
Figuur B.1: Oppervlaktes bij de afzonderlijke kernen voor de huidige toestand (2010).



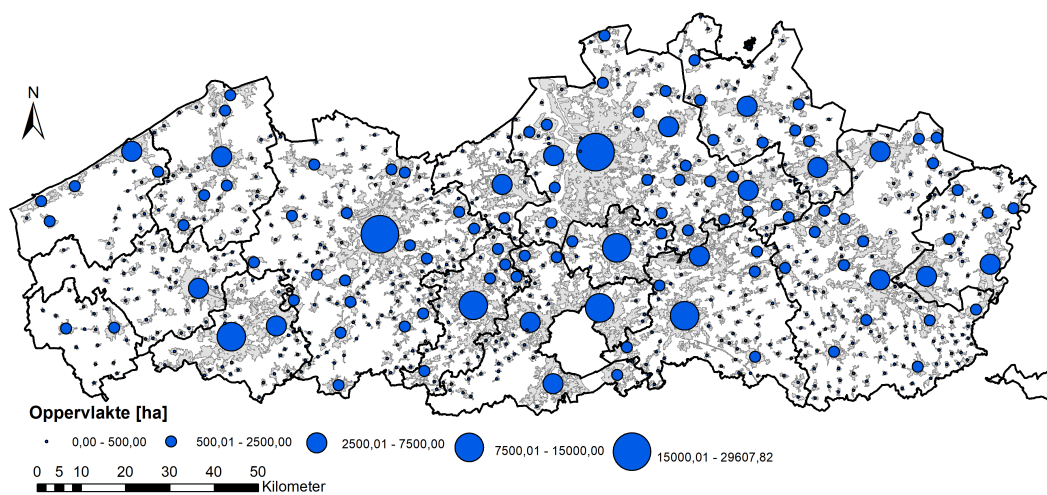
Figuur B.2: Oppervlaktes bij de afzonderlijke kernen voor het scenario 'Rendementskans' (2050).



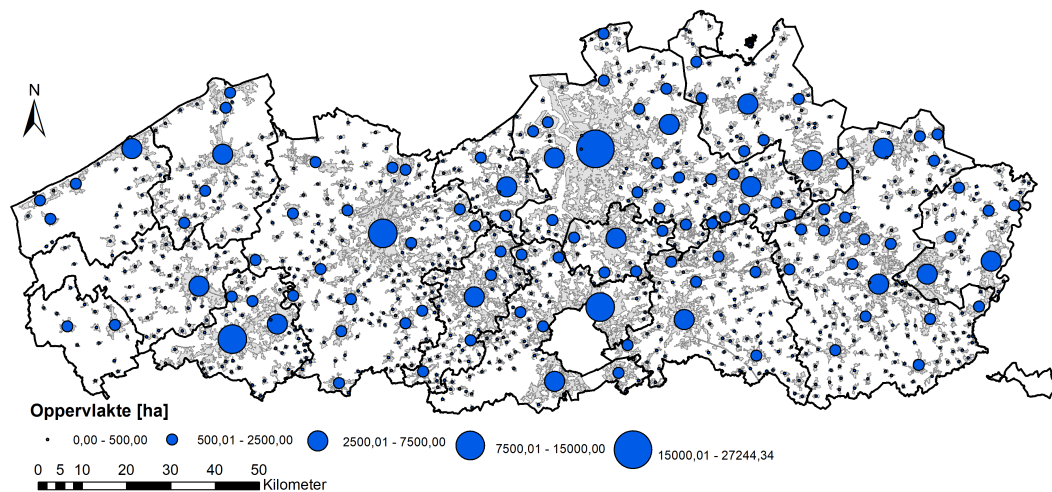
Figuur B.3: Oppervlaktes bij de afzonderlijke kernen voor het scenario '50% willekeur' (2050).



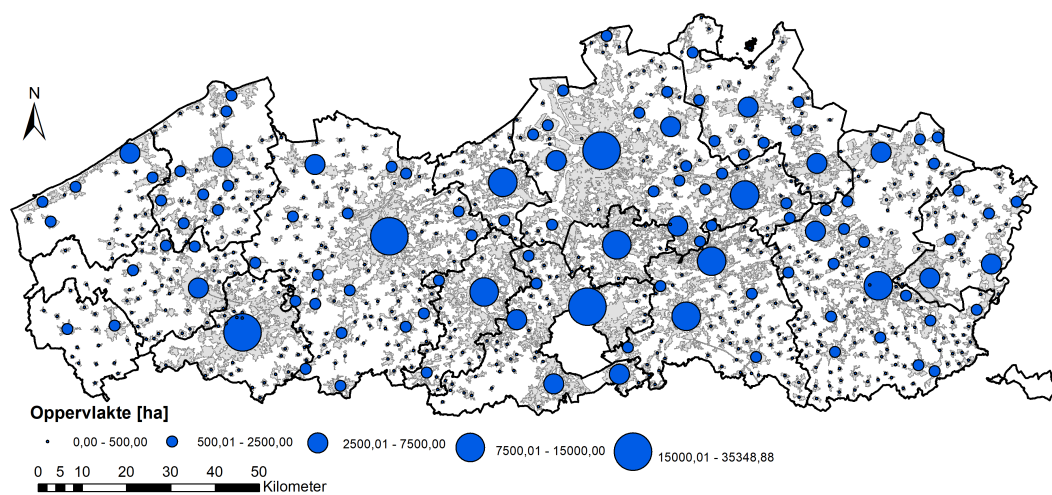
Figuur B.4: Oppervlaktes bij de afzonderlijke kernen voor het scenario '100% willekeur' (2050).



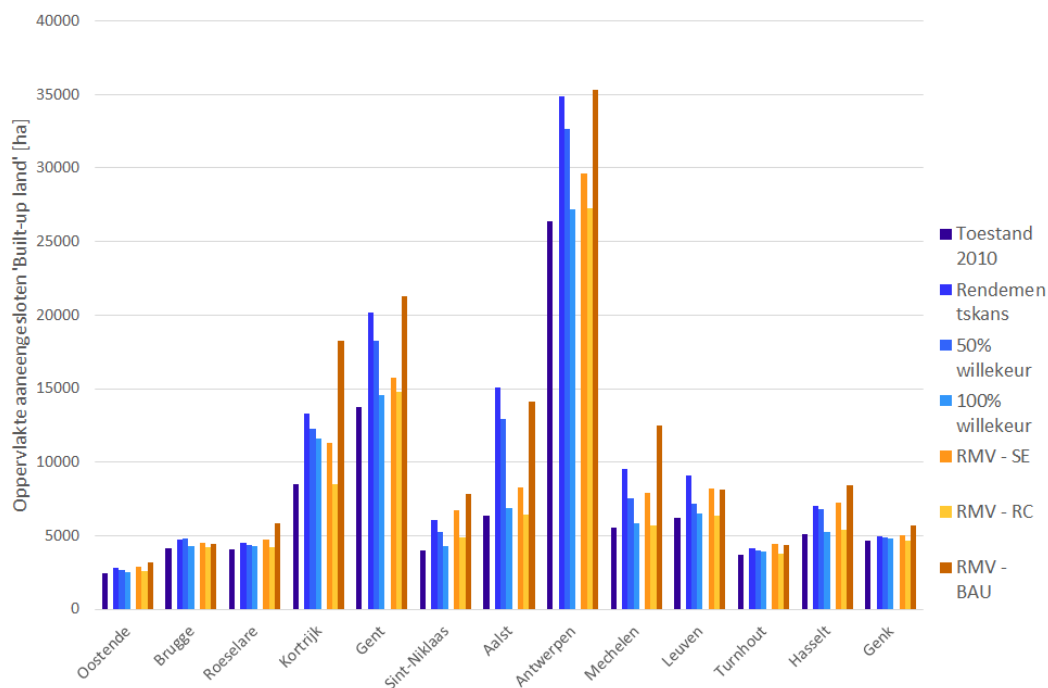
Figuur B.5: Oppervlaktes bij de afzonderlijke kernen voor het scenario 'RMV - SE' (2050).



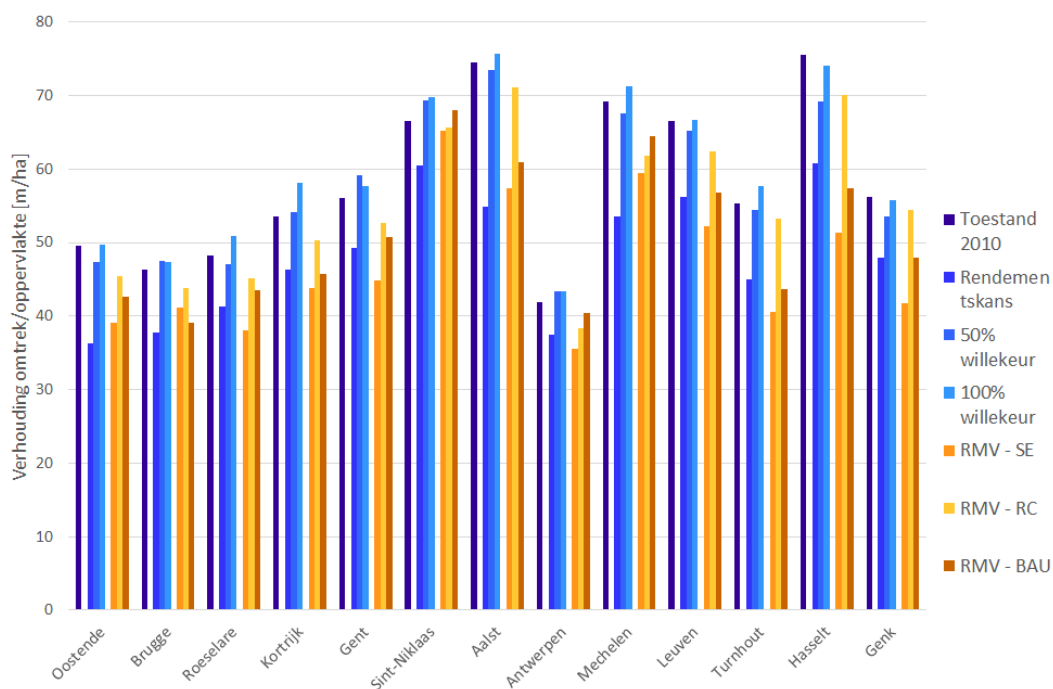
Figuur B.6: Oppervlaktes bij de afzonderlijke kernen voor het scenario 'RMV - RC' (2050).



Figuur B.7: Oppervlaktes bij de afzonderlijke kernen voor het scenario 'RMV - BAU' (2050).



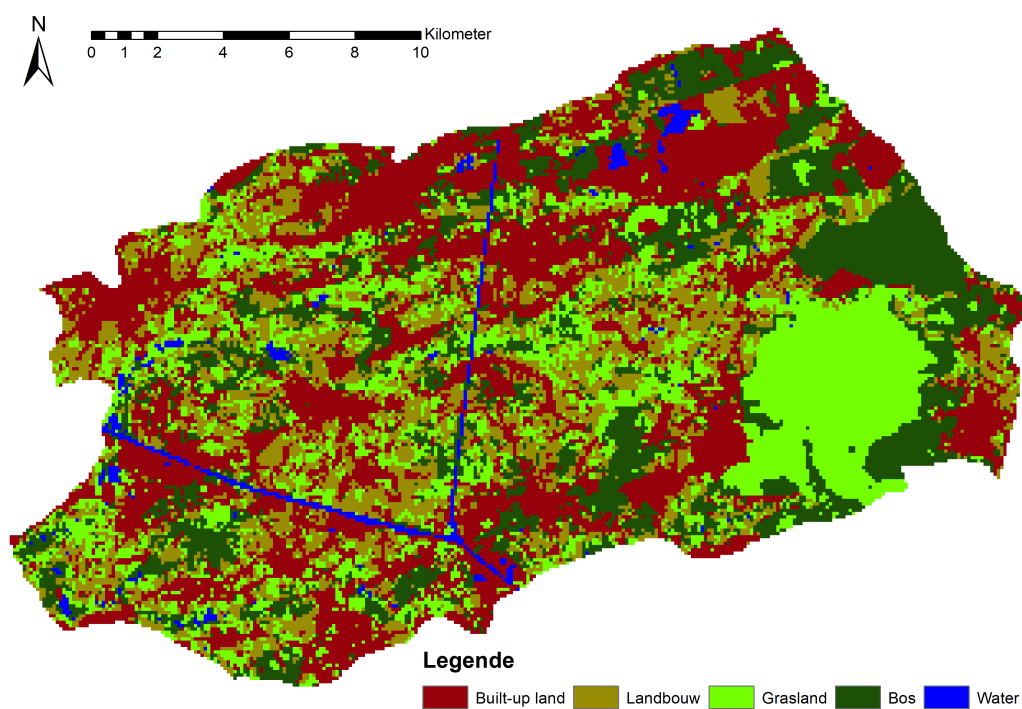
Figuur B.8: Oppervlaktes van 'Built-up land' aangesloten bij de centrumsteden voor de huidige toestand en de verschillende landgebruiksscenario's.



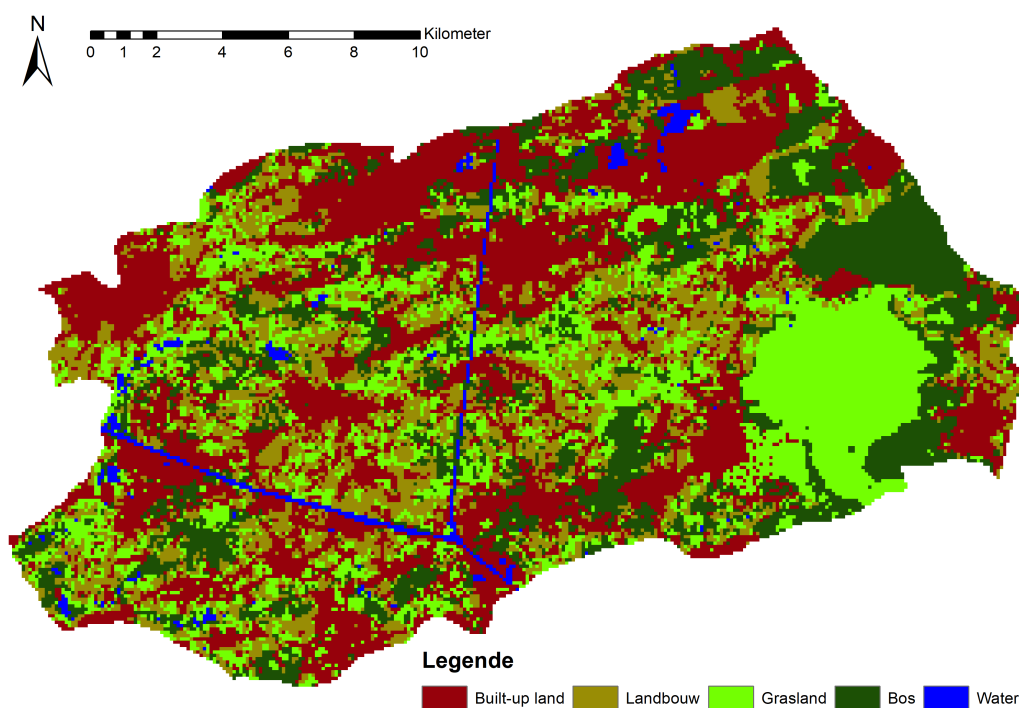
Figuur B.9: Verhouding omtrek/oppervlakte voor de centrumsteden voor de huidige toestand en de verschillende landgebruiksscenario's.

Bijlage C

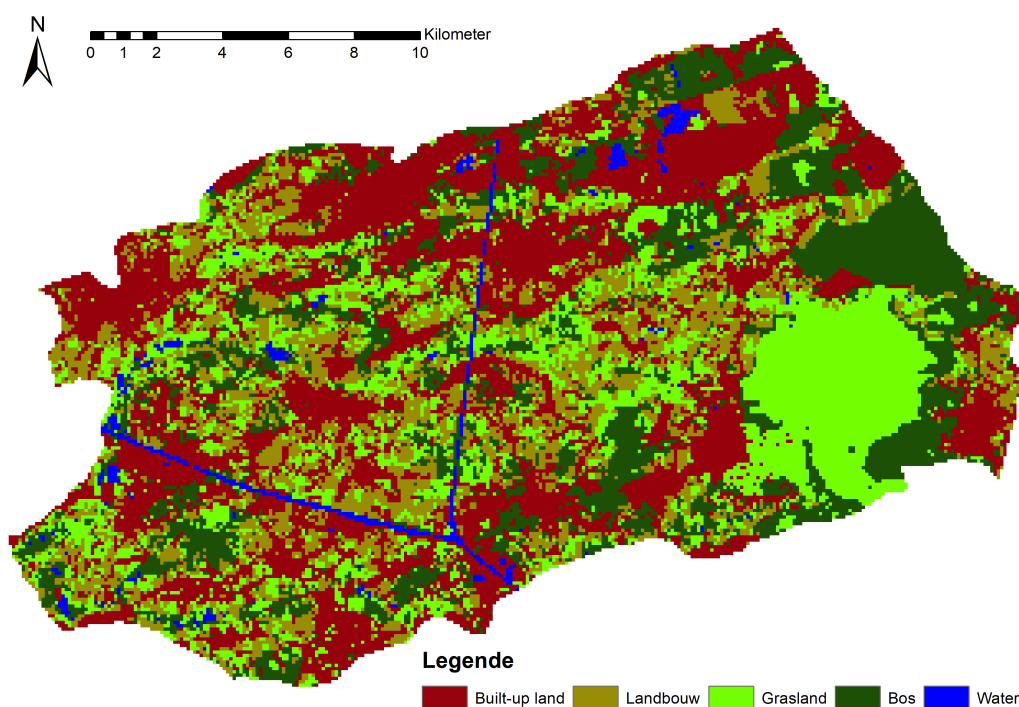
Landgebruikskaarten stroomgebied Grote Nete



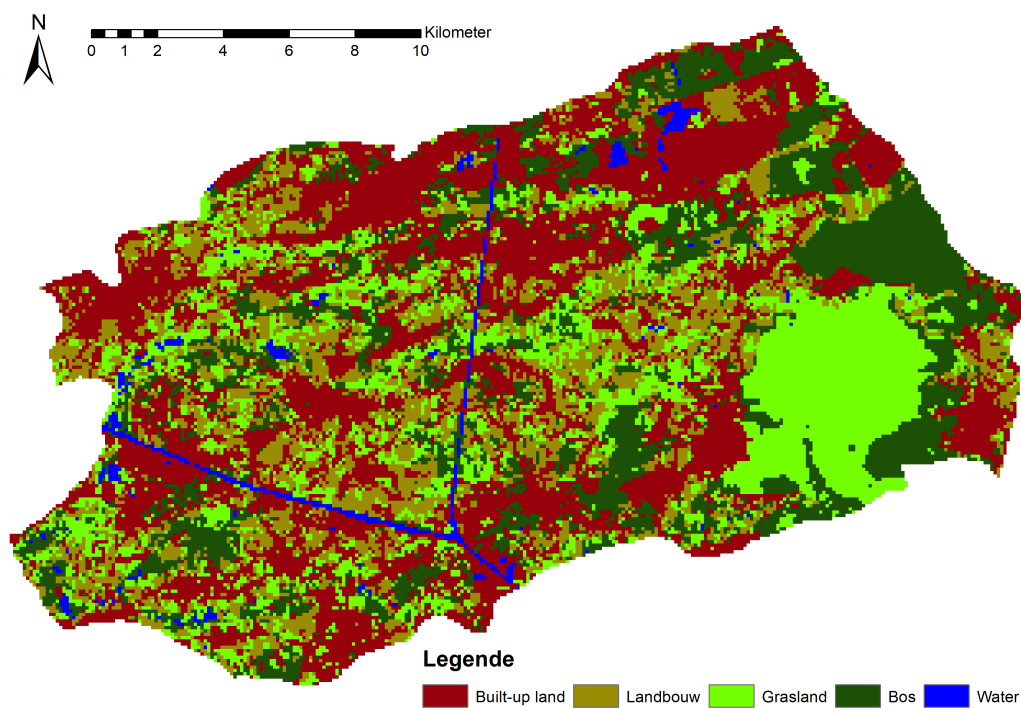
Figuur C.1: Landgebruik voor het stroomgebied van de Grote Nete voor de huidige toestand (2010).



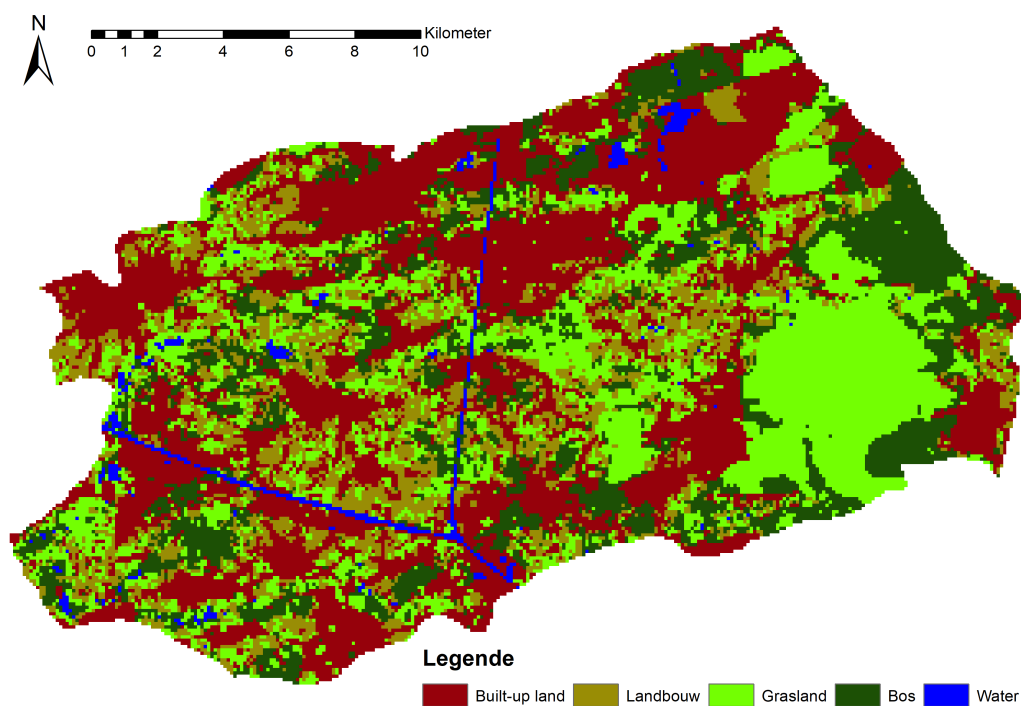
Figuur C.2: Landgebruik voor het stroomgebied van de Grote Nete voor het scenario 'Rendementskans' (2050).



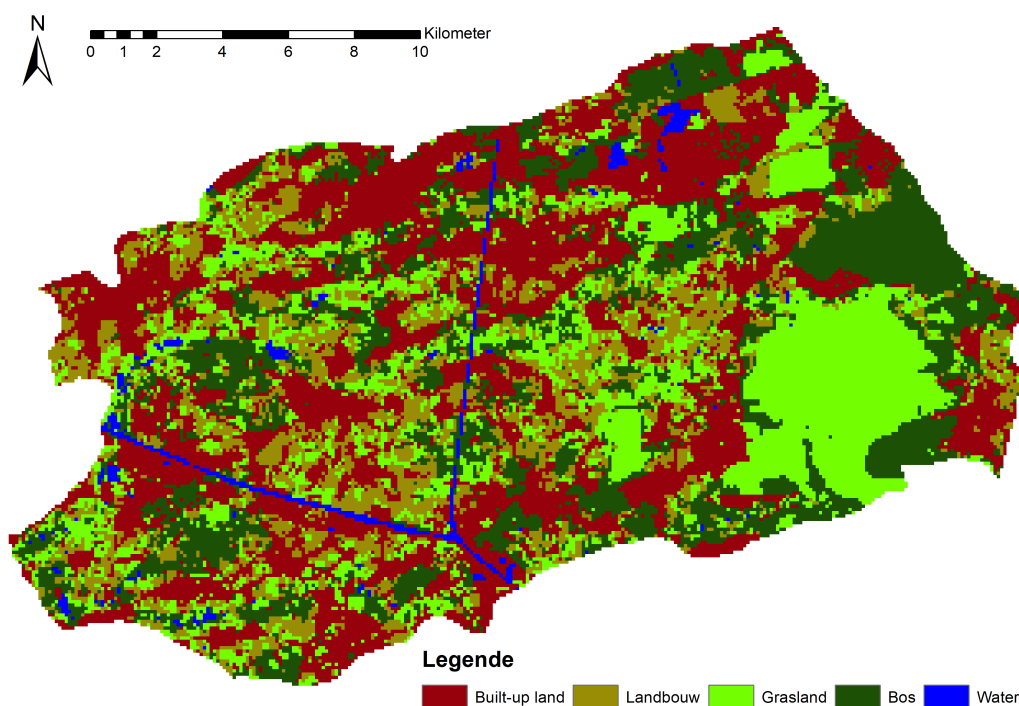
Figuur C.3: Landgebruik voor het stroomgebied van de Grote Nete voor het scenario '50% willekeur' (2050).



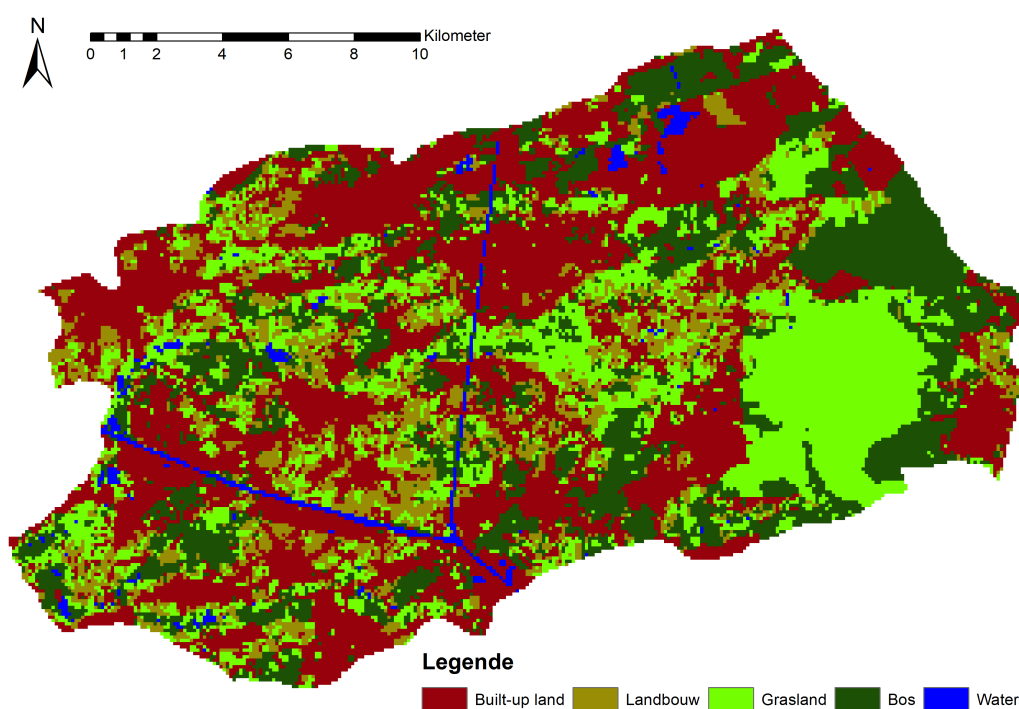
Figuur C.4: Landgebruik voor het stroomgebied van de Grote Nete voor het scenario '100% willekeur' (2050).



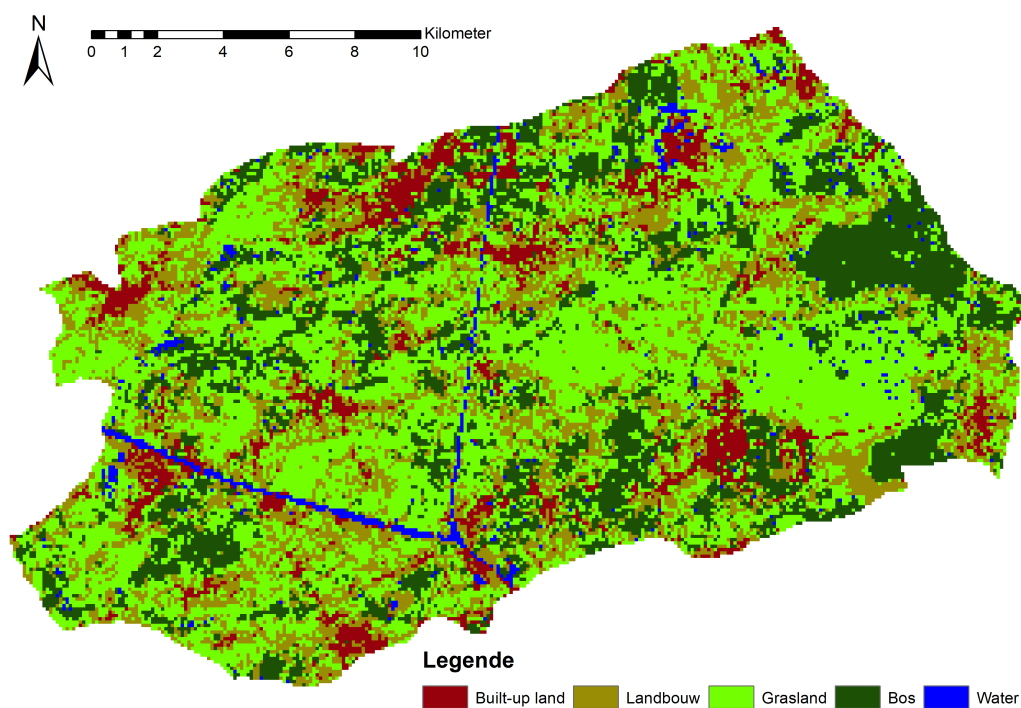
Figuur C.5: Landgebruik voor het stroomgebied van de Grote Nete voor het scenario 'RMV - SE' (2050).



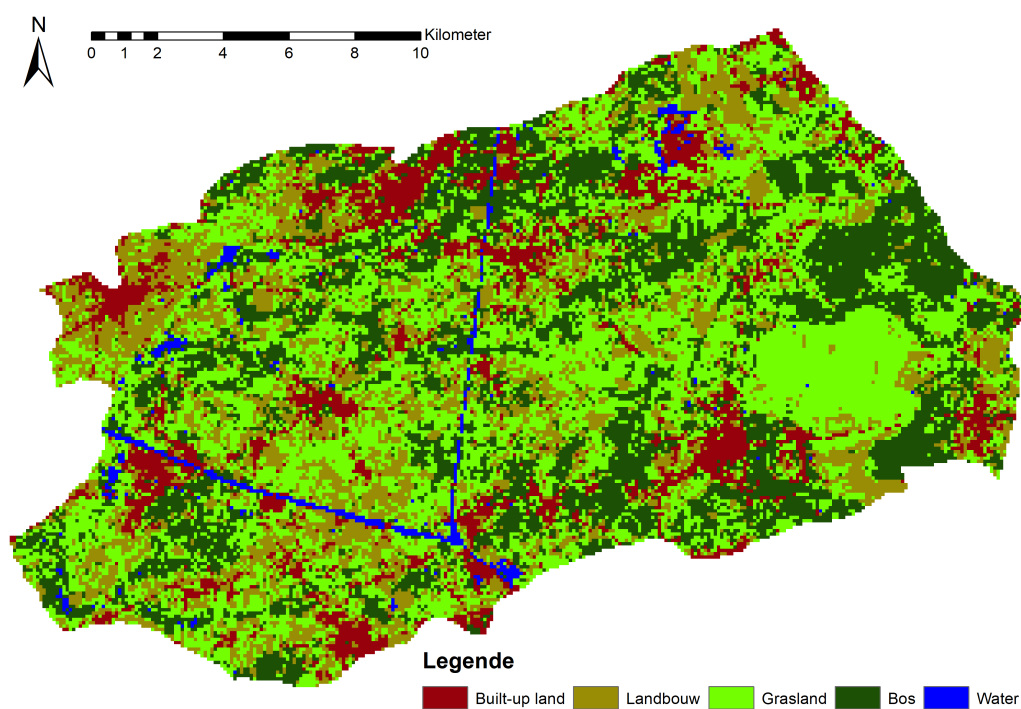
Figuur C.6: Landgebruik voor het stroomgebied van de Grote Nete voor het scenario 'RMV - RC' (2050).



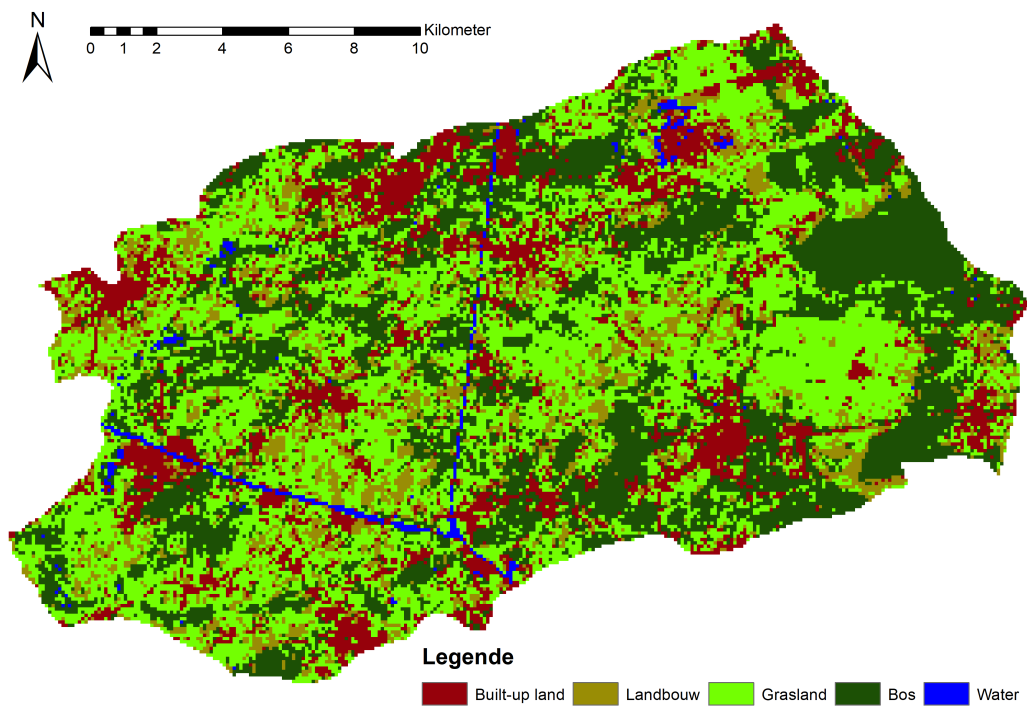
Figuur C.7: Landgebruik voor het stroomgebied van de Grote Nete voor het scenario 'RMV - BAU' (2050).



Figuur C.8: Landgebruikskartaar for the stroomgebied van de Grote Nete in 1976 [Poelmans, 2010] (eigen verwerking).



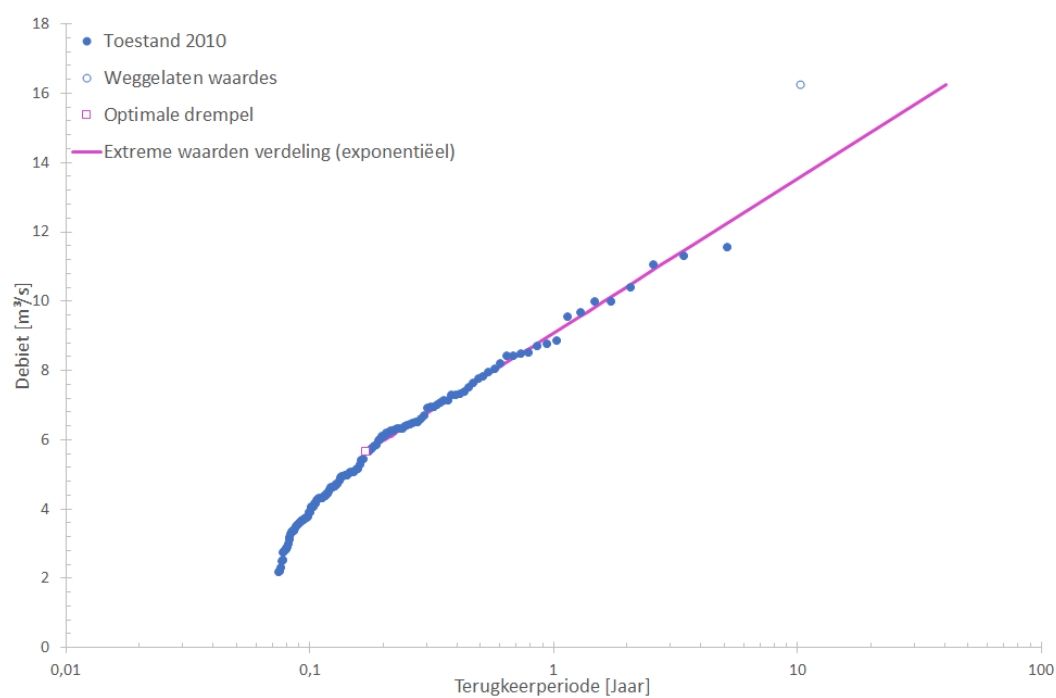
Figuur C.9: Landgebruikskartaar for the stroomgebied van de Grote Nete in 1988 [Poelmans, 2010] (eigen verwerking).



Figuur C.10: Landgebruiksk kaart voor het stroomgebied van de Grote Nete in 2000 [Poelmans, 2010] (eigen verwerking).

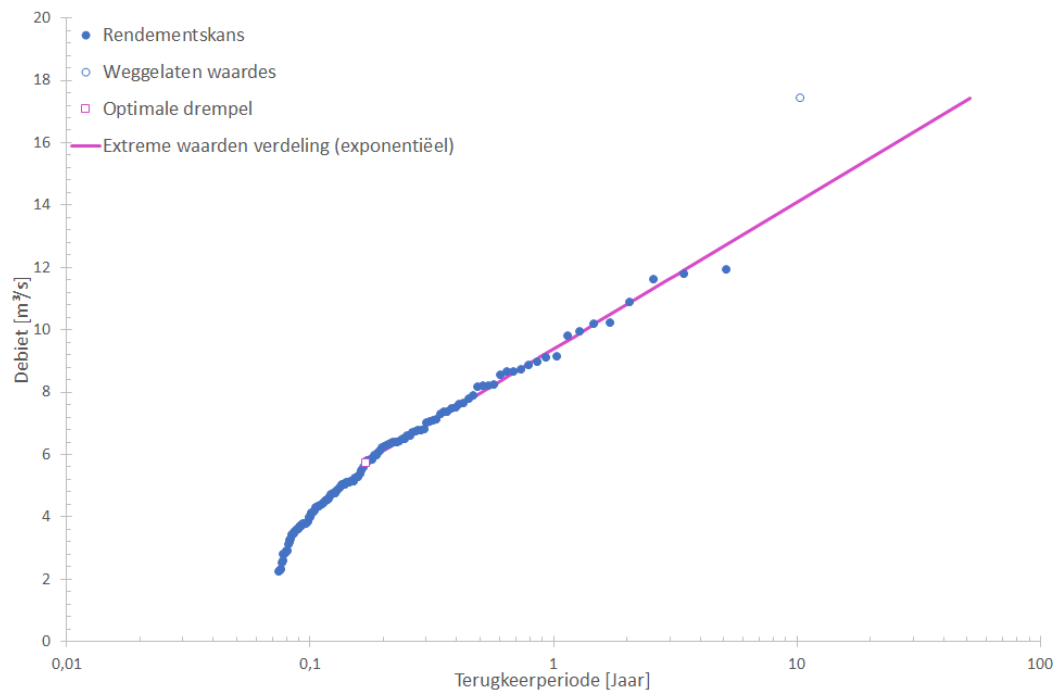
Bijlage D

Extreme waarden verdeling landgebruiksscenario's Grote Nete

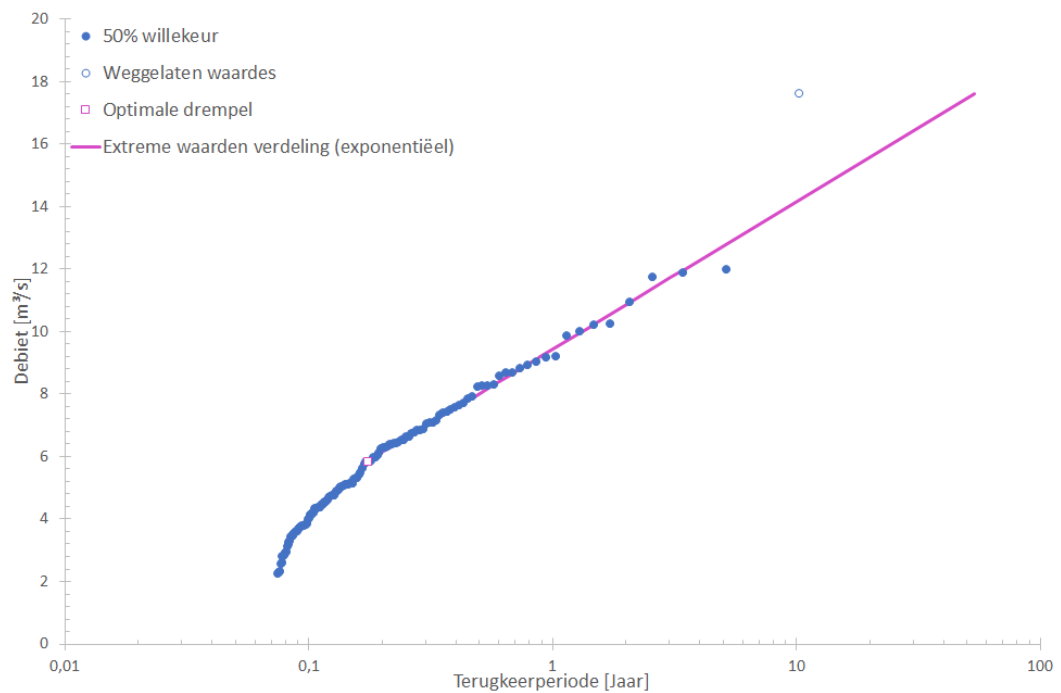


Figuur D.1: Extreme waarden verdeling (exponentieel) voor de toestand in 2010.

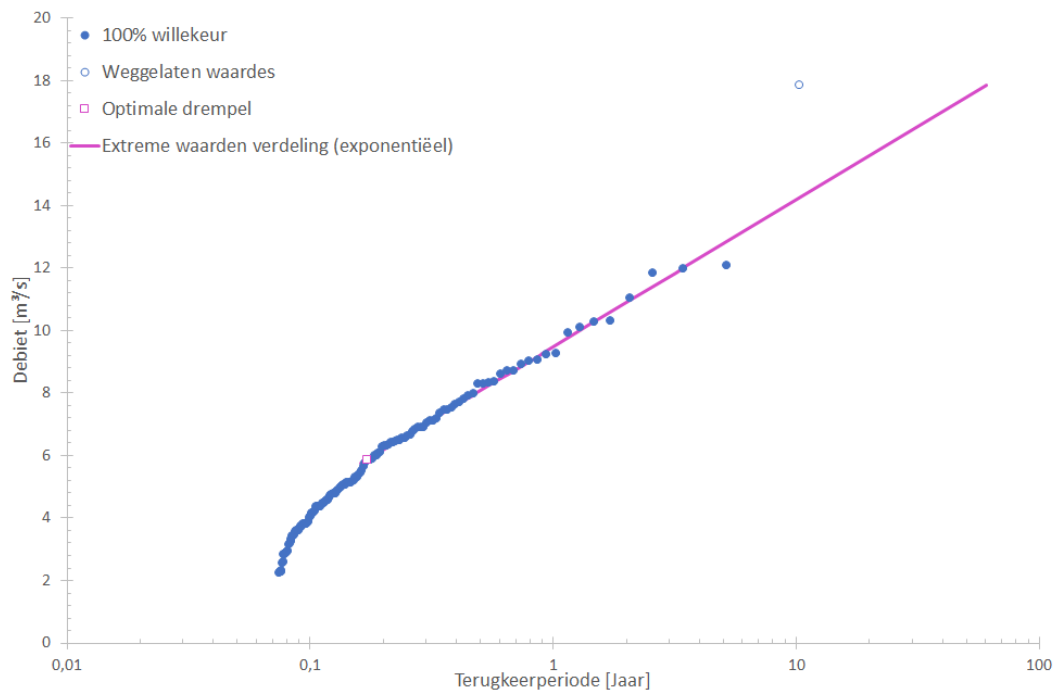
D. EXTREME WAARDEN VERDELING LANDGEBRUIKSSCENARIO'S GROTE NETE



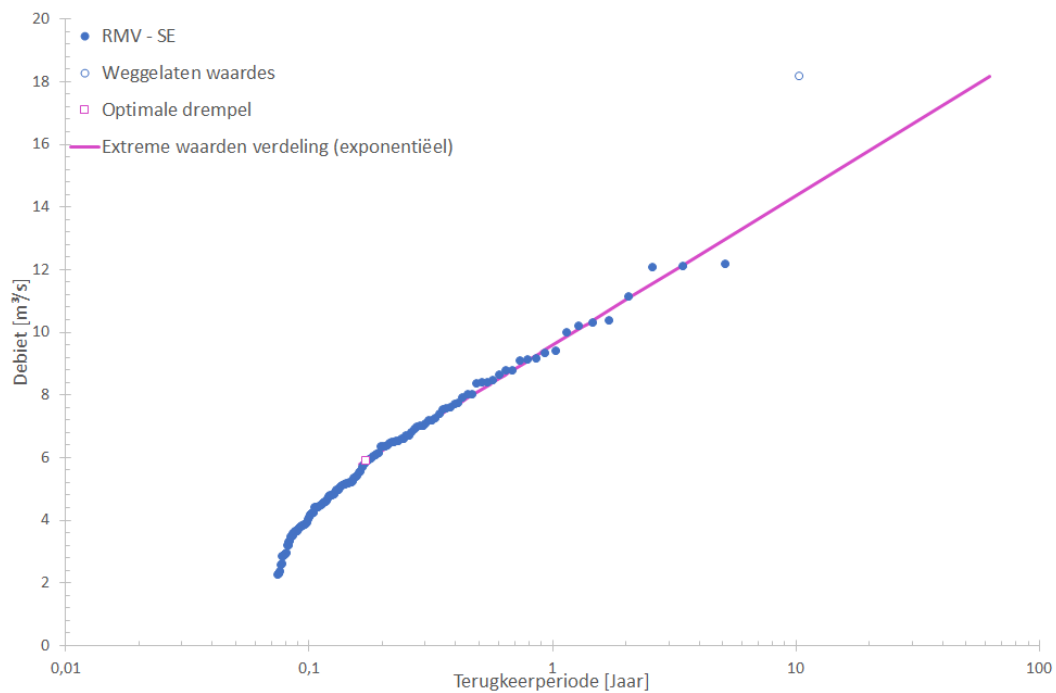
Figuur D.2: Extreme waarden verdeling (exponentieel) voor het landgebruiksscenario 'Rendementskans'.



Figuur D.3: Extreme waarden verdeling (exponentieel) voor het landgebruiksscenario '50% willekeur'.

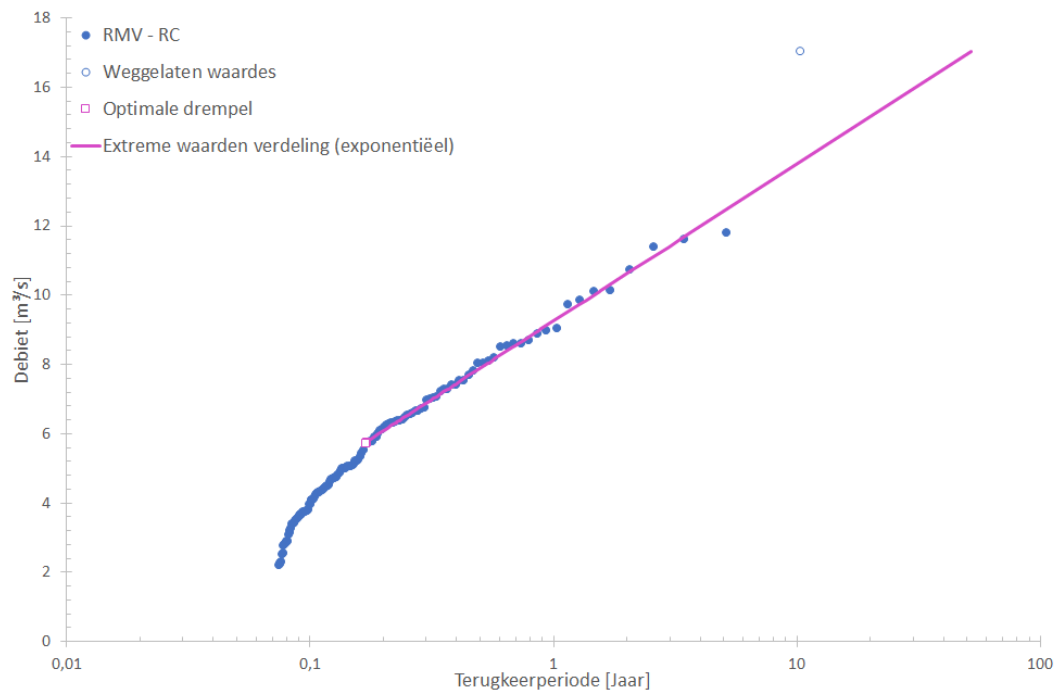


Figuur D.4: Extreme waarden verdeling (exponentieel) voor het landgebruiksscenario '100% willekeur'.

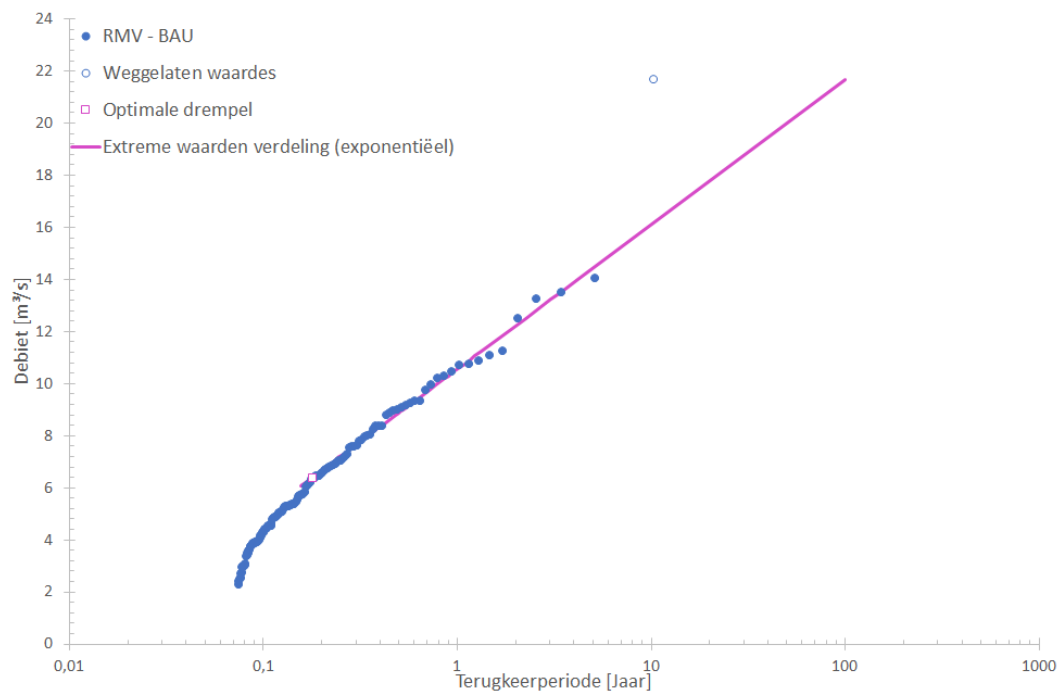


Figuur D.5: Extreme waarden verdeling (exponentieel) voor het landgebruiksscenario 'RMV - SE'.

D. EXTREME WAARDEN VERDELING LANDGEBRUIKSSCENARIO'S GROTE NETE



Figuur D.6: Extreme waarden verdeling (exponentieel) voor het landgebruiksscenario 'RMV - RC'.



Figuur D.7: Extreme waarden verdeling (exponentieel) voor het landgebruiksscenario 'RMV - BAU'.

Bibliografie

- [Agentschap Informatie Vlaanderen, 2014] Agentschap Informatie Vlaanderen (2014). *Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen II, DTM, raster, 1 m*. Agentschap Informatie Vlaanderen. [Dataset geraadpleegd via Geopunt Vlaanderen: <http://www.geopunt.be/catalogus/datasetfolder/f52b1a13-86bc-4b64-8256-88cc0d1a8735>].
- [Agentschap voor Natuur en Bos, 2013] Agentschap voor Natuur en Bos (2013). *Groenkaart Vlaanderen 2013*. Agentschap voor Natuur en Bos. [Dataset geraadpleegd via Geopunt Vlaanderen: <http://www.geopunt.be/catalogus/datasetfolder/70c663ac-ff3e-4b9a-9867-bb22bbdfcf6d>].
- [Agentschap voor Natuur en Bos, 2016a] Agentschap voor Natuur en Bos (2016a). *Beschermde gebieden Duinendecreet*. Agentschap voor Natuur en Bos. [Dataset geraadpleegd via Geopunt Vlaanderen: <http://www.geopunt.be/catalogus/datasetfolder/e2d2b914-0d56-4562-917a-b057085a2001>].
- [Agentschap voor Natuur en Bos, 2016b] Agentschap voor Natuur en Bos (2016b). *Erkende Natuurreservaten*. Agentschap voor Natuur en Bos. [Dataset geraadpleegd via Geopunt Vlaanderen: <http://www.geopunt.be/catalogus/datasetfolder/7b9424f7-bbb6-4248-9728-ae207f541780>].
- [AGIV, 2016] AGIV (2016). *Waterondoorlaatbaarheidskaart (WOK), 5m resolutie, opname 2012*. Agentschap voor Geografische Informatie Vlaanderen (AGIV). [Dataset geraadpleegd via Geopunt Vlaanderen: <http://www.geopunt.be/catalogus/datasetfolder/8e828735-1474-4bd8-8c90-bebebe51e590>].
- [Ahn en Merwade, 2017] Ahn, K.-H. en Merwade, V. (2017). The effect of land cover change on duration and severity of high and low flows. *Hydrological Processes*, 31:133–149.
- [Apollonio et al., 2016] Apollonio, C., Balacco, G., Novelli, A., Tarantino, E., en Piccinni, A. F. (2016). Land Use Change Impact on Flooding Areas: The Case Study of Cervaro Basin (Italy). *Sustainability*, 8, 996. [<http://www.mdpi.com/>].
- [ArcGIS, 2018] ArcGIS (2018). *ArcGIS*. [Laatst geraadpleegd op 24 mei 2018, ArcGIS: <https://www.arcgis.com/features/index.html>].
- [Baguis et al., 2009] Baguis, P., Roulin, E., Willems, P., en Ntegeka, V. (2009). Climate change scenarios for precipitation and potential evapotranspiration over

- central Belgium. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(3):273–286. [<https://doi.org/10.1007/s00704-009-0146-5>].
- [Baguis et al., 2010] Baguis, P., Roulin, E., Willems, P., en Ntegeka, V. (2010). Climate change and hydrological extremes in Belgian catchments. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 7:5033–5078.
- [Blöschl et al., 2007] Blöschl, G., Ardoin-Bardin, S., Bonell, M., Dorninger, M., Goodrich, D., Gutknecht, D., Matamoros, D., Merz, B., Shand, P., en Szolgay, J. (2007). At what scales do climate variability and land cover change impact on flooding and low flows? *Hydrological Processes*, 21:1241–1247.
- [Blöschl en Montanari, 2010] Blöschl, G. en Montanari, A. (2010). Climate change impacts - throwing the dice? *Hydrological Processes*, 24:374–381.
- [Booth en Jackson, 1997] Booth, D. B. en Jackson, C. R. (1997). Urbanization of aquatic systems: Degradation thresholds, stormwater detection, and the limits of mitigation. *Journal of the American Water Resources Association*, 33:1077–1090.
- [Booth et al., 2004] Booth, D. B., Karr, J. R., Schauman, S., Konrad, C. P., Morley, S. A., Larson, M. G., en Burges, S. J. (2004). Reviving urban streams: Land use, hydrology, biology, and human behavior. *Journal of the American Water Resources Association*, 40:1351–1364.
- [Bormann et al., 2009] Bormann, H., Breuer, L., Gräff, T., Huisman, J., en Croke, B. (2009). Assessing the impact of land use change on hydrology by ensemble modeling (LUCHEM). IV: Model sensitivity to data aggregation and spatial (re-)distribution. *Advances in Water Resources*, 32:171–192.
- [Breuer et al., 2009] Breuer, L., Huisman, J. A., Willems, P., Bormann, H., Bronstert, A., Croke, B. F. W., Frede, H. G., Gräff, T., Hubrechts, L., Jake-man, A. J., Kite, G., Lanini, J., Leavesley, G., Lettenmaier, D. P., Lindström, G., Seibert, J., Sivapalan, M., en Viney, N. R. (2009). Assessing the impact of land use change on hydrology by ensemble modeling (LUCHEM). I: Model intercomparison with current land uses. *Advances in Water Resources*, 32:129–146.
- [Bronstert et al., 2002] Bronstert, A., Niehoff, D., en Bürger, G. (2002). Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: present knowledge and modelling capabilities. *Hydrological Processes*, 16:509–529.
- [CCI, 2015] CCI (2015). *Climate Change Initiative, Land Cover (European Space Agency)*. [Laatst geraadpleegd op 1 februari 2018, CCI: <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/>].
- [Cheng en Wang, 2002] Cheng, S.-j. en Wang, R.-y. (2002). An approach for evaluating the hydrological effects of urbanization and its application. *Hydrological Processes*, 16:1403–1418.

- [Copernicus Land Monitoring Service, 2012] Copernicus Land Monitoring Service (2012). *CORINE Land Cover*. [Laatst geraadpleegd op 1 februari 2018, CORINE Land Cover: <http://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>].
- [Cruise et al., 2010] Cruise, J. F., Laymon, C. A., en Al-Hamdan, O. Z. (2010). Impact of 20 years of land-cover change on the hydrology of streams in the Southeastern United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 46(6):1195–1170.
- [Cuo et al., 2009] Cuo, L., Lettenmaier, D. P., Alberti, M., en Richey, J. E. (2009). Effects of a century of land cover and climate change on the hydrology of the Puget Sound basin. *Hydrological Processes*, 23:907–933.
- [Cuo et al., 2013] Cuo, L., Zhang, Y., Gao, Y., Hao, Z., en Cairang, L. (2013). The impacts of climate change and land cover/use transition on the hydrology in the upper Yellow River Basin, China. *Journal of Hydrology*, 502:37–52.
- [De Geyter et al., 2002] De Geyter, X., Bekaert, G., en De Boeck, L. (2002). *After-Sprawl: Xaveer De Geyter Architects: research for the contemporary city*. NAi, Rotterdam.
- [De Maeyer et al., 2015] De Maeyer, P., Daenekint, D., Merchiers, J., Paternoster, J., en Tibau, G. (2015). *De Boeck Atlas*. Uitgeverij De Boeck.
- [De Meyer et al., 2011] De Meyer, A., Tirry, D., Gulinck, H., en Van Orshoven, J. (2011). *Ondersteunend Onderzoek - Actualisatie MIRA Achtergronddocument - Bodem: Thema Bodemafdicthting - Eindrapport*. KU Leuven, studie uitgevoerd in opdracht van MIRA, Milieurapport Vlaanderen. [http://www.milieurapport.be/Upload/Main/MiraData/MIRA-T/02_THEMAS/02_15/2011-04-BODEMAFDICHTING.PDF].
- [De Ridder et al., 2015] De Ridder, K., Maiheu, B., Wouters, H., en van Lipzig, N. (2015). Indicatoren van het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen. *Studie door VITO en KU Leuven, uitgevoerd in opdracht van MIRA, Milieurapport Vlaanderen*.
- [De Vleeschauwer et al., 2014] De Vleeschauwer, K., Weustenraad, J., Nolf, C., Wolfs, V., De Meulder, B., Shannon, K., en Willems, P. (2014). Green-blue water in the city: quantification of impact of source control versus end-of-pipe solutions on sewer and river floods. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 70 11:1825–1837.
- [DHI, 2009] DHI (2009). *A Modelling System for Rivers and Channels - Reference Manual*. DHI, Water and Environment, Hørsholm, Denmark.
- [Engelen, 2016] Engelen, G. (2016). *Groeien met minder ruimte, waar ruimtelijk rendement realiseren?* Vlaams Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO), in opdracht van Departement Ruimte Vlaanderen.

- [Galster et al., 2006] Galster, J. C., Pazzaglia, F. J., Hargreaves, B. R., Morris, D. P., Peters, S. C., en Weisman, R. N. (2006). Effects of urbanization on watershed hydrology: The scaling of discharge with drainage area. *Geology*, 34(9):713–716.
- [Guo et al., 2008] Guo, H., Hu, Q., en Jiang, T. (2008). Annual and seasonal streamflow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake basin, China. *Journal of Hydrology*, 355:106–122.
- [Hamdi et al., 2011] Hamdi, R., Termonia, P., en Baguis, P. (2011). Effects of urbanization and climate change on surface runoff of the Brussels Capital Region: a case study using an urban soil-vegetation-atmosphere-transfer model. *International Journal of Climatology*, 31:1959–1974.
- [Hameed, 2017] Hameed, H. M. (2017). Estimating the Effect of Urban Growth on Annual Runoff Volume Using GIS in the Erbil Sub-Basin of the Kurdistan Region of Iraq. *Hydrology*, 4:12. [<http://www.mdpi.com/>].
- [He et al., 2013] He, Y., Lin, K., en Chen, X. (2013). Effect of Land Use and Climate Change on Runoff in the Dongjiang Basin of South China. *Hindawi Publishing Corporation, Mathematical Problems in Engineering*, page 14. [<http://dx.doi.org/10.1155/2013/471429>].
- [Huisman et al., 2009] Huisman, J. A., Breuer, L., Bormann, H., Bronstert, A., Croke, B. F. W., Frede, H. G., Gräff, T., Hubrechts, L., Jakeman, A. J., Kite, G., Lanini, J., Leavesley, G., Lettenmaier, D., Lindström, G., Seibert, J., Sivapalan, M., Viney, N. R., en Willems, P. (2009). Assessing the impact of land use change on hydrology by ensemble modeling (LUCHEM). III: Scenario analysis. *Advances in Water Resources*, 32:159–170.
- [Hundecha en Bárdossy, 2004] Hundecha, Y. en Bárdossy, A. (2004). Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. *Journal of Hydrology*, 292:281–295.
- [Instituut voor Natuur -en Bosonderzoek, 2016] Instituut voor Natuur -en Bosonderzoek (2016). *Biologische Waarderingskaart en Natura 2000 Habitatkaart - Toestand 2016*. Instituut voor Natuur -en Bosonderzoek. [[Dataset geraadpleegd via Geopunt Vlaanderen: <http://www.geopunt.be/catalogus/datasetfolder/178775e1-c743-498d-a01e-aedbf653f6c8>].
- [IPCC, 2013] IPCC (2013). Climate Change 2013, The Physical Science Basis, Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Chapter 9:741–866.
- [IPCC, 2014] IPCC (2014). IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.

- [Kiersch, 2000] Kiersch, B. (2000). *Land use impacts on water resources: A literature review*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- [Kim en Park, 2016] Kim, H. W. en Park, Y. (2016). Urban green infrastructure and local flooding: The impact of landscape patterns on peak runoff in four Texas MSAs. *Applied Geography*, 77:72–81.
- [Lauwaet et al., 2013] Lauwaet, D., Maiheu, B., Aertsens, J., en De Ridder, K. (2013). *Opmaak van een hittekaart en analyse van het stedelijk hitte-eiland effect voor Antwerpen*. Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO), in opdracht van Stad Antwerpen.
- [Lengoasa, 2016] Lengoasa, J. (2016). Climate Variability and Change: Impacts on Water Availability. *Irrigation and Drainage*, 65:149–156.
- [Lin et al., 2012] Lin, Y.-P., Hong, N.-M., Chiang, L.-C., Liu, Y.-L., en Chu, H.-J. (2012). Adaptation of Land-Use Demands to the Impact of Climate Change on the Hydrological Processes of an Urbanized Watershed. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 9:4083–4102. [<http://www.mdpi.com/>].
- [Liu et al., 2011] Liu, T., Willems, P., Pan, X. L., Bao, A. M., Chen, X., Veroustraete, F., en Dong, Q. H. (2011). Climate change impact on water resource extremes in a headwater region of the Tarim basin in China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(11):3511–3527. [<https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/3511/2011/>].
- [Liu et al., 2014] Liu, W., Chen, W., en Peng, C. (2014). Assessing the effectiveness of green infrastructures on urban flooding reduction: A community scale study. *Ecological Modelling*, 291:6–14.
- [Liu en De Smedt, 2004] Liu, Y. en De Smedt, F. (2004). *WetSpa Extension, A GIS-based Hydrologic Model for Flood Prediction and Watershed Management - Documentation and User Manual*. Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije Universiteit Brussel.
- [Liu et al., 2017] Liu, Y., Engel, B. A., Collingsworth, P. D., en Pijanowski, B. C. (2017). Optimal implementation of green infrastructure practices to minimize influences of land use change and climate change on hydrology and water quality: Case study in Spy Run Creek watershed, Indiana. *Science of the Total Environment*, 601-602:1400–1411.
- [Liu et al., 2016] Liu, Y., Theller, L. O., Pijanowski, B. C., en Engel, B. A. (2016). Optimal selection and placement of green infrastructure to reduce impacts of land use change and climate change on hydrology and water quality: An application to the Trail Creek Watershed, Indiana. *Science of the Total Environment*, 553:149–163.
- [Michigan Sea Grant - Keely Dinse, 2017] Michigan Sea Grant - Keely Dinse (2017). *Climate Variability and Climate Change: What is the Difference?* Michigan

- Sea Grant. [Laatst geraadpleegd op 9 november 2017, Michigan Sea Grant: https://eos.ucs.uri.edu/EOS_Linked_Documents/michu/michug11017.pdf].
- [Miller et al., 2014] Miller, J. D., Kim, H., Kjeldsen, T. R., Packman, J., Grebby, S., en Dearden, R. (2014). Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover. *Journal of Hydrology*, 515:59–70.
- [Misra, 2011] Misra, A. K. (2011). Impact of Urbanization on the Hydrology of Ganga Basin (India). *Water Resources Management*, 25:705–719.
- [O’Driscoll et al., 2010] O’Driscoll, M., Clinton, S., Jefferson, A., Manda, A., en McMillan, S. (2010). Urbanization Effects on Watershed Hydrology and In-Stream Processes in the Southern United States. *Water*, 2:605–648. [<http://www.mdpi.com/>].
- [Owrangi et al., 2014] Owrangi, A. M., Lannigan, R., en Simonovic, S. P. (2014). Interaction between land-use change, flooding and human health in Metro Vancouver, Canada. *Natural Hazards*, 72:1219–1230.
- [Pfister et al., 2004] Pfister, L., Kwadijk, J., Musy, A., Bronstert, A., en Hoffman, L. (2004). Climate Change, Land Use Change and Runoff Prediction in the Rhine-Meuse Basins. *River Research and Applications*, 20:229–241.
- [Poelmans, 2010] Poelmans, L. (2010). *Modelling Urban Expansion and its Hydrological Impacts*. PhD thesis, KU Leuven.
- [Poelmans en Engelen, 2014] Poelmans, L. en Engelen, G. (2014). *Verklarende factoren in de evolutie van het ruimtebeslag*. Vlaams Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO), in opdracht van Departement Ruimte Vlaanderen.
- [Poelmans et al., 2016a] Poelmans, L., Van Esch, L., Janssen, L., en Engelen, G. (2016a). *Indicatoren Ruimtelijk Rendement*. Vlaams Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO), in opdracht van Departement Ruimte Vlaanderen.
- [Poelmans et al., 2016b] Poelmans, L., Van Esch, L., Janssen, L., en Engelen, G. (2016b). *Verklarende factoren in de evolutie van het ruimtebeslag*. Vlaams Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO), in opdracht van Departement Ruimte Vlaanderen.
- [Poelmans et al., 2011] Poelmans, L., Van Rompaey, A., Ntegeka, V., en Willems, P. (2011). The relative impact of climate change and urban expansion on peak flows: a case study in central Belgium. *Hydrological Processes*, 25(18):2846–2858.
- [Pötz, 2016] Pötz, H. (2016). *Groenblauwe netwerken: Handleiding voor veerkrachtige steden*. Atelier GROENBLAUW. ISBN 978-90-9029822-1.
- [QGIS, 2018] QGIS (2018). *QGIS project*. [Laatst geraadpleegd op 24 mei 2018, QGIS: <http://www.qgis.org/>].

- [Ravazzani et al., 2016] Ravazzani, G., Amengual, A., Ceppi, A., Homar, V., Romero, R., Lombardi, G., en Mancini, M. (2016). Potentialities of ensemble strategies for flood forecasting over the Milano urban area. *Journal of Hydrology*, 539:237–253.
- [Ruimte Vlaanderen, 2012] Ruimte Vlaanderen (2012). *Groenboek, Beleidsplan Ruimte Vlaanderen*. Departement Omgeving, Vlaamse Overheid.
- [Ruimte Vlaanderen, 2015] Ruimte Vlaanderen (2015). *Klimaatadaptatie en kwalitatieve en kwantitatieve richtlijnen voor de ruimtelijke inrichting van gebieden, Technum in opdracht van Ruimte Vlaanderen*. Departement Omgeving, Vlaamse Overheid.
- [Ruimte Vlaanderen, 2016] Ruimte Vlaanderen (2016). *Witboek, Beleidsplan Ruimte Vlaanderen*. Departement Omgeving, Vlaamse Overheid.
- [Ruimte Vlaanderen, 2017] Ruimte Vlaanderen (2017). *Beleidsplan Ruimte Vlaanderen*. [Laatst geraadpleegd op 17 oktober 2017, Ruimte Vlaanderen: <https://www.ruimtevlaanderen.be/BRV>].
- [United Nations, 2008] United Nations (2008). *United Nations expert group meeting on Population Distribution, Urbanization, Internal Migration and Development. United Nations Population Division*. United Nations.
- [Reynard et al., 2001] Reynard, N. S., Prudhomme, C., en Crooks, S. M. (2001). The flood characteristics of large U.K. rivers: Potential effects of changing climate and land use. *Climatic Change*, 48:343–359.
- [Rose en Peters, 2001] Rose, S. en Peters, N. E. (2001). Effects of urbanization on streamflow in the Atlanta area (Georgia, USA): a comparative hydrological approach. *Hydrological Processes*, 15:1441–1457.
- [Rubarenzya, 2007] Rubarenzya, M. H. (2007). *Assesement of the Effect of Change in Land Use and Rewetting on Catchment Hydrology*. PhD thesis, KU Leuven.
- [Semadeni-Davies et al., 2008] Semadeni-Davies, A., Hernebring, C., Svensson, G., en Gustafsson, L.-G. (2008). The impact of land use change on catchment hydrology in large catchments: The Comet River, Central Queensland, Australia. *Journal of Hydrology*, 350:114–125.
- [Shaw, 1994] Shaw, E. M. (1994). *Hydrology in Practice*. Chapman & Hall. p. 479–507.
- [Siriwardena et al., 2006] Siriwardena, L., Finlayson, B. L., en McMahon, T. A. (2006). The impact of land use change on catchment hydrology in large catchments: The Comet River, Central Queensland, Australia. *Journal of Hydrology*, 326:199–214.

- [Tabari et al., 2015] Tabari, H., Taye, M. T., en Willems, P. (2015). Water availability change in central belgium for the late 21st century. *Global and Planetary Change*, 131:115–123. [<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.05.012>].
- [Tavakoli et al., 2014] Tavakoli, M., De Smedt, F., Vansteenkiste, T., en Willems, P. (2014). Impact of climate change and urban development on extreme flows in the Grote Nete watershed, Belgium. *Natural Hazards*, 71:2127–2142.
- [Tran Quoc et al., 2015] Tran Quoc, Q., De Niel, J., en Willems, P. (2015). Flexible conceptual hydrological modelling - Disaggregation from lumped catchment scal to higher spatial resolutions. *Water Resources Research*. Confidential manuscript submitted to Water Resources Research.
- [Trudeau en Richardson, 2016] Trudeau, M. P. en Richardson, M. (2016). Empirical assessment of effects of urbanization on event flow hydrology in watersheds of Canada’s Great Lakes-St Lawrence basin. *Journal of Hydrology*, 541:1456–1474.
- [UNISDR, 2015] UNISDR (2015). *The human cost of weather related disasters 1995-2015*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR).
- [USGS, 2003] USGS (2003). *Effects of Urban Development on Floods*. United States Geological Survey.
- [Van Hecke, 1997] Van Hecke, E. (1997). *Hiërarchie van de stedelijke kernen in Vlaanderen*. AROHM.
- [Vansteenkiste et al., 2014] Vansteenkiste, T., Tavakoli, M., Steenbergen, N. V., Smedt, F. D., Batelaan, O., Pereira, F., en Willems, P. (2014). Intercomparison of five lumped and distributed models for catchment runoff and extreme flow simulation. *Journal of Hydrology*, 511:335 – 349. [<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169414000729>].
- [Verachttert et al., 2016] Verachttert, E., Mayeres, I., Poelmans, L., Van der Meulen, M., Vanhunsel, M., en Engelen, G. (2016). *Ontwikkelingskansen op basis van knooppuntwaarde en nabijheid voorzieningen*. Vlaams Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO), in opdracht van Departement Ruimte Vlaanderen.
- [VITO, 2013] VITO (2013). *Ruimtebeslag - Vlaanderen - toestand 2013*. Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO), in opdracht van de Vlaamse Overheid - Vlaams Planbureau voor Omgeving. [Dataset geraadpleegd via Geopunt Vlaanderen: www.geopunt.be/catalogus/datasetfolder/c/c895a125-fa0c-4f3b-8ad1-8a5de62089fe].
- [VITO, 2018] VITO (2018). *Ruimtemodel Vlaanderen*. [Laatst geraadpleegd op 31 januari 2018, VITO: <https://ruimtemodel.vlaanderen/>].

- [Vlaamse Milieumaatschappij, 2017] Vlaamse Milieumaatschappij (2017). *Vlaamse Hydrografische Atlas - Waterlopen, 1 september 2017*. Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) - Afdeling Operationeel Waterbeheer. [Dataset geraadpleegd via Geopunt Vlaanderen: www.geopunt.be/catalogus/datasetfolder/4148deef-24c5-4656-b5a4-b11e2aa3efca].
- [Vlaamse Milieumaatschappij, 2018] Vlaamse Milieumaatschappij (2018). *WATER-INFO*. Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) - Afdeling Operationeel Waterbeheer. [Meetgegevens geraadpleegd via Waterinfo: <https://www.waterinfo.be/>].
- [Vlaamse Overheid, 2017] Vlaamse Overheid (2017). *Gewestplan*. Vlaamse Overheid - Departement Omgeving - Afdeling Vlaams Planbureau voor Omgeving. [Dataset geraadpleegd via Geopunt Vlaanderen: <http://www.geopunt.be/catalogus/datasetfolder/a65a9f57-a422-4e99-adc9-158f9b65fb9b>].
- [VPO, 2016] VPO (2016). *Bodemkaart: bodemtypes, substraten, fasen en varianten van het moedermateriaal en de profielontwikkeling*. Vlaamse Overheid, Departement Omgeving, Vlaams Planbureau voor Omgeving (VPO). [Dataset geraadpleegd via Geopunt Vlaanderen: <http://www.geopunt.be/catalogus/datasetfolder/5c129f2d-4498-4bc3-8860-01cb2d513f8f>].
- [Wang en Yang, 2013] Wang, Y. en Yang, X. (2013). Land use/cover change effects on floods with different return periods: a case study of Beijing, China. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 7(5):769–776.
- [Willems, 2009] Willems, P. (2009). A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models. *Environmental Modelling & Software*, 24(3):311 – 321. [<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.09.005>].
- [Willems, 2013] Willems, P. (2013). Multidecadal oscillatory behaviour of rainfall extremes in Europe. *Climatic Change*, 120(4):931–944. [<https://doi.org/10.1007/s10584-013-0837-x>].
- [Wouters et al., 2017] Wouters, H., De Ridder, K., Poelmans, L., Willems, P., Brouwers, J., Hosseinzadehtalaei, P., Tabari, H., Vanden Broucke, S., van Lipzig, N. P. M., en Demuzere, M. (2017). Heat stress increase under climate change twice as large in cities as in rural areas: A study for a densely populated midlatitude maritime region. *Geophysical Research Letters*, 44(17):8997–9007. [<http://dx.doi.org/10.1002/2017GL074889>].
- [Yang et al., 2016] Yang, X., Chen, H., Wang, Y., en Xu, C.-Y. (2016). Evaluation of the effect of land use/cover change on flood characteristics using an integrated approach coupling land and flood analysis. *Hydrology Research*, 47(6):1161–1171.
- [Yang et al., 2015] Yang, Y., Endreny, T. A., en Nowak, D. J. (2015). Simulating the effect of flow path roughness to examine how greeninfrastructure restores urban runoff timing and magnitude. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14:361–367.

- [Zhao et al., 2016] Zhao, M., Cai, H., Qiao, Z., en Xu, X. (2016). Influence of urban expansion on the urban heat island effect in Shanghai. *International Journal of Geographical Information Science*, 30:2421–2441.
- [Zope et al., 2016] Zope, P. E., Eldho, T. I., en Jothiprakash, V. (2016). Impacts of land use - land cover change and urbanization on flooding: A case study of Oshiwara River Basin in Mumbai, India. *Catena*, 145:142–154.

Fiche masterproef

Student: Arnoud Vermeir

Titel: Impact van de betonstop op de rivierafvoer

Engelse titel: Impact of the new spatial management plans for Flanders on river flows

UDC: 621.3

Korte inhoud:

In deze masterproef is het effect van het uitvoeren van de betonstop op de rivierafvoer achterhaald. De term betonstop volgt uit het Witboek Beleidsplan Ruimte Vlaanderen, waarin de Vlaamse Regering haar beleid omschrijft omtrent de toekomstige Ruimtelijke Ordening in Vlaanderen.

Eerst zijn er verschillende mogelijke landgebruiksscenario's geanalyseerd om hieruit vervolgens de landgebruiksscenario's te bekomen die de betonstop beschrijven aangezien deze nog niet voorhanden zijn. Deze zijn gebaseerd op het landgebruik volgens het Ruimtemodel Vlaanderen.

Om de invloed van het veranderend landgebruik op de hydrologie te achterhalen is geopteerd voor de methode van de ruimtelijke disaggregatie in te brengen in de hydrologische modellering voor het stroomgebied van de Grote Nete. Deze methode beschrijft de modelparameters afhankelijk van het landgebruik. De parameters van een nieuw gekalibreerd en gevalideerd dagelijks gebaseerd NAM-model voor 2010 zijn dan via de methode van de ruimtelijke disaggregatie aangepast geweest voor de verschillende landgebruiksscenario's.

Via de hydrologische modellering is er een algemene toename in piekafvoer bekomen, die het sterkst is voor het BAU-scenario (Business-As-Usual, zonder realisatie van de betonstop). Ook is een daling in de laagwaterafvoer bekomen. Het effect van het landgebruik op de jaarlijkse totalen is miniem ondervonden. Ten slotte is nog een positieve correlatie gevonden tussen de toename in verharding en piekafvoer waar dat dit een negatieve correlatie is tussen de toename in verharding en laagwaterafvoer. Het realiseren van de betonstop heeft dus een gunstig effect op het beperken van de rivierafvoer in de toekomst.

Thesis voorgedragen tot het behalen van de graad van Master of Science in de ingenieurswetenschappen: bouwkunde, optie Civiele techniek

Promotor: Prof. dr. ir. P. Willems

Begeleider: ir. J. De Niel