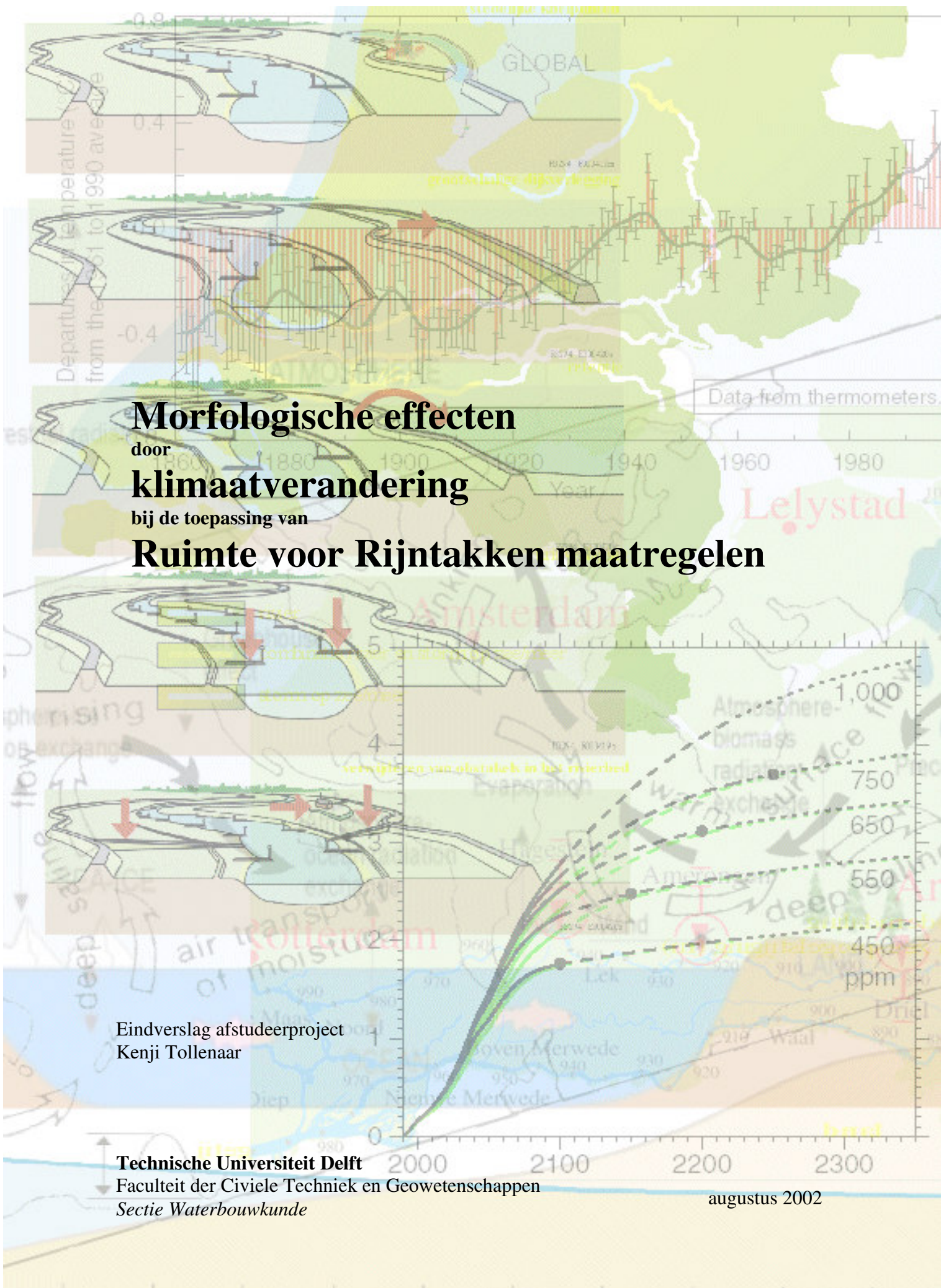


Morfologische effecten door klimaatverandering bij de toepassing van Ruimte voor Rijntakken maatregelen



Eindverslag afstudeerproject
Kenji Tollenaar

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek en Geowetenschappen
Sectie Waterbouwkunde

augustus 2002

0001 1001 2001 3001 4001 5001 6001 7001 8001 9001 10000

Morfologische effecten
door
klimaatverandering
bij de toepassing van
Ruimte voor Rijntakken maatregelen

Eindverslag afstudeerproject
Kenji Tollenaar

Begeleiders:

Verantwoordelijk hoogleraar	prof. dr. ir. H.J. de Vriend
Begeleider	dr.ir. P.J. Visser
Begeleider van buiten de sectie	prof. dr. ir. G.S. Stelling

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek en Geowetenschappen
Sectie Waterbouwkunde

augustus 2002

Voorwoord

Het afstuderen is de afronding van de 5-jarige studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft. In minimaal 6 maanden wordt de theorie die de voorgaande jaren onderwezen is in praktijk gebracht door een onderzoek uit te voeren voor de Technische Universiteit of een bedrijf dat de student inhuurt. Deze studie is uitgevoerd voor de sectie Waterbouwkunde en Offshore van de opleiding Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft.

Dit verslag is het eindverslag van het afstudeerproject. Naast dit verslag wordt het onderzoek gepresenteerd op een presentatie voor genodigden en geïnteresseerden.

Hierbij wil ik de leden van mijn afstudeercommissie, dr. ir. P.J. Visser, prof. dr. ir. G.S. Stelling en prof. dr. ir. H.J. de Vriend bedanken voor hun begeleiding tijdens het afstuderen. Ook wil ik Kees Sloff bedanken voor zijn bereidheid en inzet mijn vragen te beantwoorden bij het gebruik van het programma SOBEK. Tenslotte wil ik graag alle mensen bedanken die mij tijdens mijn studie of afstuderen hebben bijgestaan en deze afronding mogelijk hebben gemaakt.

Delft, augustus 2002

Kenji Tollenaar

Samenvatting

Er is steeds meer bezorgdheid over klimaatverandering en de gevolgen daarvan. Extremere omstandigheden zorgen ervoor dat de veiligheid tegen overstromingen vanuit de rivieren onder druk komt te staan. De maatgevende afvoeren van de Nederlandse rivieren zijn daarom al verhoogd en verscheidene studies hebben maatregelen voorgesteld om de veiligheid te waarborgen. Het Ruimte voor Rijntakken project is er daar een van.

Een van de uitgangspunten van het Ruimte voor Rijntakken project is dat doorgaande dijkversterking niet wenselijk is vanwege de steeds groter wordende risico's bij een dijkdoorbraak. Daarom zijn bij dit project andere alternatieven voorgesteld zoals: retentiebekkens, zomerbedverlaging, uiterwaardverlaging, verwijderen van hydraulische knelpunten en groene rivieren.

Al deze maatregelen zijn bedoeld om de veiligheid te waarborgen, dat wil zeggen ervoor te zorgen dat de rivieren de hoger wordende afvoeren kunnen afvoeren zonder dat er gevaar dreigt voor overstromingen. De maatregelen zijn dus ontworpen om de hydraulische veranderingen het hoofd te kunnen bieden.

In deze studie zijn de morfologische effecten van de Ruimte voor Rijntakken maatregelen op de lange termijn bekeken. Op de lange termijn zijn de grootste veranderingen, ook voor de morfologie, te verwachten als gevolg van klimaatverandering, hierdoor veranderen immers de zeespiegel en de rivierafvoer. Over klimaatverandering is echter op een termijn langer dan 100 jaar niet veel bekend. Daarom is eerst gekeken naar het klimaat en hoe de veranderingen daarvan tot stand kunnen komen. Hierna is, met behulp van de bestaande voorspellingen van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), een zestal scenario's voor de rivierafvoer en een drietal scenario's voor de zeespiegel tot het jaar 2500 gemaakt. Deze scenario's zijn gecombineerd tot zeven scenario's met invoerwaarden voor een 1-dimensionaal computermodel, variërend van geen klimaatverandering tot sterkere klimaatveranderingen:

scenario	zeespiegel	afvoer	zeespiegelstijging na 200 jaar	gemiddelde afvoerandering na 200 jaar	
				zomerafvoer	winterafvoer
S0W0	huidige	huidige	0	0 %	0 %
S1W1	WRE450	WRE450 min	0	- 7 %	+ 5 %
S1W2	WRE450	WRE650 min	0	- 9 %	+ 8 %
S2W3	WRE650	WRE1000 min	+1.8 m	- 11 %	+ 11 %
S2W4	WRE650	WRE450 max	+1.8 m	- 21 %	+ 21 %
S3W5	WRE1000	WRE650 max	+2.4 m	- 28 %	+ 31 %
S3W6	WRE1000	WRE1000 max	+2.4 m	- 33 %	+ 39 %

De klimaatscenario's en enkele kenmerken

Vervolgens zijn de Ruimte voor Rijntakken maatregelen geanalyseerd. Van de maatregelen zijn de uiterwaardverlaging, zomerbedverlaging en het verwijderen van 1 hydraulisch knelpunt geselecteerd om te simuleren met het 1-dimensionale model. Hiertoe zijn een referentiecasse en 4 cases met maatregelen gemaakt: "Grootschalige uiterwaardverlaging, variant 1", "Grootschalige uiterwaardverlaging, variant 2", "Zomerbedverlaging" en "Verwijderen hydraulisch knelpunt Lexkesveer".

In het ééndimensionaal rekenprogramma SOBEK zijn deze cases vervolgens, met behulp van het model "SOBEK-Rijn versie 2000.3M9" van Rijkswaterstaat, geschematiseerd. Hiertoe is het originele model van Rijkswaterstaat op verschillende manieren aangepast. Vervolgens zijn de cases doorgerekend met de verschillende klimaatscenario's over een periode van 500 jaar, aannemend dat er verder niet verandert.

Uit de resultaten van de berekeningen blijkt dat, ook zonder klimaatveranderingen en zonder maatregelen, het model nog niet helemaal in evenwicht is. De bodemligging in de verschillende takken verandert nog licht. In de Waal daalt de bodem, in de Nederrijn en de Lek nemen de verhangen toe en in de IJssel neemt het verhang af. Wanneer de verschillende scenario's worden toegepast blijken er enkele trends op te treden naarmate het klimaatscenario zwaarder wordt. De bodem van de Waal stijgt, de verhangen in de Nederrijn en de Lek nemen af en de verhangafname in de IJssel wordt iets afgeremd. Een groot deel van deze effecten wordt veroorzaakt door de verandering van de afvoer- en sedimentverdeling bij de Pannerdensche Kop.

Bij de berekeningen met maatregelen valt op dat de verschillen ten opzichte van de veranderingen zonder maatregelen erg klein zijn.

Grootschalige uiterwaardverlagingen zullen weinig effect hebben wanneer deze niet in combinatie met het verwijderen van zomerkades worden uitgevoerd.

Bij de zomerbedverlaging is te zien dat de verlaging stroomafwaarts het model ‘uitloopt’ en dat dit sneller gebeurt wanneer er sterkere klimaatveranderingen zijn. Verder is het voor een blijvend effect noodzakelijk dat deze maatregel periodiek of continu wordt uitgevoerd.

Het verwijderen van een enkel hydraulisch knelpunt heeft slechts kleine gevolgen voor de morfologie in de betreffende tak. De verwachting is dat wanneer meerdere knelpunten in een tak worden verwijderd de hydraulische effecten een verandering van de afvoer- en sedimentverdeling teweeg zullen brengen. Dit is echter in deze studie niet bestudeerd.

Geconcludeerd wordt dat er door klimaatverandering ook grootschalige morfologische veranderingen optreden in de riviertakken. De invloed van de hier onderzochte maatregelen op deze veranderingen is gering, maar is wel afhankelijk van de mate waarin klimaatverandering optreedt. Met behulp van maatregelen of herinrichting van splitsingspunten is het misschien mogelijk de afvoer- en sedimentverdeling te controleren, zodat negatieve effecten kunnen worden verminderd of voorkomen.

Aanbevolen wordt meer onderzoek te verrichten naar de splitsingspuntrelaties bij veranderende randvoorwaarden, aangezien deze een grote invloed hebben op de lange termijn morfologie. Ook is het interessant het onderzoek uit te breiden met de overgebleven maatregelen uit het Ruimte voor Rijntakken project om een compleet overzicht te creëren.

Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Samenvatting	ii
Inhoudsopgave	iv
Lijst van figuren.....	vi
Lijst van tabellen.....	viii
1 Inleiding	1
2 Probleemanalyse	2
2.1 Omschrijving.....	2
2.2 Aanpak.....	3
3 Klimaat	4
3.1 Inleiding.....	4
3.2 Werking.....	4
3.3 Veranderingen van het klimaat.....	6
3.4 Geschiedenis van het klimaat.....	10
3.5 Huidig klimaat.....	13
3.6 Toekomstig klimaat.....	14
3.7 Conclusies.....	20
4 Scenario's	21
4.1 Temperatuur.....	21
4.2 Zeespiegelstijging.....	22
4.3 Neerslag.....	24
4.4 Rivierafvoeren.....	25
4.5 Gebruikte scenario's.....	27
5 Maatregelen	28
5.1 Verminderen van de toevoer.....	28
5.2 Bergen van water.....	29
5.3 Maatregelen in het zomerbed.....	29
5.4 Maatregelen in de uiterwaarden.....	30
5.5 Maatregelen binnendijks.....	31
5.6 Oplossingen.....	32
5.7 Berekeningen met maatregelen.....	33
6 Simulaties	35
6.1 Simulatie van rivieren.....	35

6.2	Model	37
6.3	Rekengevallen	44
7	Resultaten	48
7.1	Inleiding	48
7.2	Controle-berekeningen	49
7.3	Referentie-berekeningen	53
7.4	Grootschalige uiterwaardverlaging 1	59
7.5	Grootschalige uiterwaardverlaging 2	60
7.6	Zomerbedverlaging	61
7.7	Verwijderen hydraulisch knelpunt Lexkesveer	64
8	Onzekerheden	66
8.1	Klimaat	66
8.2	Ontwikkeling van de wereld	66
8.3	Morfologische berekeningen	67
9	Conclusies	68
9.1	Morfologische effecten	68
9.2	Aanbevelingen	70
9.3	Tot slot	71
	Literatuurverwijzingen	72

Bijlagen

- A Gegevens voor de reconstructie van de geschiedenis van het klimaat
- B Scenario's
- C Rivierkilometers
- D Controle-berekeningen
- E Lijst van maatregelen bij Aanvullende Maatregelen I
- F Lijst van maatregelen bij Aanvullende Maatregelen II
- G Referentie-simulaties
- H Case-simulaties

Lijst van figuren

3.1	Overzicht van de luchtlagen in de atmosfeer.	4
3.2	Overzicht van de energiestroom in de atmosfeer.	5
3.3	Overzicht van energiestromen tussen de verschillende klimaatcomponenten.	6
3.4	Spectraalanalyse van historische klimaatgegevens	7
3.5	De "North Atlantic Deep Water"-stroming.	9
3.6	Temperatuurverloop in Europa de afgelopen 1000 jaar.	12
3.7	Temperatuurverloop afgelopen 10000 jaar.	12
3.8	Warmteverloop de afgelopen 2000000 jaar.	13
3.9	Veel mensen wonen en werken aan het water.	13
3.10	Agglomeraties in kustzones.	14
3.11	Ontwikkeling van klimaatmodellen.	16
3.12	Samenvatting van de aannames voor de zes IS92 scenario' s.	17
3.13	Overzicht van de SRES scenario' s	17
3.14	De aandrijvende krachten voor het toekomstige klimaat.	18
3.15	Temperatuurverloop bij de verschillende uitstoot scenario-families.	19
3.16	Verloop van de zeespiegelstijging bij verschillende scenario-families.	19
3.17	CO ₂ concentratie stabilisatie scenario' s.	19
4.1	Temperatuur profielen bij de verschillende stabilisatiescenario' s.	21
4.2	Profielen van het verloop van de zeespiegel over de komende 2500 jaar.	24
4.3	Het verloop van de neerslag in de komende 2500 jaar.	25
4.4	Relaties tussen temperatuurstijging en de afvoer van de Rijn.	26
4.5	Verandering van de verschillende afvoeren van de Rijn op langere termijn.	26
5.1	Landgebruik is mede bepalend voor de snelheid van afvoer.	28
5.2	Maatregelen bovenstrooms.	28
5.3	Het Rijnstrangengebied.	29
5.4	Berging van water in retentiegebieden.	29
5.5	Zomerbedverlaging.	29
5.6	Kribverlaging.	29
5.7	Uiterwaardverlaging.	30
5.8	Van uiterwaard naar uiterwaardplannen naar aanvullende maatregelen met natuurontwikkeling.	30
5.9	Verwijderen van hydraulische knelpunten.	31
5.10	Verwijderen zomerkades.	31
5.11	Grootschalige dijkverlegging.	31
5.12	Groene rivier.	32
5.13	De zuidelijke veerstoep bij Lexkesveer.	34
6.1	Bij een ééndimensionaal model wordt een rivier geschematiseerd in doorsnedes	35
6.2	Het tijd-ruimte grid van de Preismann-schematisatie.	37
6.3	SOBEK-Rijn versie 2000.3M9, de schematisatie.	38
7.1	De breedtegemiddelde bodemligging zoals die door het originele model wordt berekend over 100 jaar.	49
7.2	De breedtegemiddelde bodemligging zoals die door het model wordt berekend over 500 jaar, wanneer enkele aanpassingen zijn gedaan, zonder onderhoudsbaggerwerkzaamheden.	50
7.3	De breedtegemiddelde bodemligging zoals die door het model wordt berekend over 100 jaar, wanneer de laterale debieten uit het model zijn gehaald, ten opzichte van het originele model.	50
7.4	De breedtegemiddelde bodemligging zoals die door het model wordt berekend over 100 jaar, wanneer de stuwen uit het model zijn gehaald, ten opzichte van het originele model.	51
7.5	De breedtegemiddelde bodemligging zoals die door het model wordt berekend over 100 jaar, wanneer de stuwen worden gecontroleerd door het debiet op de Bovenrijn, ten opzichte van het originele model.	51
7.6	De breedtegemiddelde bodemligging zoals die door het model wordt berekend, bij een 10 dagen-gemiddelde afvoer.	52
7.7	De breedtegemiddelde bodemligging zoals die door het model wordt berekend, bij een 10 dagen tijdstap.	52

7.8	De breedtegemiddelde bodemligging zoals die door het model wordt berekend over 500 jaar, wanneer enkele aanpassingen zijn gedaan, ten opzichte van het originele model, zonder onderhoudsbaggerwerkzaamheden.	53
7.9	De breedtegemiddelde bodemligging zoals die door het model wordt berekend over 500 jaar, wanneer enkele aanpassingen zijn gedaan, ten opzichte van het originele model, met onderhoudsbaggerwerkzaamheden.	53
7.10	Afvoerverdeling Pannerdensch Kop na 200 jaar, bij de referentieberekeningen.	54
7.11	Sedimentverdeling Pannerdensch Kop na 200 jaar, bij de referentieberekeningen.	54
7.12	Afvoerverdeling IJsselkop na 200 jaar, bij de referentieberekeningen.	55
7.13	Sedimentverdeling IJsselkop na 200 jaar, bij de referentieberekeningen.	55
7.14	De breedtegemiddelde bodemligging bij de referentieberekening, zonder maatregelen, zonder klimaatverandering van de Waal ten opzichte van de beginsituatie.	56
7.15	Het verschil in de breedtegemiddelde bodemligging in de Waal van de simulatie met klimaatscenario S2W4 ten opzichte van de referentieberekening, zonder klimaatverandering.	56
7.16	Het verschil aan de benedenstroomse randen van de verschillende takken tussen de gemiddelde vooraf bepaalde afvoer en de gemiddelde gesimuleerde afvoer bij de aanpassing van de benedenstroomse randvoorwaarde bij klimaatscenario S2W4.	57
7.17	De breedtegemiddelde bodemligging bij de simulatie zonder maatregelen, zonder klimaatverandering van Pannerdensch Kanaal, Nederrijn en Lek ten opzichte van de beginsituatie.	57
7.18	Het verschil in de breedtegemiddelde bodemligging in het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de Lek van de simulatie met klimaatscenario S2W4 ten opzichte van de referentieberekening, zonder klimaatverandering.	58
7.19	sedimenttransport in de tak ‘Pannerdensch Kanaal – Nederrijn – Lek’ bij de referentieberekening met klimaatscenario S2W4	58
7.20	De breedtegemiddelde bodemligging ten opzichte van de beginsituatie in de takken IJssel, Keteldiep en Kattediep bij de referentieberekeningen zonder klimaatverandering.	59
7.21	Het verschil in de breedtegemiddelde bodemligging in de IJssel, het Keteldiep en het Kattediep van de simulatie met klimaatscenario S2W4 ten opzichte van de referentieberekening, zonder klimaatverandering.	59
7.22	Het verschil in bodemniveau bij maatregel "Grootschalige uiterwaardverlaging 1" t.o.v. de referentieberekening, bij klimaatscenario S0W0.	60
7.23	Het verschil in effect door klimaatscenario S2W4 bij de maatregel ‘Grootschalige uiterwaardverlaging 1’.	60
7.24	Het verschil in bodemniveau bij maatregel "Grootschalige uiterwaardverlaging 2" t.o.v. de referentieberekening, bij klimaatscenario S0W0.	61
7.25	Het verschil in effect door klimaatscenario S2W4 bij de maatregel ‘Grootschalige uiterwaardverlaging 2’.	61
7.26	Het verschil in bodemniveau bij maatregel "Zomerbedverlaging" t.o.v. de referentieberekening, bij klimaatscenario S0W0, in de verschillende takken.	62
7.27	Het verschil in effect door klimaatscenario S2W4 bij de maatregel ‘Zomerbedverlaging’, in de verschillende takken.	63
7.28	Het verschil in bodemniveau bij maatregel "Verwijderen hydraulisch knelpunt Lexkesveer" t.o.v. de referentieberekening, bij klimaatscenario S0W0, in de verschillende takken.	64
7.29	Het verschil in bodemniveau bij maatregel "Verwijderen hydraulisch knelpunt Lexkesveer" t.o.v. de referentieberekening, bij klimaatscenario S0W0, in de tak ‘Pannerdensch Kanaal - Nederrijn - Lek’.	64
7.30	Het verschil in effect door klimaatscenario S2W4 bij de maatregel ‘Verwijderen hydraulisch knelpunt Lexkesveer’, in de tak ‘Pannerdensch Kanaal - Nederrijn - Lek’.	65
8.1	Stromingsbeeld in het rivierbed	69

Lijst van tabellen

4.1	anthropogene oorzaken van zeespiegelstijging.	23
4.2	de scenario' s waarmee simulaties zijn uitgevoerd en enkele kenmerken.	27
5.1	afweging van de maatregelen.	33
6.1	overzicht van de geschematiseerde takken.	39
6.2	overzicht van de laterale debieten in het originele model.	39
6.3	calibratiefactoren voor het sedimenttransport.	41
6.4	Ω-waarden bij de splitsingspuntverdelingen.	41
6.5	overzicht van toegevoegde baggerwerkzaamheden.	43
6.6	overzicht van de controle berekeningen van 100 jaar.	45
6.7	overzicht van de controle berekeningen van 100 jaar.	45
6.8	overzicht van de referentieberekeningen.	45
6.9	verandering van floodplain base level voor maatregel “grootschalige uiterwaardverlaging 1”.	46
6.10	verandering van floodplain base level voor maatregel “grootschalige uiterwaardverlaging 2”.	46
6.11	verandering van zomerbed voor maatregel “zomerbedverlaging”.	46
6.12	uitgangspunten bij de uitgevoerde simulaties.	47
6.13	overzicht van de uitgevoerde simulaties.	47
7.1	overzicht duur simulaties.	48

1 Inleiding

Een groot gedeelte van Nederland ligt aan het water. Aan de westkant en noordkant wordt Nederland begrensd door de Noordzee. Midden in Nederland ligt het IJsselmeer en vanuit het zuiden en oosten komen verschillende rivieren Nederland binnen om in de Noordzee uit te monden.

Nederland bestaat dan ook voornamelijk uit de delta's van deze rivieren, de Rijn, de Maas en de Schelde.

Grote gedeeltes van deze delta's liggen onder het zeeniveau en ook verder landinwaarts is het maaiveld vaak lager dan het waterniveau in de rivier. Toch liggen deze gebieden niet onder water. Samen met steeds verder ontwikkelde technologie zorgen duinen en dijken ervoor dat deze gebieden droog blijven.

Het feit dat Nederland aan het water ligt heeft een grote rol gespeeld in de ontwikkeling. Naast veel problemen heeft het water immers ook veel voordelen en mogelijkheden met zich mee gebracht waar Nederland goed gebruik van heeft kunnen maken. Enkele voorbeelden hiervan zijn: de VOC, de visserij, de haven van Rotterdam en de Nederlands binnenscheepvaart. Het grootste gedeelte van de Nederlandse bevolking woont en/of werkt dan ook bij het water en hier zijn de grootste investeringen gedaan, zowel in kwantiteit als in kwaliteit.

Vandaar ook dat Nederland erg betrokken is bij haar rivieren en de veiligheid daaromheen. In 2001 zijn naar aanleiding van enkele recente gebeurtenissen de maatgevende afvoeren van de rivieren verhoogd. Volgens sommigen worden deze gebeurtenissen, de hoogwaters in 1993 en 1995, veroorzaakt door klimaatverandering, anderen wijzen erop dat deze hoogwaters nog steeds statistisch verklaarbaar zijn. Ook andere recente gebeurtenissen kunnen aanwijzingen zijn dat het klimaat verandert. Extreme droogtes zorgden voor slechte oogsten in de zomers van 1976 en 1995. Zware regenval in 1998 zorgde weer voor veel wateroverlast.

Er is daarom bezorgdheid over de toekomst, door klimaatverandering kunnen er namelijk grote veranderingen ontstaan in de randvoorwaarden van de Nederlandse leefomgeving. Een stijgende zeespiegel aan de ene kant en extremere rivierafvoeren aan de andere kant kunnen het laaggelegen Nederland ernstig ontregelen wanneer er niet tijdig op wordt ingespeeld.

Om met de verhoogde maatgevende afvoeren toch voldoende beveiligd te zijn tegen het water zijn verschillende maatregelen onderzocht en uitgevoerd. In 1999 is vervolgens in de 4^e Nota Waterhuishouding extra aandacht naar de hoogwaterbescherming gegaan. Naar aanleiding hiervan zijn verschillende projecten opgestart en een van deze projecten is Ruimte voor Rijntakken (RvR).

Het RvR-project onderzoekt mogelijkheden om zonder dijkverbeteringen toch meer bescherming mogelijk te maken wanneer dit, door verandering van de maatgevende hoogwater afvoeren, nodig is. De in het RvR-project voorgestelde maatregelen zorgen daarom voor waterstandsverlaging in de Rijntakken. Daarnaast zullen de maatregelen echter ook reacties opwekken van de rivierbodem. Over deze morfologische effecten is op de lange termijn echter nog weinig bekend.

In deze studie worden de morfologische problemen bekeken bij de maatregelen van het RvR-project over een periode van 500 jaar. Hiertoe is het nodig te kijken naar de randvoorwaarden van het riviersysteem. Deze randvoorwaarden zullen worden geconstrueerd aan de hand van de te verwachten klimaatveranderingen. Om hier inzicht in te krijgen zal eerst beknopt klimaat en klimaatverandering moeten worden onderzocht. Vervolgens zullen enkele maatregelen worden geselecteerd die met behulp van een computermodel zullen worden doorgerekend. Met de resultaten van deze berekeningen zal een kwalitatieve analyse van de te verwachten verschijnselen worden gedaan.

In hoofdstuk 2 zal het probleem en de aanpak van het probleem worden uitgelegd. Een beschrijving van het klimaat en klimaatveranderingen zal worden gegeven in hoofdstuk 3, waarna in hoofdstuk 4 scenario's van het klimaat van de toekomst worden beschreven. De Ruimte voor Rijntakken maatregelen komen in hoofdstuk 5 aan bod. Hoofdstuk 6 beschrijft de simulaties die met de scenario's en de geselecteerde maatregelen zijn gedaan. De resultaten hiervan worden besproken in hoofdstuk 7. Tenslotte staan in hoofdstuk 8 de conclusies van de studie.

2 Probleemanalyse

2.1 Omschrijving

In 2001 is de maatgevende afvoer van de rivieren verhoogd. De maatgevende afvoer van de Rijn is van 15.000 m³/s naar 16.000 m³/s gegaan, die van de Maas van 3650 naar 3800 m³/s. Om met de nieuwe maatgevende hoogwaterstanden, die met de maatgevende afvoeren worden berekend, voldoende beschermd te zijn tegen hoogwater, zijn er verschillende studies opgezet waarin verschillende maatregelen zijn voorgesteld. Enkele voorbeelden hiervan zijn 'Boertien I', 'Boertien II', 'Integrale Verkenning Rijntakken', 'Integrale Verkenning Benedenrivieren', 'Integrale Verkenning Maas' en 'Ruimte voor Rijntakken'.

Hierbij is vaak gekeken naar de maatgevende afvoeren in de komende 100 jaar en hoe de huidige rivieren daarop reageren.

Het Ruimte voor Rijntakken-project van Rijkswaterstaat (Silva, 2000) heeft in februari 2000 geleid tot een advies aan de staatssecretaris van Verkeer- en Waterstaat. Dit project heeft vooral het karakter van een verkenning en beleidsadvisering gehad. De hoofdvraag hierbij was of het mogelijk is de nieuwe maatgevende afvoeren het hoofd te bieden zonder een volgende ronde dijkversterking. Nog een ronde dijkversterking wordt namelijk onwenselijk geacht vanwege de stijgende kosten en risico's.

De verwachting is dat de maatgevende afvoeren in de toekomst nog verder zullen stijgen vanwege klimaatveranderingen. Ook aan de benedenstroomse zijde van de rivieren zullen er veranderingen optreden, want ook bij het niveau van de zeespiegel is de verwachting dat deze toeneemt vanwege klimaatveranderingen.

Over de klimaatverandering in de komende 100 jaar zijn veel studies gedaan. Voor de eeuwen daarna is echter nog niet veel bekend. Hier is ook veel onzekerheid over, aangezien dit afhankelijk is van veel factoren, waaronder de groei van de wereldbevolking en het energieverbruik daarvan.

Toch is het mogelijk scenario's te ontwikkelen voor de rivierafvoeren en het zeespiegelniveau. Met deze scenario's kunnen mogelijke situaties in de toekomst worden bekeken. De ontwikkeling van een scenario staat echter los van de kans dat deze scenario's ook daadwerkelijk optreden. Het is slechts een manier om met de inzichten van dat moment iets te kunnen zeggen over de toekomst, ook wanneer de kans op dergelijke scenario's onzeker is.

Om de onzekerheid omtrent een scenario te begrijpen is het noodzakelijk te weten op welke manier een scenario tot stand komt en welke processen daar een rol bij spelen.

Wanneer een scenario wordt gemaakt voor variabelen die afhankelijk zijn van klimaatverandering is het dus nodig het klimaat - in grote lijnen - te begrijpen.

Met behulp van de te ontwikkelen scenario's kan vervolgens worden gekeken naar hoe de rivieren hierop reageren.

Voor deze studie zal worden gekeken naar enkele maatregelen die in het Ruimte voor Rijntakken project zijn aangedragen. Hiertoe zal een selectie worden gemaakt uit de aangedragen maatregelen. De maatregelen in dit project zijn uitsluitend van toepassing op de rivier de Rijn in Nederland en haar vertakkingen. Andere rivieren zullen daarom verder buiten beschouwing worden gelaten.

2.1.1 Probleemstelling

Het is onbekend of als het klimaat verder verandert, de maatregelen die zijn voorgesteld in de Ruimte voor Rijntakken-studie, tot problemen zullen leiden op de lange termijn.

2.1.2 Doelstelling

Het doel van dit project is het bepalen van de effecten, met name op de morfologie, van de nu voorgestelde Ruimte voor Rijntakken maatregelen in de komende 500 jaar. Daarbij wordt verondersteld dat er in die periode, behalve het klimaat en de daaruit voortkomende rivierkundige ontwikkelingen, in de omgeving niets verandert (ceteris paribus).

2.2 Aanpak

Allereerst zal een samenvatting worden gegeven van de huidige inzichten met betrekking tot het klimaat en klimaatverandering. Klimaatverandering speelt immers een belangrijke rol wanneer rivieren op lange termijn worden bekeken, de randvoorwaarden zijn hier sterk van afhankelijk.

Met behulp van de scenario's voor de klimaatverandering zullen er scenario's voor de hydrodynamische en morfologische randvoorwaarden van de Rijn worden gemaakt. Ecologische en sociaal-economische invloeden zullen ook kort worden besproken, hoewel hier geen concrete waarden aan zullen worden gegeven. Dit valt namelijk buiten het vakgebied van de civiele techniek. Bovendien is het erg moeilijk deze te kwantificeren. Voor een exacte beschouwing is dit natuurlijk wel noodzakelijk!

Met de nieuwe randvoorwaarden zullen enkele lange termijn simulaties van de Rijn worden gedaan. Bij deze simulaties wordt gekeken naar of de voorgestelde maatregelen tot in de verre toekomst te toetsen zijn, bij veranderende randvoorwaarden en of er geen ongewenste neveneffecten optreden als gevolg van deze maatregelen.

3 Klimaat

3.1 Inleiding

Het klimaat bepaalt (voor een groot gedeelte) het leven op aarde. Door geografische verschillen in het klimaat is het mogelijk dat op bepaalde plaatsen bepaalde activiteiten wel mogelijk zijn en op andere plaatsen niet. Hieronder valt ook de groei en bloei van flora en fauna, en dus ook de ontwikkeling van bepaalde geografische gebieden op aarde en de ontwikkeling van de mens. Wanneer echter over klimaatverandering wordt gesproken, wordt het gemiddelde klimaat op aarde bedoeld, het globale klimaat.

Het klimaat is iets anders dan het weer. Het weer is een korte termijn verschijnsel en kan van dag tot dag of van jaar tot jaar verschillen. Het klimaat speelt op veel langere termijn een rol. Hierbij moet worden gedacht aan decennia tot geologische tijdschalen. Een verandering in het klimaat is dan ook niet te zien aan het weer op een bepaalde dag of in een bepaald jaar. Wel kunnen afwijkende registraties in achtereenvolgende jaren een voorbode zijn van klimaatverandering.

Het klimaat is een ingewikkeld systeem met veel – van elkaar afhankelijke – processen. Het klimaat zorgt ervoor dat de energie die de aarde van de zon ontvangt kan worden omgezet in flora en fauna en is in feite de motor van het leven op aarde.

Het klimaat verandert, zowel door natuurlijke processen als door menselijk handelen. Met klimaatverandering wordt soms het effect van dit menselijk handelen op het klimaat aangeduid. Hier zal hiermee echter de absolute verandering van het klimaat worden bedoeld, zowel door natuurlijke processen als door menselijk handelen.

Klimaatverandering kan twee verschillende vormen hebben. De eerste vorm van klimaatverandering is een verandering van het gemiddelde klimaat. Hierbij verandert bijvoorbeeld de gemiddelde temperatuur en wordt het op lange termijn kouder of warmer. De tweede vorm is een verandering in de variabiliteit van het klimaat. Het ene jaar kan het dan warmer zijn, terwijl het daarna kouder is. Op deze tweede vorm is moeilijker in te spelen.

In dit deel zal worden uitgelegd hoe de belangrijkste processen van het klimaat werken en hoe deze zo (kunnen) worden beïnvloed dat er klimaatverandering ontstaat.

3.2 Werking¹

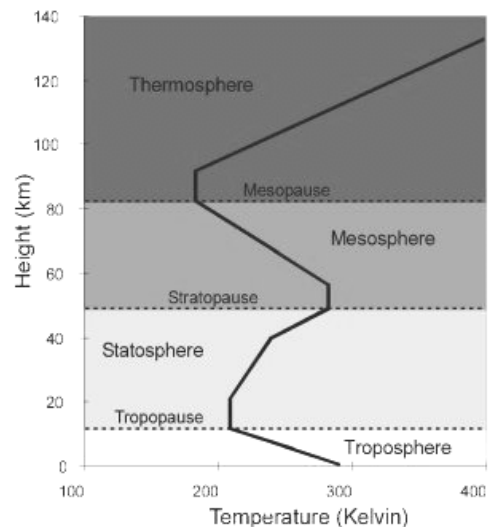
In deze paragraaf zullen de componenten van de aarde die te maken hebben met het klimaat worden uitgelicht. Op deze manier zal de complexiteit van het klimaat worden duidelijk gemaakt. De processen tussen deze componenten komen in de volgende paragraaf aan de orde.

3.2.1 De energiebalans

Het gemiddelde klimaat op aarde is afhankelijk van de energiebalans van de aarde. Dit is het evenwicht dat er is tussen de hoeveelheid energie die de aarde ontvangt (voornamelijk van de zon in de vorm van licht) en de energie die de aarde uitstraalt, bijvoorbeeld door haar warmte en door weerkaatsing van zonnestraling.

3.2.2 Atmosfeer

De energie van de zon wordt als eerste opgevangen door de atmosfeer. De atmosfeer bestaat uit veel lagen met allerlei gassen die de aarde omsluiten. Door de atmosfeer wordt de energie van de zon weerkaatst, verspreid, opgenomen of doorgelaten. De mate waarin dit gebeurt is afhankelijk van de concentraties van de verschillende stoffen in de atmosfeer.



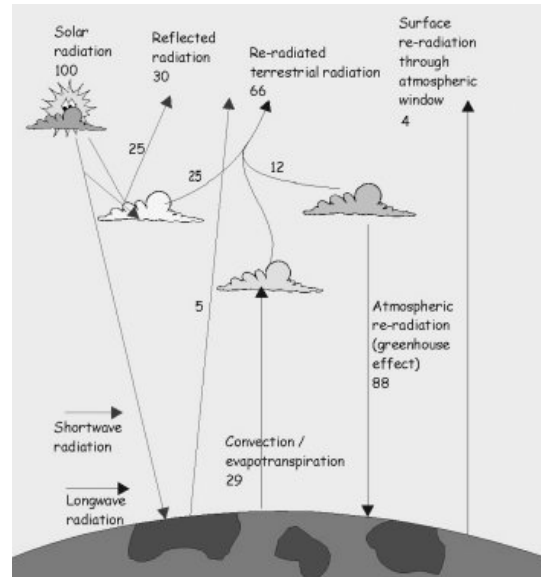
figuur 3.1 - overzicht van de luchtlagen in de atmosfeer

¹ o.a. naar Buchdahl (1995), hoofdstuk 1 "The Climate System"

Ook de energie die de aarde uitstraalt heeft te maken met de atmosfeer en een gedeelte van deze energie wordt hierdoor dan ook tegengehouden. Dit wordt het broeikaseffect genoemd (in het engels 'greenhouse effect'). Zonder broeikaseffect zou de aarde 33K kouder zijn, gemiddeld 255K (= -18°C) i.p.v. 288K (= 15°C). Stoffen in de atmosfeer die deze energie tegenhouden worden broeikasgassen genoemd. Hieronder worden ook andere deeltjes in de lucht (is vaste of vloeibare vorm) verstaan dan alleen gassen. Door de temperatuur van de lucht wordt het grootste deel van het broeikaseffect gerealiseerd in de hogere lagen van de atmosfeer. In figuur 3.1 is een overzicht van de lagen in de atmosfeer met een temperatuurverloop gegeven.

De laatste decennia is er veel bezorgdheid over de menselijke uitstoot van broeikasgassen, bijvoorbeeld door de toename van de industrie.

In figuur 3.2 staat een overzicht (in het engels) van de verschillende processen in de atmosfeer, de getallen zijn percentages van de totale energiestroom.



figuur 3.2 - overzicht van de energiestroom in de atmosfeer

3.2.3 Oceanen

Een tweede opslag van energie vindt plaats in de oceanen. Doordat water een veel grotere warmtecapaciteit heeft dan de lucht in de atmosfeer, kunnen de oceanen een veel grotere hoeveelheid energie opslaan dan de atmosfeer, terwijl de temperatuur slechts enkele graden hoeft te veranderen. Wanneer er bijvoorbeeld een verandering zou plaatsvinden in de hoeveelheid energie in het oceaan-atmosfeer-systeem, zou de temperatuurverandering in de atmosfeer 30 maal zo groot zijn in vergelijking met die van de oceanen. Ook zorgen de oceanen – net als de atmosfeer – ervoor dat de energie wordt verspreid over de aarde door oceaanstromingen.

3.2.4 Cryosfeer

De cryosfeer bestaat uit die gebieden – zowel ter land als ter zee – die bedekt worden door sneeuw en ijs. Hieronder vallen dus Antarctica, de Noordelijke IJszee, Groenland, Noord Canada, Noord Siberië en de hogere berggebieden waar de gemiddelde temperatuur niet boven het vriespunt uitkomt. De cryosfeer speelt een belangrijke rol in het klimaatsysteem omdat zij een hoog albedo² heeft. Op sommige plaatsen kan deze reflectie zelfs oplopen tot 90%.

3.2.5 Biosfeer

De biosfeer van de aarde bestaat uit de flora en fauna op aarde. De biosfeer beïnvloedt het klimaat door het albedo van de aardoppervlakten te beïnvloeden. Daarnaast worden door de biosfeer de concentraties van gassen en andere stoffen in de atmosfeer beïnvloedt

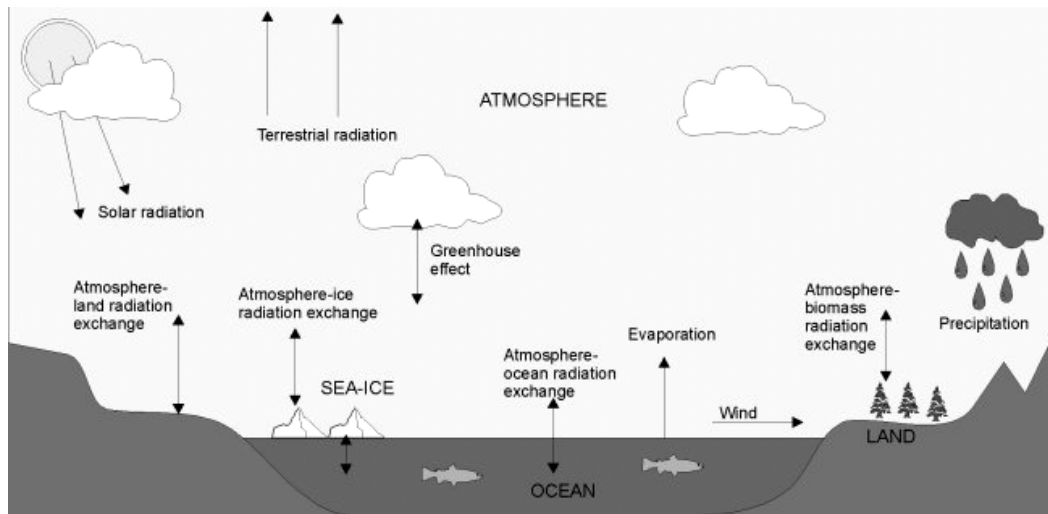
3.2.6 Geosfeer

De geosfeer van de aarde bestaat uit de bodem, sediment, rotsen, de aardkorst en het binnenste van de aarde. Ook deze hebben invloed op het globale klimaat op verschillende tijdschalen. Veranderingen in de vorm van oceaانبekkens, grootte van bergketens beïnvloeden de energieoverdrachten tussen verschillende gebieden. Veranderingen in sedimentaanvoer in rivieren en vulkanisme kunnen de concentratie van stoffen in de oceanen en de atmosfeer beïnvloeden

² Oppervlakten met een hoog albedo weerkaatsen een groot deel van de inkomende zonnestraling. Oppervlakten met een laag albedo daarentegen nemen veel energie op. Het albedo van een oppervlakte kan variëren tussen 0 en 1, hierbij stelt een waarde van 1 een geheel reflecterend oppervlakte voor en een 0 een geheel absorberend oppervlakte. Witte oppervlakten – zoals sneeuw en ijs – hebben een hoog albedo (0,8 – 0,9), donkere oppervlakten – zoals bossen en oceanen – hebben een lager albedo (0,1 – 0,3).

3.2.7 Interactie

Tussen al deze componenten zijn er mechanismen die ervoor zorgen dat energie kan worden uitgewisseld. Zo is er tussen de oceanen en de atmosfeer neerslag en verdamping en tussen de biosfeer en de atmosfeer verbranding en tussen de cryosfeer en de oceanen het smelten van ijs. In figuur 3.3 is een overzicht gegeven van een aantal mogelijke energieoverdrachten.



figuur 3.3 overzicht van energiestromen tussen de verschillende klimaatcomponenten

3.3 Veranderingen van het klimaat³

Met de grote verscheidenheid aan componenten is het klimaat een zeer dynamisch systeem. Een verstoring in 1 van de componenten kan invloed hebben op alle andere componenten en dus ook op het klimaat. Deze verstoring kan diverse oorzaken hebben, zowel van gebeurtenissen op aarde als van daarbuiten: er zijn dus interne en externe mechanismen die klimaatverandering kunnen veroorzaken. Via responsmechanismen krijgen vervolgens andere componenten ook met deze veranderingen te maken en kan de verstoring worden versterkt of afgezwakt.

Een ander onderscheid dat nog wordt gemaakt tussen processen die te maken hebben met klimaatverandering is dat tussen processen die de hoeveelheid straling beïnvloeden die de aarde bereikt en processen die dat niet doen. Wanneer dit het geval is, heeft het proces directe invloed op de hoeveelheid ontvangen energie door de aarde.

3.3.1 Externe mechanismen

Externe mechanismen zijn mechanismen waar het klimaatsysteem van de aarde zelf geen rol in speelt. Hierdoor veranderen dus de externe krachten, zoals de straling van de zon.

De zon

De zon is de belangrijkste energiebron van de aarde. De hoeveelheid energie die de aarde van de zon ontvangt kan door twee oorzaken variëren.

Ten eerste is de kracht van de zon niet altijd gelijk. Naast de verschillende fasen van een zon, vanaf het ontstaan tot zijn uitsterving, is er een periodiciteit te ontdekken in de zonnekracht. Zowel Foukal (1990), Gough (1990) als Weiss (1990) hebben in 1990 een periode ontdekt van zowel 11 jaar als 22 jaar waarin het aantal zonnevlekken, die in het oppervlak van de zon te zien zijn, varieert. Het aantal zonnevlekken is een maat voor de activiteit van de zon en de hoeveelheid energie die zij uitstraalt.

De mate waarin de zonnekracht in deze periode varieert is kleiner dan 1%. Hoewel de grootte van de variaties niet significant lijkt, blijkt uit veel historische klimaatgegevens dat er, tenminste statistisch, een periodiciteit gelijk aan een of beide cycli waar te nemen is.

Bij veel mechanismen die het klimaat lijken te beïnvloeden worden dit soort ‘bewijzen’ aangedragen, hoewel er geen fysisch bewijs is – ook geen dat de theorie tegensprekt overigens – blijkt uit een spectraalanalyse van historische gegevens dat er een statistische overeenkomst is.

³ o.a. naar Buchdahl (1995) hoofdstuk 2 ‘Causes of Climate Change’

In Lassen (1991) beschrijven K. Lassen en E. Friis-Christensen ook een cyclus met een periode van 80 jaar in de kracht van de zon.

Naast de kracht van de zon kan de hoeveelheid energie op aarde ook variëren door de baan van het zonnestelsel volgens Hugget (1991) en Williams (1975). Hoewel het door de enorme tijdschaal op dit moment onmogelijk is dit te bewijzen, zijn er ook hiervoor aanwijzingen te vinden. De periode van deze baan wordt op dit moment geschat op 303 miljoen jaar en zou van invloed kunnen zijn op de ijstijdcyclus van 700 miljoen jaar (Fischer, 1984).

De Milankovitch theorie

Ook met betrekking tot de aarde zijn er enkele externe mechanismen die klimaatveranderingen kunnen veroorzaken. Aan het eind van de 19^e eeuw heeft Croll een theorie ontwikkeld die de ijstijden van het Pleistoceen koppelt aan de variaties in de baan van de aarde om de zon. Croll's ideeën werd en verder uitgewerkt door Milankovitch (1941); de theorie die de astronomische klimaatveranderingen beschrijft wordt nu de Milankovitch theorie genoemd. In de Milankovitch theorie worden drie soorten variaties van de baan van de aarde beschreven.

Declinatie

De declinatie is de hoek die het equatorvlak van de aarde maakt met het eclipticavlak, de hoek tussen het vlak loodrecht op de aardas en het vlak waarin de aarde draait om de zon (Holthuijsen, 1998). Deze hoek varieert met een periode van 40.000 jaar tussen 22° en 24,5°. De declinatie zorgt er niet voor dat de hoeveelheid energie die de aarde ontvangt varieert, maar wel de verdeling over de aarde. Declinatie is dus een proces dat de hoeveelheid straling op de aarde niet beïnvloedt, maar wel de manier waarop deze wordt weerkaatst of omgezet.

Excentriciteit

De excentriciteit van de aarde wordt veroorzaakt doordat de baan van de aarde om de zon geen perfecte cirkel is, maar een ellips. Deze ellips vervormt met periodes van 95.000 en 413.000 jaar (Berger, 1976). In deze periodes verandert de excentriciteit van $e = 0.005$ tot $e = 0.06$ volgens de volgende formule:

$$e = \frac{\left\{ (x^2 - y^2)^{1/2} \right\}}{x}$$

waarbij:

x : afstand tussen de aarde en de zon in het apohelium (wanneer de aarde en de zon het verst uit elkaar staan)

y : afstand tussen de aarde en de zon in het perihelium (wanneer de aarde en de zon het dichtst bij elkaar staan)

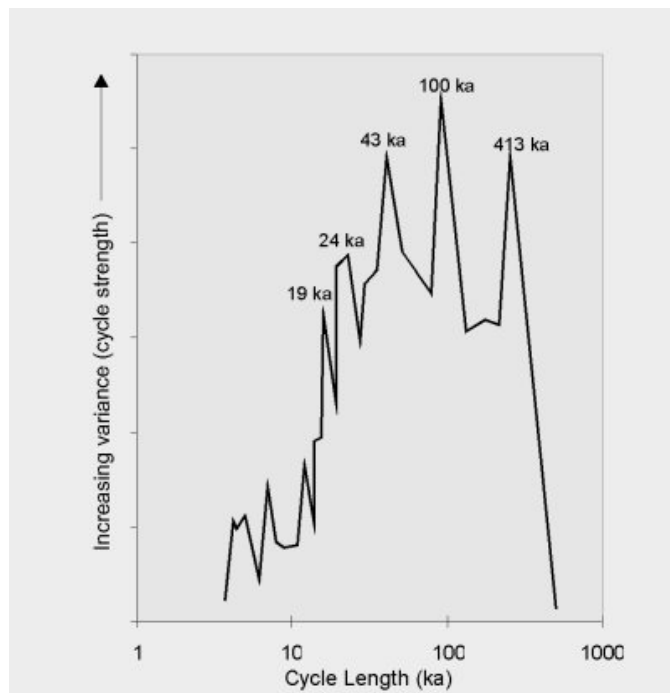
De excentriciteit beïnvloedt wel de hoeveelheid energie die de aarde ontvangt, hoewel de variatie niet erg groot is.

Precessie

De draaiing van het equatorvlak in het eclipticavlak (zie ook *Declinatie*). Deze omwenteling heeft ook twee periodes, 19.000 en 23.000 jaar en beïnvloedt ook de verdeling van de energie over de aarde en niet de hoeveelheid energie (Holthuijsen, 1998).

Bewijzen

Sinds het ontstaan van deze theorie zijn er steeds meer bewijzen gevonden die de theorie steunen. Onder andere door spectruumanalyses van historische klimaatgegevens zijn vergelijkbare periodes ontdekt in de



figuur 3.4 – spectraalanalyse van historische klimaatgegevens

afwisseling van ijstijden en interglacialen. (Hays e.a., 1976; figuur 3.4).

Toch is de theorie niet geheel onomstreden en blijft het moeilijk een causaal verband aan te tonen. Het is bijvoorbeeld onduidelijk waarom de veranderingen globaal blijken te zijn. Volgens de theorie zouden de effecten op het Noordelijk en het Zuidelijk halfrond juist tegengesteld moeten zijn. Bovendien lijkt, hoewel de verdeling van energie over de aarde door geografische verschillen in albedo wel van invloed kan zijn op de hoeveelheid teruggekaatste energie, het mechanisme niet sterk genoeg om op zichzelf een dergelijke klimaatverandering te veroorzaken. Waarschijnlijk wordt het mechanisme door verschillende interne responsmechanismen beïnvloedt.

3.3.2 Interne mechanismen

Interne mechanismen zijn mechanismen waarin het klimaatsysteem zelf wel een rol speelt. Hierdoor veranderen dus geen externe krachten, maar het klimaat wel.

Orogenese

Orogenese is het proces van tektonische activiteit in de aarde waardoor bergketens ontstaan en continenten worden opgetild. Continenten en bergketens kunnen het klimaat beïnvloeden, vooral noord-zuid georiënteerde bergketens kunnen makkelijk globale circulatiepatronen verstoren. Bovendien wordt neerslag vaak veroorzaakt doordat vochtige lucht langs bergketens opstijgt of wordt verwarmd door warmere landmassa's en daarom opstijgt. Doordat de lucht vervolgens afkoelt raakt deze verzadigd en ontstaat er neerslag.

Ook andere evenwichten worden door orogenese beïnvloedt, doordat bergketens boven het water uitkomen zal het albedo veranderen en doordat er een groter oppervlak blootligt zal ook de erosie daarvan worden beïnvloedt.

Epirogenese

Net als de orogenetische processen worden de epirogenetische processen aangedreven door de tektoniek van de aarde. Bij de epirogenese gaat het echter om de globale positie van landmassa's. De manier waarop dit het klimaat beïnvloedt is gelijk aan die bij orogenese.

Vulkanische activiteit

Door vulkanische activiteit kunnen grote hoeveelheden gassen de atmosfeer in gebracht worden. Door deze gassen, die veel zeer reflecterende zwavelzuurverbindingen kunnen bevatten, is het mogelijk dat tot tientallen procenten van de energie van de zonnestraling de aarde niet bereikt. Deze reductie kan echter gedeeltelijk worden gecompenseerd doordat de uitgaande straling van de aarde ook wordt tegengehouden. Het totaaleffect is een vermindering van 5 tot 10 % van de energie die aan het aardoppervlak wordt ontvangen.

In verschillende studies is gebleken dat het effect van een enkele uitbarsting kan leiden tot een afkoeling van 0,3 °C gedurende 1 tot 2 jaar na de uitbarsting (Kelly & Sear, 1984; Sear e.a., 1987) Het is echter niet waarschijnlijk dat enkele uitbarstingen op langere termijn tot klimaatveranderingen leiden.

De samenstelling van de uitgestoten gassen is afhankelijk van de aard van de vulkanische activiteit. Bij explosieve uitbarstingen zal in verhouding meer stof worden uitgestoten en bij rustigere uitbarstingen meer zwavelzuurverbindingen. Door deze wisselende samenstelling is het effect op lange termijn door vulkaanuitbarstingen erg onzeker. Zwavelzuurverbindingen kunnen immers een afkoelend effect hebben, terwijl broeikasgassen, die ook kunnen worden uitgestoten, juist een opwarming kunnen veroorzaken.

3.3.3 Responsmechanismen⁴

Er bestaan allerlei responsmechanismen op veranderingen in de aandrijvende krachten van het klimaat. Hieronder vallen positieve en negatieve responsmechanismen. Door een positief responsmechanisme wordt de initiële verandering versterkt, terwijl een negatief responsmechanisme de verandering afremt. Hieronder zullen enkele responsmechanismen worden behandeld.

Waterdamp

Waterdamp is een van de belangrijkste broeikasgassen omdat het in grote hoeveelheden voorkomt in de atmosfeer. Wanneer de temperatuur van lucht stijgt, kan het meer waterdamp opnemen, voor het condenseert en

⁴ o.a. naar IPCC (2001) hoofdstuk D.1 "Climate Processes and Feedbacks"

neerslag vormt, de verzadigingsgraad ligt hoger. Vooral in de onderste lagen van de atmosfeer zal daarom meer waterdamp worden opgenomen wanneer de temperatuur stijgt. De bovenste lagen zijn echter vaak nog niet verzadigd. Het werkelijke effect op het broeikas effect is daarom moeilijk in te schatten. Met de huidige modellen blijkt dat het responsmechanisme van waterdamp de globale opwarming verdubbelt. Het responsmechanisme van waterdamp is dus een positief responsmechanisme.

Wolken

Net als waterdamp kunnen wolken zowel de inkomende als uitgaande straling beïnvloeden. Welk effect het sterkst is, is onder andere afhankelijk van de hoogte, de dichtheid, de samenstelling van de wolken en de verdeling van waterdamp en waterdruppels in de wolken. Hoewel het simuleren van wolken en het ontstaan ervan steeds verbeterd is, is er nog steeds veel onduidelijkheid over zowel de grootte van als het teken van de invloed van wolken op de energiebalans van de aarde.

Stratosfeer⁵

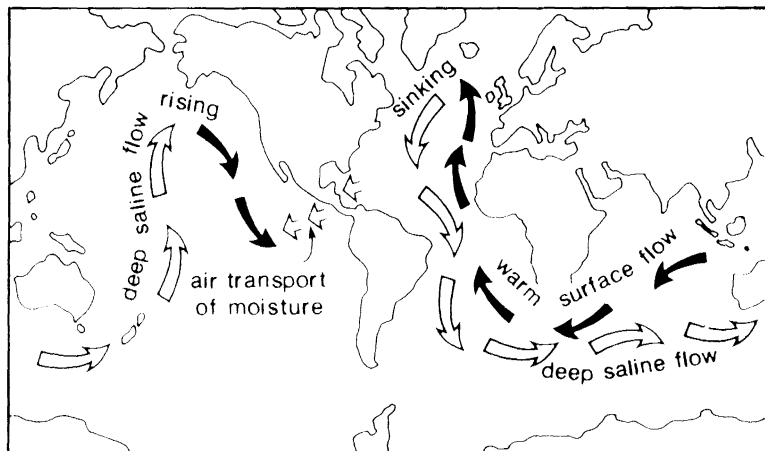
Energiegolven die ontstaan in de troposfeer, kunnen zich verspreiden naar de stratosfeer waar ze worden geabsorbeerd. Veranderingen in de stratosfeer kunnen daarom beïnvloeden waar en hoe deze golven worden geabsorbeerd, wat weer invloed kan hebben op de troposfeer.

Veranderingen in zonnestraling, voornamelijk ultraviolette, leiden tot fotochemisch opgewekte ozon veranderingen en veranderen zo de mate van verhitting van de stratosfeer. Deze kunnen de circulatie in de troposfeer beïnvloeden. Doordat sommige processen in de stratosfeer vaak onvoldoende worden meegenomen wordt de onzekerheid van modelresultaten vergroot.

Oceaanstromingen

Oceaanstromingen vervoeren energie van de tropen naar hogere breedten. De oceaan wisselt warmte, water (door verdamping en neerslag) en CO₂ uit met de atmosfeer. Vanwege zijn enorme massa en warmtecapaciteit remt de oceaan klimaatverandering af en wordt de tijdschaal van de respons van het oceaan-atmosfeer systeem beïnvloed.

Een voorbeeld van een dergelijke stroming is de 'North Atlantic Deep Water'-stroming (NADW). Deze stroming vervoert warmte vanuit tropische regionen richting het noorden door de Atlantische Oceaan. In de buurt van Groenland koelt de stroming af en wordt het zoutgehalte door ijsvorming hoger. Het zwaardere koudere water zinkt en stroomt terug richting de evenaar. Het vervoert koud water vanuit het Noorden van de Atlantische Oceaan naar het zuiden van de Atlantische Oceaan, de Indische Oceaan en de Stille Oceaan. In figuur 3.5 is hier een schematische tekening van te zien.



figuur 3.5 - de "North Atlantic Deep Water"-stroming

Er is aanzienlijke vooruitgang geboekt in de interpretatie van de processen in de oceaan die relevant zijn voor klimaatverandering. Toch zijn er nog grote onzekerheden in de representatie van processen op kleinere schaal zoals stromingen tussen en langs landmassa's, convectie en vermenging. In simulaties zijn grensstromingen vaak zwakker en breder dan werkelijk, maar het gevolg voor het klimaat hiervan is niet duidelijk.

⁵ zie paragraaf 3.2.2 "atmosfeer"

Cryosfeer⁶

Ijs op zee reflecteert meer energie dan het wateroppervlak. Bovendien isoleert zee-ijs het water van warmteverliezen. Wanneer het zee-ijs vermindert zal dit dus, vooral op hogere breedtegraden een positieve respons op klimaatveranderingen geven.

Ook wordt de uitwisseling van oppervlaktewater met diepere lagen beïnvloedt. Door de vorming van ijs stijgt de concentratie zout en dus ook de dichtheid in de bovenste lagen van het water.

Op land heeft sneeuw en ijs ook een hoger albedo dan het landoppervlak, hoewel het verschil hier kleiner is dan bij water. Ook hier vindt dus een positieve terugkoppeling plaats.

In de huidige klimaatmodellen worden vanwege de mogelijk grote invloed daarom steeds ingewikkeldere processen geïntroduceerd waarmee de bedekking met sneeuw en ijs wordt gesimuleerd.

Landoppervlak

Veranderingen in het landoppervlak en -gebruik kunnen belangrijke terugkoppeling hebben op de uitwisseling van energie, water en koolstof tussen het landoppervlak en de atmosfeer. Het soort en de dichtheid van de lokale begroeiing kan hierbij een rol spelen evenals de fysische eigenschappen van de bodem. Deze kunnen worden bepaald met behulp van observaties door satellieten.

Grootschalige veranderingen van het landoppervlak kunnen het globale klimaat op verschillende manieren beïnvloeden. De ontbossing in de tropen is een goed voorbeeld waardoor verdamping is verminderd en de temperatuur van het landoppervlak is verhoogd. Het is echter nog moeilijk te zeggen hoe groot het effect hiervan is op de hydrologische cyclus.

Recente ontwikkelingen hebben de straling van de aarde, water- en carbonocyclus gekoppeld aan verschillende nieuwe eigenschappen van de grond, waardoor de simulatie van uitwisseling tussen land en atmosfeer duidelijk is verbeterd. Desondanks is er nog veel onduidelijk over de simulatie van de vochtigheid van de bodem, afvoer van neerslag en verandering van landgebruik.

3.3.4 Conclusie

Al met al blijkt dat er erg veel processen zijn die het klimaat kunnen beïnvloeden op zeer verschillende tijdschalen. Voor veel van deze processen geldt dat de invloed op het klimaat nog niet bewezen is en dat over de grootte en/of richting nog minder te zeggen is. De onduidelijkheid over deze processen maakt het onmogelijk eenduidige voorspellingen te doen over het toekomstige klimaat.

3.4 Geschiedenis van het klimaat⁷

Klimaatverandering is een proces dat op een grote tijdschaal speelt en grote gevolgen kan hebben. Om inzicht te krijgen in de orde van grootte van klimaatveranderingen is het interessant te kijken naar het klimaat in het verleden. Omdat het klimaat echter nog niet zo heel lang wordt gemeten, is het noodzakelijk hiervoor ook gebruik te maken van andere bronnen.

In deze paragraaf zal eerst worden uitgelegd hoe inzicht kan worden verkregen in het klimaat van het verleden. Daarna zal een samenvatting worden gegeven van de geschiedenis van het klimaat.

3.4.1 Bronnen

Er zijn verschillende bronnen waar gebruik van kan worden gemaakt, hieronder worden enkele wat uitgelicht.

Archieven van metingen

Het klimaat van de laatste eeuwen kan vrij nauwkeurig worden gereconstrueerd met archieven van meteorologische metingen die zijn verricht. De eerste gegevens over neerslag en temperatuur stammen uit de 17^e eeuw, de nauwkeurigheid hiervan is echter moeilijk te bepalen. De ontwikkeling van het klimaat is voor het grootste deel in kaart gebracht met de veranderingen in luchtcirculatiepatronen die sinds halverwege de 20^e eeuw, met de komst van weerballonnen en satellieten, bekend zijn.

⁶ zie paragraaf 3.2.4 "Cryosfeer"

⁷ uit Buchdahl (1995), hoofdstuk 3 en Lamb (1995), hoofdstuk 5

Historische documenten

Documenten als scheepsjournalen, logboeken van landbouwbedrijven en bouwbedrijven kunnen ook een grote bron van gegevens zijn over de geschiedenis van het klimaat. Pas sinds kort worden deze documenten echter meteorologisch geanalyseerd.

IJskappen

Door de wisselende seizoenen worden in ijskappen jaarlagen gevormd. Uit deze lagen zijn verschillende zaken af te leiden als duur van de seizoenen, sneeuwval en temperatuur. Ook is het mogelijk stabiele isotopen te onderzoeken in de ijslagen.

Isotopen

Met behulp van metingen van isotopen zijn verschillende klimaatparameters te onderzoeken. Er zijn verschillende isotopen. De belangrijkste zijn die van zuurstof en koolstof. De isotopen van zuurstof zijn stabiel. Er zijn drie isotopen, ^{16}O , ^{17}O en ^{18}O , deze isotopen verschillen in het aantal protonen en neutronen per molecuul. De isotopen met meer protonen en neutronen zijn zwaarder. Lichtere isotopen zullen eerder verdampen uit de zee en neerslaan - bij lagere temperaturen - dan zwaardere isotopen. De verhouding van de verschillende isotopen in de neerslag en dus in de ijskappen is dus afhankelijk van de temperatuur. Ook de verhouding van de isotopen in marien organisch sediment zegt iets over de temperatuur ten tijde van het leven van het organisme. Koolstof heeft ook drie isotopen, ^{12}C , ^{13}C en ^{14}C . Van deze isotopen is de laatste niet stabiel, maar deze vervalt na verloop van tijd tot stikstof. Dit gebeurt met een snelheid die de halfwaardetijd van het isotoop wordt genoemd. Door de verhouding van de verschillende isotopen te bepalen is de leeftijd van het monster te bepalen.

Dendroklimatologie

Dendroklimatologie onderzoekt het klimaat door te kijken naar de jaarringen van bomen. Door de seizoensafhankelijke veranderingen zijn jaarlijks ringen te onderscheiden in de stam van bomen, de dikte van deze ringen is afhankelijk van het klimaat in dat bepaalde jaar.

Oceaanbodem

Jaarlijks slaat een enorme hoeveelheid sediment neer op de oceaanbodem. De samenstelling van dit sediment kan een indicator zijn van het klimaat in die oceaan of op aangrenzende continenten. Zowel het organische en niet-organische sediment kan hierbij een rol spelen. Ook kan hiermee een beeld worden gevormd van veranderingen in oceaanstromingen.

Aardebodem

Ook sedimentlagen op het land kunnen veel informatie verschaffen. Hieraan wordt bijvoorbeeld bewijs ontleend voor de uitgestrektheid van landijs en de ligging van de kustlijn.

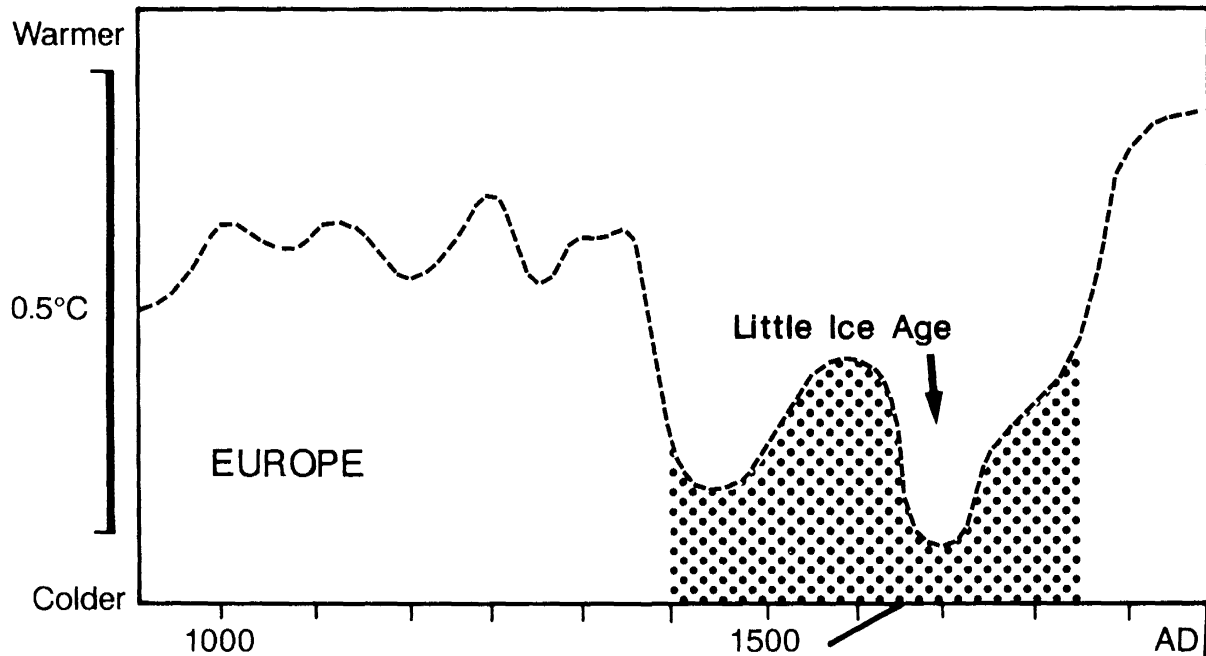
Pollen analyse

De analyse van pollen in ijslagen en sedimentlagen geeft ook veel informatie over het klimaat dat heerste in de tijd dat deze lagen zijn afgezet. Het laat zien welke vegetatie waar en wanneer heeft gegroeid.

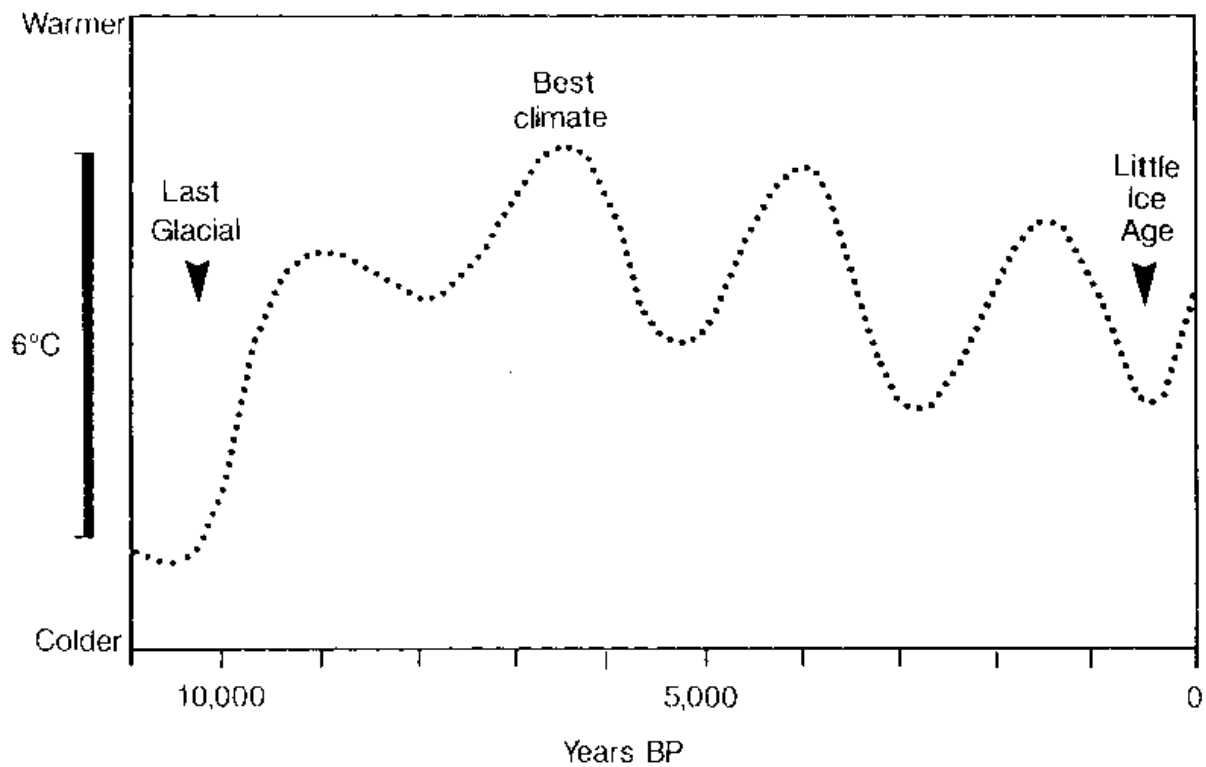
In bijlage A staat een overzicht van de genoemde en enkele andere bronnen en enkele kenmerken ervan, "Gegevens voor de reconstructie van de geschiedenis van het klimaat".

3.4.2 Verloop

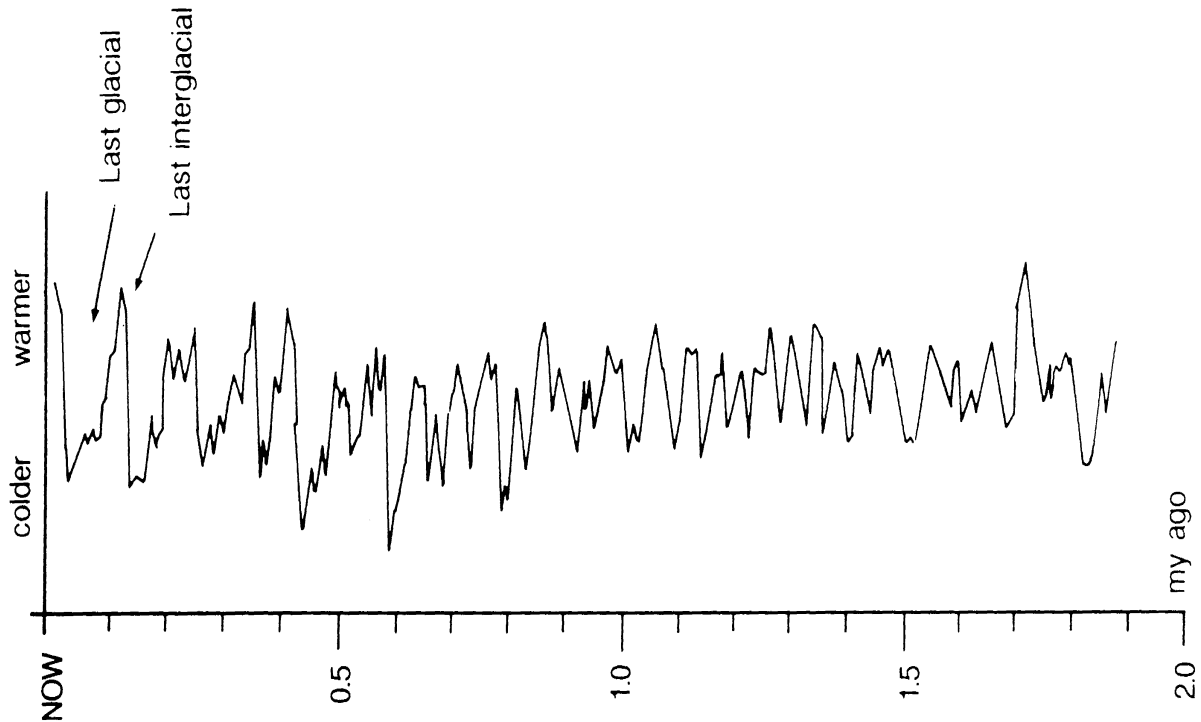
Met behulp van de eerder genoemde bronnen zijn verschillende reconstructies gemaakt van de geschiedenis van het klimaat. Hieronder staan in figuren 3.6, 3.7 en 3.8 ter illustratie enkele grafieken van het temperatuurverloop over verschillende perioden.



figuur 3.6 – temperatuurverloop in Europa de afgelopen 1000 jaar; (bron: van Andel, 1994)



figuur 3.7 – temperatuurverloop afgelopen 10000 jaar; (bron: van Andel, 1994)



figuur 3.8 – warmteverloop de afgelopen 2000000 jaar; (bron: van Andel, 1994)

Te zien is dat er veel variatie in het klimaat is, vooral wanneer naar een termijn van duizenden jaren wordt gekeken. Ook valt op dat er verschillende periodieke glacialen⁸ en interglacialen⁹ te zien zijn.

3.5 Huidig klimaat

Recent onderzoek heeft aangetoond dat het klimaat sneller verandert dan eerst was aangenomen. De ‘International Panel on Climate Change’ (IPCC) waarschuwt in haar ‘Third Assessment Report’ in 2001 voor versnelde klimaatveranderingen als gevolg van menselijke activiteiten (IPCC, 2001).

Enkele veranderingen die volgens de inzichten van de IPCC te verwachten zijn:

- hogere gemiddelde temperatuur
- IJskappen op bergachtige gebieden en gletsjers zullen zich verder terugtrekken
- Zeespiegelstijging van 0,09 tot 0,88 meter van 1990 tot 2100
- gemiddeld meer neerslag en meer verdamping
- meer extreem natte en droge periodes
- meer extremen wat betreft neerslag

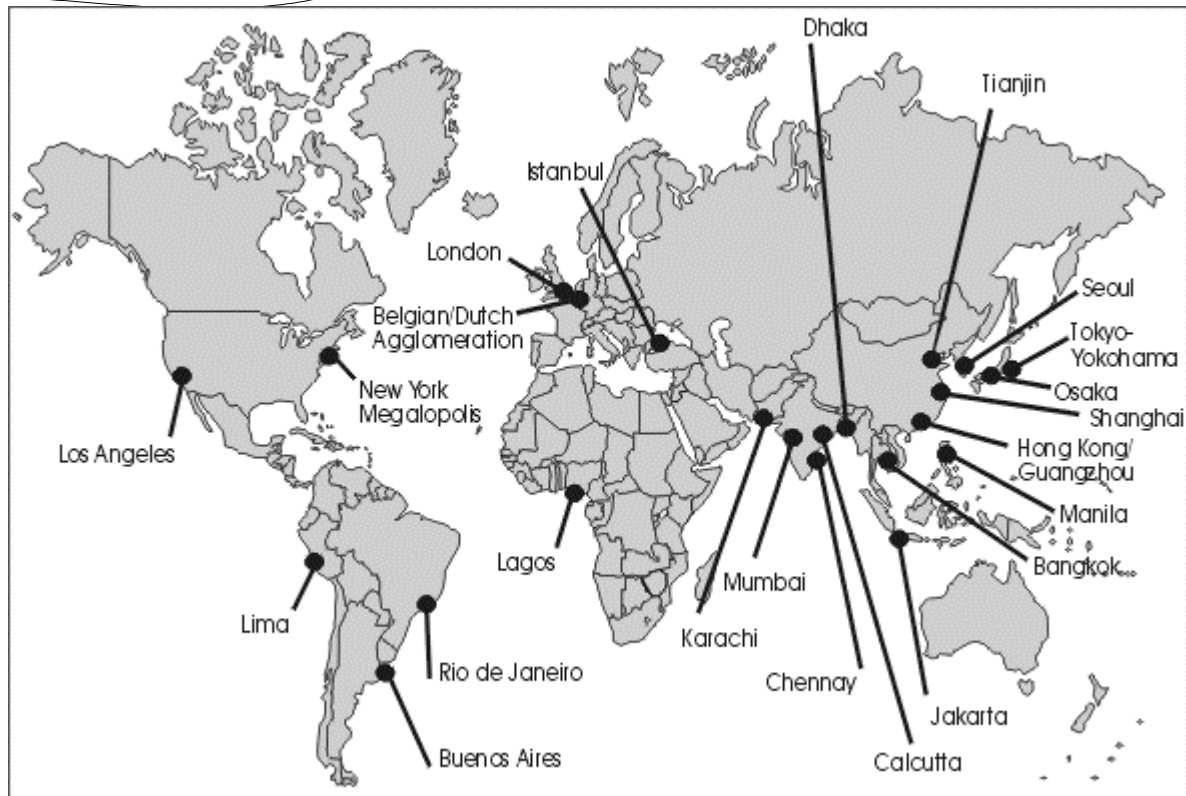
Voor een groot deel van de wereldbevolking kan klimaatverandering grote gevolgen hebben. Van de wereldbevolking woont en werkt op dit moment zo'n 37% binnen 100 kilometer van de kust. In figuur 3.10 is een overzicht te zien van de grote agglomeraties aan de kust. Wanneer de zeespiegel stijgt kan hierdoor de veiligheid daar worden bedreigd. Wanneer door de neerslagtoename de afvoeren van grote rivieren stijgen wordt wellicht nog een groter deel van de wereldbevolking bedreigd.



figuur 3.9 – veel mensen wonen en werken aan het water

⁸ glaciaal : periode met koudere temperaturen, ijstijd

⁹ interglaciaal : periode met warmere temperaturen, periode tussen 2 ijstijden



figuur 3.10 - Agglomeraties in kustzones

Al met al is de huidige visie op het klimaat als volgt:

- De aarde wordt warmer, globale oppervlakte temperaturen laten een opwaartse trend zien, met 2 grote opwarm perioden van 1910 tot 1945 en na 1976. De tendens is dat de temperatuur van lucht boven land sneller stijgt dan die boven de oceanen.
- Weerballonmetingen laten zien dat de temperaturen in de lagere troposfeer aan het stijgen zijn sinds 1958, hoewel na 1979 nog maar licht. De satellietgegevens van na 1979 laten gelijksoortige trends zien.
- De afname in de dagelijkse temperatuurverandering boven land valt samen met toenames van de hoeveelheid bewolking, neerslag en waterdamp.
- De bijna wereldwijde afname van gletsjerijs en andere ijsmassa's is consistent met de temperatuurstijgingen. Enkele uitzonderingen in kustgebieden komen overeen met variaties van de luchtcirculatiepatronen en neerslagtoenames.
- De afname van sneeuwbedekking en het korter worden van de periodes van ijsbedekking op wateroppervlakten komen overeen met de temperatuurstijgingen op het noordelijk halfrond.
- De afname van ijsmassa's in de poolgebieden in de zomer is in overeenstemming met de temperatuurstijging boven het aangrenzende land.
- De warmteopslag in de oceanen is toegenomen en de globale zeespiegel is gestegen
- De toename van waterdamp in de troposfeer in de afgelopen 25 jaar komt kwalitatief overeen met de temperatuurstijgingen in de troposfeer en een aangepaste hydrologische cyclus die extremere en zwaardere regenbuien tot gevolg heeft in veel gebieden met stijgende neerslag.
- Op enkele delen van de aarde is de temperatuur niet gestegen, voornamelijk in delen van de oceanen op het zuidelijk halfrond en delen van Antarctica
- Er zijn geen duidelijke trends in de intensiteit en frequentie van tropische cyclonen en zware lokale stormen in de laatste helft van de 20^{ste} eeuw.

3.6 Toekomstig klimaat

Over het klimaat is dus nog veel onduidelijk. De vele processen en componenten, waarvan enkele zijn beschreven in paragrafen 3.2 en 3.3, maken dat het klimaat een onoverzichtelijk en ingewikkeld systeem is. Met

behulp van computersimulaties is het toch mogelijk enig inzicht te verwerven in het klimaat. Hierbij wordt gebruik gemaakt van modellen die (delen) van het klimaatsysteem vereenvoudigd weergeven.

Het systeem blijkt bovendien afhankelijk te zijn van de ontwikkeling in menselijke activiteiten. Door de UNEP¹⁰ en de WMO¹¹ is in 1988 de IPCC opgericht, het "Intergovernmental Panel on Climate Change". De IPCC heeft als taak klimaatverandering, haar gevolgen en mitigerende maatregelen te onderzoeken. Regelmatig worden "Assessment Reports" uitgebracht waar de IPCC haar bevindingen in naar buiten brengt. In 2001 is het derde rapport uitgebracht. Omdat er nog veel onduidelijk is over het klimaat en klimaatverandering maakt de IPCC gebruik van klimaatscenario's.

In deze paragraaf zal eerst worden besproken met wat voor modellen geprobeerd wordt het klimaat te simuleren. Daarna zal een overzicht worden gegeven van de scenario's die het IPCC heeft gehanteerd als leidraad voor de voorspellingen van het klimaat.

3.6.1 Modellen¹²

In de loop der tijd zijn er verschillende soorten modellen ontwikkeld om inzicht te krijgen in het toekomstige klimaat. De modellen zijn, naarmate er meer inzicht kwam in de betrokken processen en rekestijd van computers minder schaars werd, steeds ingewikkelder geworden. Hieronder zullen enkele soorten modellen worden toegelicht.

Energy Balance Models

De eerste generatie klimaatmodellen bestaat uit „Energy Balance Models“. Deze modellen bestaan in 0-dimensionale (0-D) of 1-dimensionale vorm (1-D).

Bij de 0-dimensionale vorm wordt de aarde voorgesteld als een punt in de ruimte en wordt alleen het proces van de globale energiebalans gesimuleerd tussen inkomen (zonne)straling en uitgaande straling van de aarde.

Bij 1-dimensionale EBM's wordt ook de verdeling van energie over en tussen de verschillende breedtegraden gesimuleerd.

Radiative Convective Models

1-D RCM's simuleren de verticale verdeling van energie in de atmosfeer tot op de aardkorst door straling en convectie. Zowel de processen van weerkaatsting, verspreiding en opname van straling worden gesimuleerd als convectie. Door convectie ontstaan verticale luchtstromingen waardoor de stabiliteit gewaarborgd blijft, bijvoorbeeld door verwarming van lagere luchtlagen of afkoeling van hogere luchtlagen.

Statistical Dynamical Models

SDM's zijn meestal 2-D met 1 horizontale en 1 verticale dimensie, hoewel er ook SDM's zijn ontwikkeld met 2 horizontale dimensies. In SDM's worden de principes van RCM's en EBM's op een verfijnde manier gecombineerd. Voor de relaties met betrekking tot de energieoverdracht tussen de breedtegraden wordt gebruik gemaakt van empirische en fysische verbanden. Voor andere parameters, zoals windrichting en -snelheid, wordt gebruik gemaakt van statistiek, terwijl de energieoverdracht hierdoor wordt bepaald door bewegingsvergelijkingen.

General Circulation Models

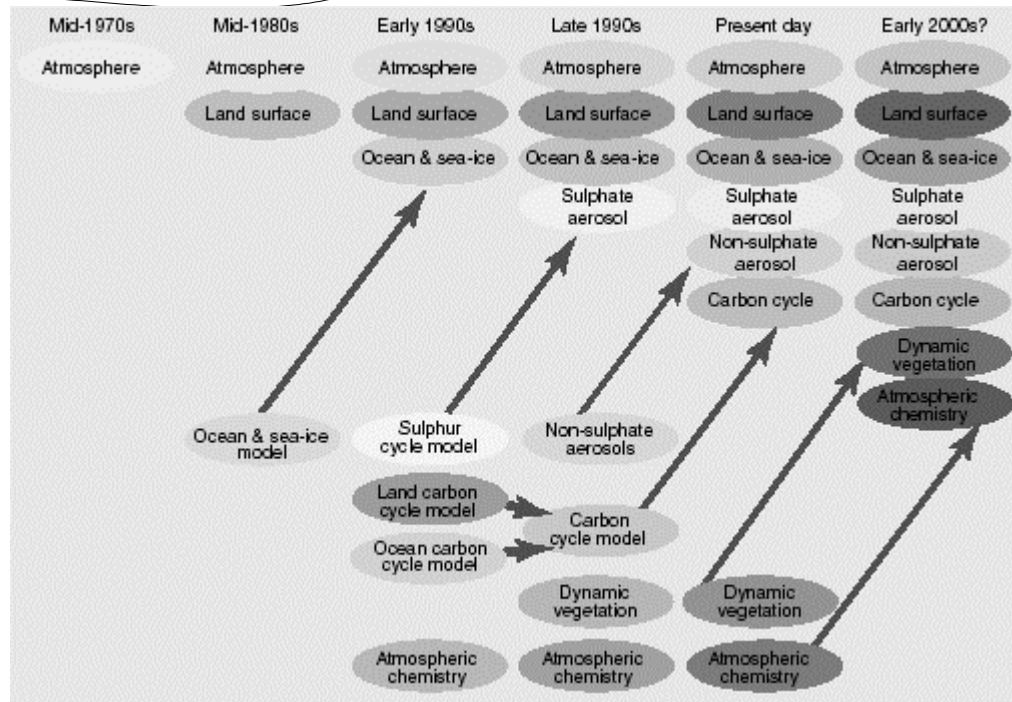
GCM's zijn de meest realistische modellen. Deze 3-D modellen zijn gebaseerd op enkele fundamentele fysische principes, behoud van energie, impuls en massa en de ideale gaswet. GCM's kosten veel reken tijd, daarom wordt vaak gebruik gemaakt van een groot ruimtelijk grid van 5 lengtegraden bij 5 breedtegraden en een verticale diepte van 6 tot 15 lagen.

Door groeiend inzicht en snellere computers is het toch mogelijk steeds meer processen die deel uitmaken van het klimaat mee te nemen in de GCM's. In figuur 3.11 is te zien welke ontwikkeling de klimaatmodellen de afgelopen 25 jaar hebben doorgemaakt.

¹⁰ UNEP: United Nations Environmental Programme, het milieuprogramma van de Verenigde Naties

¹¹ WMO: World Meteorological Organisation, de internationale meteorologische organisatie

¹² o.a. naar Buchdahl (1995), hoofdstuk 4 "Climate Modelling"



figuur 3.11 – ontwikkeling van klimaatmodellen (bron: IPCC, 2001)

De laatste ontwikkeling van de GCM's koppelt GCM's van oceanen en de atmosfeer aan elkaar, waardoor AOGCM's zijn ontstaan, Atmosphere-Ocean General Circulation Models.

Op dit moment is het met GCM's goed mogelijk het globale klimaat te simuleren op continentschaal. Op kleinere, regionale schaal zijn er echter nog veel onzekerheden.

3.6.2 IPCC scenario's

De IPCC heeft verschillende simulaties uitgevoerd om te bekijken wat de mogelijke gevolgen van klimaatverandering zullen zijn. Voordat het mogelijk is de klimaatverandering te simuleren zijn eerst een aantal aannames nodig met betrekking tot de toekomst. Deze aannames zijn vastgelegd in uitstootscenario's waarmee het toekomstige klimaat is gesimuleerd.

Per scenario is een verhaallijn ontwikkeld aan de hand waarvan de toekomstige uitstoot van broeikasgassen is bepaald. Met behulp van deze uitstoot is het verloop van de concentratie van broeikasgassen in de tijd bepaald en daarmee de klimaatverandering.

IS92

In het "Second Assessment Report" van 1995 wordt uitgegaan van een zestal scenario's die zijn opgesteld in 1992. Deze IS92 scenario's gaan ieder uit van verschillende combinaties van wereldbevolking, economische groei en energieverbruik. Voor elk van deze scenario's is het toekomstige klimaat gesimuleerd. In figuur 3.12 is een samenvatting te zien van de belangrijkste aannames van de verschillende IS92 scenario's.

Table 1. Summary of assumptions in the six IPCC 1992 alternative scenarios.

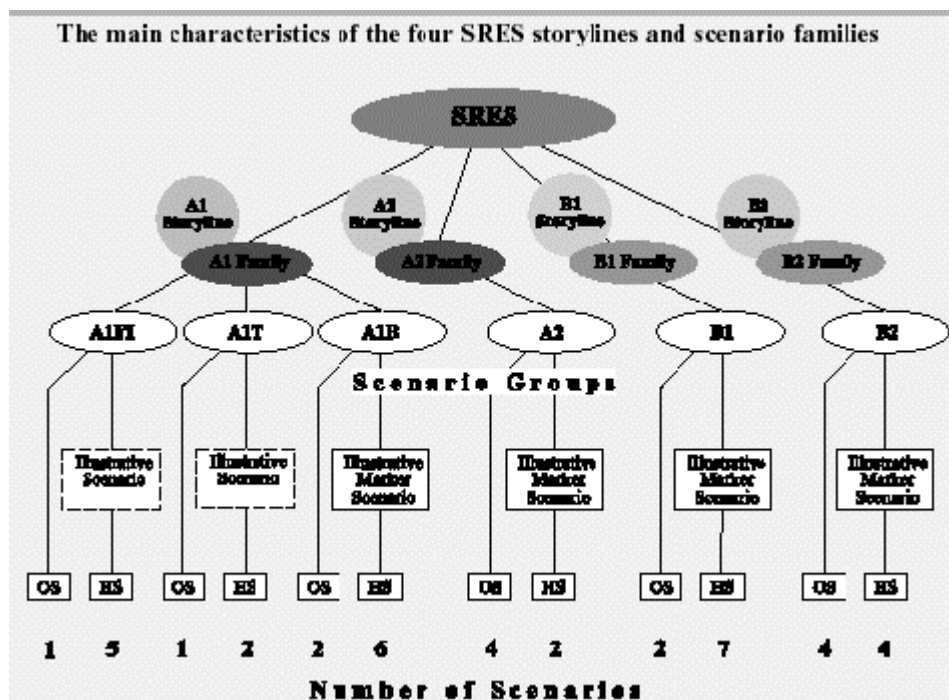
Scenario	Population	Economic Growth	Energy Supplies
IS92a,b	World Bank 1991 11.3 billion by 2100	1990-2025: 2.9% 1990-2100: 2.3%	12,000 EJ conventional oil 13,000 EJ natural gas Solar costs fall to \$0.075/kWh 191 EJ of biofuels available at \$70/barrel*
IS92c	UN Medium-Low Case 6.4 billion by 2100	1990-2025: 2.0% 1990-2100: 1.2%	8,000 EJ conventional oil 7,300 EJ natural gas Nuclear costs decline by 0.4% annually
IS92d	UN Medium-Low Case 6.4 billion by 2100	1990-2025: 2.7% 1990-2100: 2.0%	Oil and gas same as IS92c Solar costs fall to \$0.065/kWh 272 EJ of biofuels available at \$50/barrel
IS92e	World Bank 1991 11.3 billion by 2100	1990-2025: 3.5% 1990-2100: 3.0%	18,400 EJ conventional oil Gas same as IS92a,b Phase out nuclear by 2075
IS92f	UN Medium-High Case 17.6 billion by 2100	1990-2025: 2.9% 1990-2100: 2.3%	Oil and gas same as IS92e Solar costs fall to \$0.083/kWh Nuclear costs increase to \$0.09/kWh

*Approximate conversion factor: 1 barrel = 6 GJ.

figuur 3.12 – samenvatting van de aannames voor de zes IS92 scenario' s (bron:IPCC, 1995).

SRES¹³

In het "Third Assessment Report" van 2001 wordt uitgegaan van een groter aantal scenario' s. 40 scenario' s zijn ontwikkeld in het rapport "Emissions Scenarios, 2000" (Special Report on Emissions Scenarios, SRES). De scenario' s zijn gegroepeerd naar scenariofamilies: A1, A2, B1 en B2.



figuur 3.13 – overzicht van de SRES scenario' s (bron: IPCC, 2000). Vier kwalitatieve verhaallijnen leveren 4 sets van scenario-families op: A1, A2, B1 en B2. In totaal zijn er 40 scenario' s ontwikkeld door zes modelleerteams. Alle zijn even geldig zonder toegekende waarschijnlijkheid. De verzameling scenario' s bestaat uit zes scenario groepen, uit de vier families: een groep in A2, B1 en B2 en drie groepen in de A1 familie, die verschillende ontwikkelingen in het energieverbruik karakteriseren: A1FI (fossiel intensief), A1B (gebalanceerd), A1T (voornamelijk non-fossiele brandstoffen). Binnen elke familie en scenario-groep zijn er enkele die overeenkomstige

aannames delen omtrent de wereldbevolking, bruto globaal produkt en energieverbruik. Deze zijn gemerkt "HS" voor geharmoniseerde scenario' s. "OS" verwijst naar scenario' s waarin onzekerheden worden onderzocht in de aandrijvende krachten, buiten die reeds onderzocht in de geharmoniseerde scenario' s. Het aantal scenario' s binnen elke categorie wordt getoond. Voor elk van de zes groepen is er een "illustratief" scenario (dat altijd ook geharmoniseerd is). Vier illustratieve kenmerkende scenario' s (marker scenario' s), voor elke familie een, zijn in 1998 in een open discussie waaraan veel deskundige individuen deelnamen samengesteld. Bij de groepen A1FI en A1T zijn later ook illustratieve scenario' s ontwikkeld. Alle scenario' s zijn even grondig onderzocht.

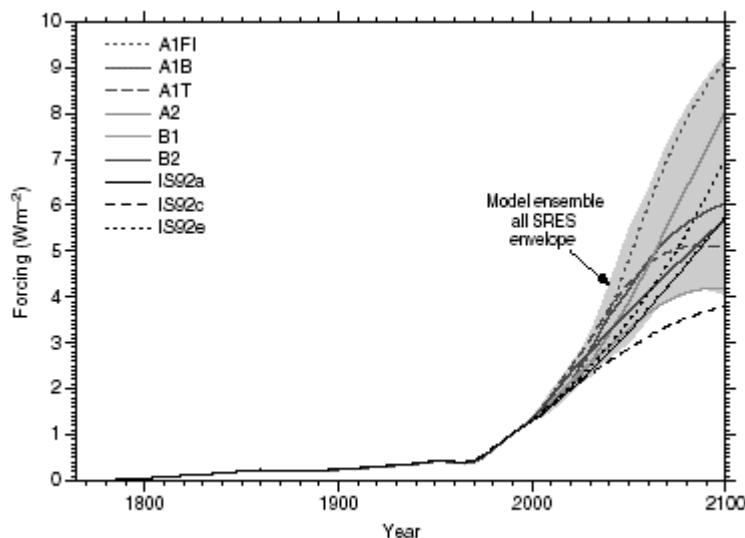
¹³ gedeeltelijk overgenomen uit IPCC (2000) blz. 4-5 "What are the main characteristics of the new scenarios?"

Over de scenario' s: Toen 2100 zal de wereld veranderd zijn op een manier die moeilijk voor te stellen is - net zoals het aan het eind van de 19e eeuw moeilijk was de veranderingen de 100 jaar daaropvolgend voor te stellen. Elke verhaallijn veronderstelt een andere richting van de toekomstige ontwikkelingen, zodat de 4 verhaallijnen in vergrotende mate onomkeerbaar van elkaar verschillen. Samen beschrijven zij uiteenlopende mogelijke toekomsten die een belangrijk deel van de onzekerheden in de aandrijvende krachten vertegenwoordigen. Ze omvatten een breed scala aan karakteristieken, zoals demografische verandering, economische ontwikkeling en technische veranderingen. De aannemelijkheid van deze scenario' s moet daarom niet alleen worden overwogen op basis van een extrapolatie van de huidige economische, technische en sociale trends.

- De A1 verhaallijn en scenario-familie beschrijft een toekomst met een zeer snelle economische groei, een wereldbevolking die halverwege de eeuw haar toppunt bereikt en daarna weer afneemt, en een snelle introductie van nieuwe en efficiënte technieken. De onderliggende hoofdthema' s zijn samengaan van regio' s, opbouwen van capaciteit en toenemende culturele en sociale interacties, met een wezenlijke vermindering van regionale verschillen in individuele inkomens. De A1 scenario-familie groeit uit tot drie groepen in verschillende richtingen van technische veranderingen in het energiesysteem en worden onderscheiden door hun technische accent: fossiel intensief (A1FI), niet-fossiele brandstoffen (A1T), of een evenwicht tussen alle bronnen (A1B)¹⁴.
- De A2 verhaallijn en scenario-familie beschrijft een heterogene wereld. Het onderliggende thema is zelfvertrouwen en behoud van lokale identiteiten. Vruchtbaarheidspatronen tussen regionen komen zeer langzaam samen, wat resulteert in een continu groeiende wereldbevolking. Economische ontwikkeling is voornamelijk regionaal georiënteerd en de economische groei en technische ontwikkeling zijn meer versplinterd dan bij andere verhaallijnen.
- De B1 verhaallijn en scenario-familie beschrijft een groeiperende wereld met dezelfde wereldbevolking die halverwege de eeuw haar toppunt bereikt en daarna weer afneemt, als bij de A1 verhaallijn, maar met snelle economische veranderingen richting een service en informatie-economie, met reductie van materiaalgebruik en de introductie van schone en duurzame technologieën. De nadruk ligt op globale oplossingen voor economische, sociale en milieutechnische ontvankelijkheid, met een verbeterde gelijkheid, maar zonder extra klimaatinitiatieven.
- De B2 verhaallijn en scenario-familie beschrijft een wereld waarin de nadruk ligt op lokale oplossingen voor economische, sociale en milieutechnische ontvankelijkheid. Het is een wereld met een continu groeiende wereldbevolking met een snelheid lager dan A2, tussenliggende niveaus van economische ontwikkeling, en minder snelle en diversere technische verandering dan in de B1 en A1 verhaallijnen. Hoewel het scenario ook is gericht op milieubescherming en sociale gelijkheid, ligt de nadruk op lokale en regionale niveaus.

IPCC resultaten

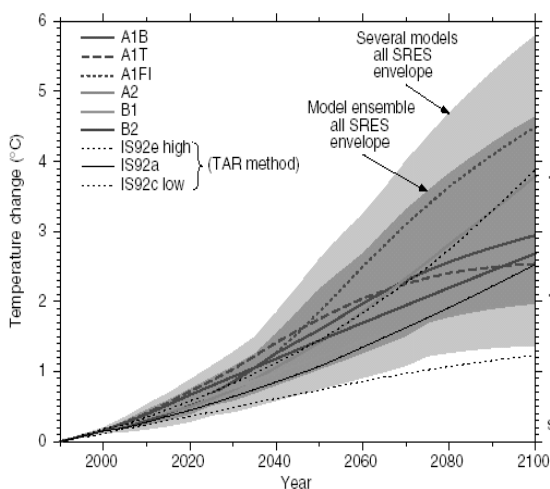
Met behulp van de uitstootscenario' s zijn allerlei simulaties gemaakt, waaruit de toekomstige concentraties in de atmosfeer blijken. Hiermee zijn voor alle scenario' s de aandrijvende krachten van het klimaat gesimuleerd (zie figuur 3.14)



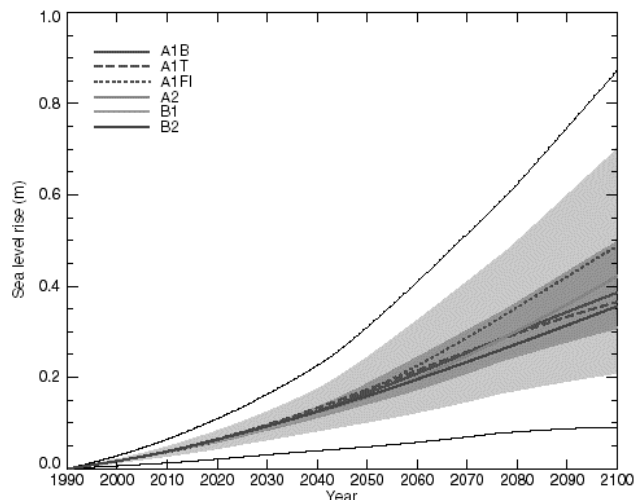
figuur 3.14 - De aandrijvende krachten voor het toekomstige klimaat.

¹⁴ Met evenwicht wordt hier bedoeld: niet te veel van één bron afhankelijk.

Met deze aandrijvende krachten is het toekomstige klimaat gesimuleerd. Uit deze simulatie zijn parameters als de temperatuur uit te lezen. In figuur 3.15 is het temperatuurverloop bij de verschillende scenario's uitgetekend en in figuur 3.16 de zeespiegelstijging.



figuur 3.15 - Temperatuurverloop bij de verschillende uitstoot scenario-families



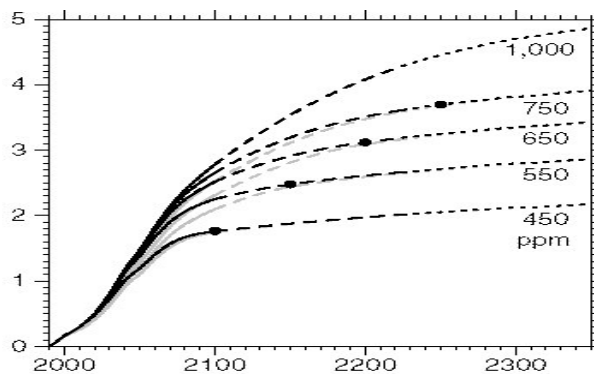
figuur 3.16 - Verloop van de zeespiegelstijging bij verschillende scenario-families

Langere termijn

Om het klimaat te stabiliseren zal het nodig zijn de concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer te stabiliseren. Dit is alleen mogelijk door de uitstoot van broeikasgassen te verminderen.

Carbon-cyclus modellen hebben aangetoond dat dit voor het belangrijkste door menselijk handelen uitgestoten broeikasgas betekent dat de uitstoot verminderd moet worden tot onder het niveau van 1990¹⁵. Voor stabilisatie op 450, 650, of 1000 ppm¹⁶ betekent dit dat dit respectievelijk binnen een enkele tientallen jaren, ongeveer een eeuw, of binnen 2 eeuwen moet gebeuren en dat daarna de uitstoot gestaag af moet blijven nemen om uiteindelijk een zeer klein deel van de huidige uitstoot te worden.

Voor deze situaties heeft de IPCC een aantal CO₂-concentratie stabilisatie scenario's opgesteld: WRE450, WRE550, WRE650, WRE750 en WRE1000. (zie figuur 3.17)



figuur 3.17 - CO₂ concentratie stabilisatie scenario's

Nadat de concentraties zijn gestabiliseerd, zullen de globale gemiddelde oppervlaktetemperaturen met slechts een paar tienden graden per eeuw stijgen in tegenstelling tot meerdere graden per eeuw, zoals voor de 21e eeuw is voorspeld zonder stabilisatie.

De verwachting is dat de stijging van de globale gemiddelde oppervlaktetemperatuur en de zeespiegel als gevolg van thermische uitzetting van de oceanen nog honderden jaren voort zal duren na de stabilisatie van broeikasgasconcentraties (zelfs op het huidige niveau) vanwege de lange tijdschalen waarop de oceanen zich aanpassen aan klimaatveranderingen.

¹⁵ In 1990 was de concentratie CO₂-deeltjes in de atmosfeer ongeveer 350 ppm.

¹⁶ ppm (parts per million) is de verhouding tussen het aantal broeikasgasmoleculen en het totaal aantal moleculen droge lucht. 300 ppm betekent bijvoorbeeld 300 moleculen broeikasgas op 1 miljoen moleculen droge lucht.

3.7 Conclusies

Het klimaat is een ingewikkeld systeem met veel elementen en processen. De processen spelen op allerlei ruimte- en tijdschalen een rol en veel van deze processen worden nog niet begrepen. Een van de oorzaken hiervan is dat er nog niet zo heel lang historische gegevens worden geregistreerd, waardoor de bestudering van de processen op langere tijdschalen erg moeilijk is.

Wel zijn er met nieuwe technieken steeds meer mogelijkheden om de historie van het klimaat te achterhalen uit bijvoorbeeld ijskernen, bodemanalyses en dergelijke, zoals in paragraaf 3.4.1 is gedefinieerd. Van dergelijke bronnen zijn er voldoende aanwezig; deze zijn echter verspreid en het omzetten naar bruikbare data is zeer arbeidsintensief en moeilijk te coördineren.

Daarom is er nog weinig bekend over de processen en het verleden en zijn klimaatmodellen moeilijk te calibreren.

Simulatie van de verandering van het klimaat is dus, vooral op kleinere ruimteschalen en langere tijdschalen, nog zeer onnauwkeurig.

Op dit moment lijkt het erop dat de concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer veel invloed heeft op klimaatveranderingen vanwege de invloed daarvan op de energiebalans van de aarde.

Met aannames over de toekomstige invloed van de mens op deze concentraties zijn wel voorspellingen te doen over mogelijke klimaatveranderingen. Met een set van aannames wordt dan een scenario gevormd waarin is vastgelegd hoe bijvoorbeeld parameters als technische ontwikkelingen en wereldbevolking zich zullen ontwikkelen. Maar aannames over een langere termijn dan 100 jaar worden zelden gemaakt.

Om toch verder te kunnen kijken wordt er uitgegaan van een stabilisatie van de concentratie van broeikasgassen. De termijn waarin deze stabilisatie plaatsvindt bepaalt het verloop van de concentratie in de tijd. Met deze scenario's voor de langere termijn (WRĒscenario's) worden simulaties gedaan, waarmee het temperatuurverloop in de toekomst wordt berekend.

In het volgende deel zullen met behulp van deze verlopen randvoorwaarden voor de lange termijn simulaties van de Rijn worden geconstrueerd.

4 Scenarios

Voor de lange termijn simulaties zijn enkele scenario's gemaakt. Deze zijn alle gebaseerd op de stabilisatie profielen die de IPCC in haar "Third Assessment Report" (IPCC, 2001) heeft beschreven. Dit zijn de enige scenario's die verder kijken dorkomende eeuw. In dit deel zullen deze scenario's en hoe deze tot stand zijn gekomen worden besproken.

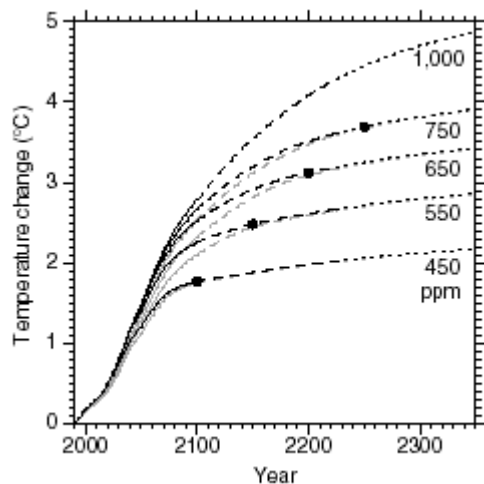
4.1 Temperatuur

De globale temperatuur zal nog honderden jaren licht blijven stijgen nadat de CO₂-concentraties zijn gestabiliseerd in verband met de lange tijdschalen van de warmteuitwisselingen door de oceanen.

4.1.1 Globaal volgens stabilisatieprofielen

Naar aanleiding van de stabilisatieprofielen, die al zijn beschreven in paragraaf 3.6.2, heeft de IPCC met behulp van eenvoudige klimaat-modellen gekoppeld aan zeven AOGCM's¹⁷, profielen opgesteld voor het verloop van de temperatuur. In figuur 4.1 zijn deze curves weergegeven.

Voor de scenario's WRE450, WRE650 en WRE1000 zijn de profielen geëxtrapoleerd tot het jaar 2500. Deze temperatuurprofielen zijn in bijlage B.1 te zien.



figuur 4.1 - Temperatuur profielen bij de verschillende stabilisatiescenario's

4.1.2 Lokale benadering van de KNMI

In het rapport "Meteorologie ten behoeve van de Vierde Nota Waterhuishouding" (Können, 1997) van het KNMI staat het volgende:

"In tegenstelling tot voorspellingen op de schaal van zeer grote continenten, zijn door klimaatmodellen gegenereerde projecties van het klimaat op een regionale schaal zeer onzeker. Dit geldt in het bijzonder voor de regio Noordwest Europa. Daarom vertonen de door verschillende modellen geproduceerde simulaties van het huidige en toekomstige klimaat van deze regio onderling zeer grote verschillen.

Bij gebrek aan informatie over het toekomstige karakter van de luchtcirculatiepatronen, wordt de sleutelaanname gehanteerd dat de variabiliteit van de luchtstromingen en de frequentieverdeling van circulatiepatronen rond Nederland bij versterking van het broeikas effect niet zullen wijzigen.

Deze aanname vormt de basis voor het formuleren van uitspraken omtrent de temperatuur. Opgemerkt zij dat uitkomsten van klimaatmodellen de sleutelaanname niet onmiddellijk tegenspreken. Anderzijds moet de nadruk op worden gelegd dat het Nederlandse klimaat zo gevoelig afhangt van heersende circulatiepatronen, dat marginale wijzigingen van circulatiepatronen, die ruim binnen de foutenmarge vallen van klimaatmodellen, van grote invloed kunnen zijn op temperatuur en andere elementen van het Nederlandse klimaat.

De schatting voor de gemiddelde temperatuurverandering in Nederland is tot stand gekomen door het combineren van resultaten van klimaatmodellen op grote ruimtelijke schalen met de sleutelaanname. Deze schatting vormt vervolgens de basis voor uitspraken omtrent de neerslag en dus de rivierafvoeren.

Onder de sleutelaanname van ongewijzigde luchtcirculatiepatronen geldt dat de temperatuurstijging op onze breedtegraad niet veel afwijkt van de wereldgemiddelde temperatuurstijging. De stijging in Nederland wordt geschat op 0.5-2° Celsius in 2050 en 1-4° in 2100, ten opzichte van de situatie in 1990. De centrale schattingen voor deze jaren zijn respectievelijk 1° en 2°."

Tevens wordt aangenomen dat dit ook geldt over een langere termijn. De temperatuurstijging op onze breedtegraad zal niet veel afwijken van de wereldgemiddelde temperatuurstijging. In de volgende paragraaf zullen de bezwaren tegen deze aanname worden besproken.

¹⁷ Atmosphere-Ocean General Circulation Models, zie paragraaf 3.6.1

4.1.3 Nadelen van deze benadering¹⁸

Landoppervlakten kunnen minder warmte absorberen dan oceanen. Daarom zullen als gevolg van het versterkte broeikaseffect de oppervlaktetemperaturen boven land naar verwachting sneller stijgen dan boven oceanen. Hierdoor zullen de luchtcirculatiepatronen, de windsnelheden en het gedrag van depressies worden beïnvloed.

In sommige gebieden (de Verenigde Staten, de oostkust van Australië en de Noord Atlantische Oceaan) is er inderdaad een verandering waargenomen, in de vorm van een toename in het aantal lagedrukgebieden. In andere gebieden zoals de Duitse Bocht is geen stijgende trend in het aantal lagedrukgebieden waarneembaar (IPCC, 1996). In Nederland en Noordwest Europa is er in de afgelopen 10 jaar sprake van een uitzonderlijk hoge gemiddelde temperatuur en van een aantal bijzonder zware neerslagepisodes. De waargenomen verschijnselen worden in verband gebracht met het optreden van een bepaald luchtcirculatiepatroon in de winter: cyclonale westcirculatie boven West- en Midden Europa. Dit circulatiepatroon gaat gewoonlijk gepaard met gemiddeld hogere temperaturen. De frequentie waarmee dit circulatiepatroon voorkomt en de daarmee samenhangende wintertemperaturen waren in de afgelopen 10 jaar aanzienlijk hoger dan in de voorgaande perioden met een overwegende westcirculatie. Ook de in Nederland opgetreden regenval in de Bilt in 1998 is hoger dan ooit gemeten. Indien we de historische meetreeks als maatstaf gebruiken is de kans op een jaarneerslag van de omvang van 1998 ongeveer 1:200 à 1:1000 per jaar (afhankelijk van de gekozen statistische benadering).

Het is niet goed mogelijk een één op één relatie te leggen tussen een bepaalde weersgebeurtenis of een bijzonder jaar en de wereldwijd waargenomen verhoging van de gemiddelde temperatuur. Een neerslag met een kans van 1 op 1000 per jaar is ook mogelijk binnen het normale klimaat. Het is echter wel opmerkelijk.

Een ander verschijnsel dat samenhangt met een verandering van circulatiepatronen is de recente droogte in Noord Afrika. De afgelopen 25 jaar is de Sahel veel droger geworden. In deze jaren is de grootste daling in regenval opgetreden en de daling bestrijkt de langste periode ooit, sinds er gemeten wordt met instrumenten. Dit heeft vermoedelijk te maken met verandering van oppervlaktetemperaturen van het zeewater van de Atlantische Oceaan. Lagere temperaturen ten noorden van de evenaar en hogere temperaturen ten zuiden van de evenaar zijn gecorreleerd aan de lagere neerslag in de Sahel. De verandering van de temperaturen van het oceaanwater leidt waarschijnlijk tot een verandering in de atmosferische circulatie die vervolgens een verandering geeft in de neerslag in de Sahel.

De benadering van het KNMI dat de luchtcirculatiepatronen niet zullen veranderen gaat dus niet altijd op. Bij gebrek aan andere scenario's zal er in deze studie verder vanuit worden gegaan dat de aanname correct is.

4.2 Zeespiegelstijging

In tegenstelling tot rivierafvoeren, wordt de zeespiegelstijging direct berekend met behulp van de globale waarden. De zeespiegelstijging heeft verschillende oorzaken.

De zeespiegel als randvoorwaarde wordt in SOBEK ingevoerd aan de hand van een Q-h kromme. Bij een bepaald debiet wordt dan een bepaald waterniveau bepaald.

4.2.1 Thermische Expansie

Wanneer broeikasgasconcentraties zijn gestabiliseerd (zelfs op het huidige niveau), zou de zeespiegel nog enkele honderden jaren stijgen. Na 500 jaar, heeft de zeespiegelstijging als gevolg van thermische uitzetting nog slechts de helft van haar uiteindelijke niveau bereikt. Volgens enkele modellen ligt dit uiteindelijke niveau tussen de 0,5 en 2 meter voor een stabilisatie van de CO₂-concentratie op twee maal het preïndustriële niveau¹⁹ en tussen de 1 en 4 meter voor een stabilisatie op vier maal het preïndustriële niveau. Deze lange tijdschaal is karakteristiek voor de processen waarmee de oceaan de warmte transporteert en verdeelt.

4.2.2 Gletsjer massa en ijskappen

Volgens de berekeningen van het IPCC is het afsmelten van een substantieel deel van de gletsjers op aarde waarschijnlijk (60-99% kans). Gebieden die nu marginaal met ijs bedekt zijn, zullen ijsvrij worden.

Ook ijskappen zullen nog duizenden jaren blijven reageren op klimaatveranderingen, zelfs nadat het klimaat is gestabiliseerd. De ijskappen van Antarctica en Groenland bevatten samen genoeg water om de zeespiegel met

¹⁸ uit Vellinga (1999), blz. 5

¹⁹ in het jaar 1750 was het CO₂-niveau 280 ppm.

bijna 70 meter te laten stijgen als ze af zouden smelten. Een relatief kleine verandering in hun volume zou dus al een groot effect kunnen hebben.

Groenland

Modellen voorspellen dat, wanneer de gemiddelde jaarlijkse temperatuurstijging enkele millennia boven de 3°C uitkomt, nagenoeg de gehele ijskap van Groenland zal smelten, met een zeespiegelstijging van ongeveer 7 meter als gevolg. De voorspelde temperaturen boven Groenland zijn in 't algemeen een factor 1,2 tot 3,1 keer groter dan de globaal voorspelde temperaturen. Een temperatuurstijging van 5,5°C boven Groenland, in overeenstemming met het middenbereik van de stabilisatiescenario's zal leiden tot een stijging van de zeespiegel met 3 meter in 1000 jaar. Bij een stijging van 8°C is de zeespiegelstijging ongeveer 6 meter, de ijskap is dan bijna verdwenen. Bij kleinere temperatuurstijgingen is het verval van de ijskap duidelijk langzamer.

West Antarctic Ice Sheet

De West Antarctic Ice Sheet, WAIS, zal volgens de huidige dynamische ijsmodellen maximaal 3 mm/jaar bijdragen aan zeespiegelstijging in de komende 1000 jaar.

Maar de modelresultaten hangen sterk af van modelaannames met betrekking tot klimaatverandering, ijsdynamica en andere factoren. Naast de mogelijkheid van instabiliteit van de ijskap, beïnvloedt smelten van het oppervlakteijs ook de levensvatbaarheid van de ijskap. Voor temperatuurstijgingen boven de 10°C voorspellen eenvoudige afvoermodellen dat er een onomkeerbare afbraak van de ijskap plaatsvindt. Voor de totale afbraak van de Antarctische ijskap zijn temperatuurstijgingen van boven de 20°C nodig, een situatie die ver buiten het bereik ligt van die van de huidige scenario's en de afgelopen 15 miljoen jaar niet is voorgekomen.

4.2.3 Andere bijdragen

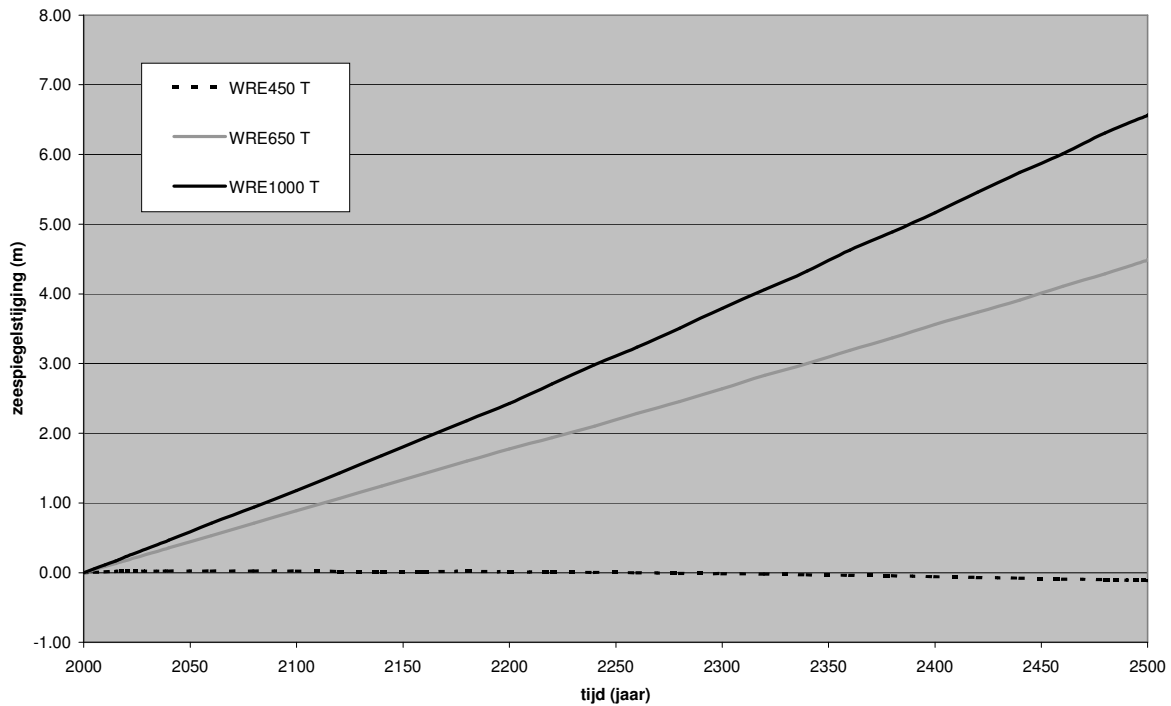
Andere bijdragen zijn voornamelijk door mensen veroorzaakt. In Douglas (2001) staat een overzicht van de bijdragen en hun invloed. Alle processen die invloed hebben op de duur van de waterkringloop kunnen ook invloed hebben op de zeespiegelstijging. In tabel 4.1 is een overzicht gemaakt van de processen die in dit boek worden beschreven en hoe groot hun invloed op de zeespiegelstijging kan zijn. Er zijn echter nog wel veel onduidelikheden omtrent de grootte van deze invloeden.

Processen	Equivalentente zeespiegelstijging (mm/jaar)			Nauwkeurigheid
	Lage schatting	Midden schatting	Hoge schatting	
Grondwaterwinning	0.10	0.20	0.30	0.02
Versnelde afvoer door verstedelijking	0.30	0.34	0.38	
Water vrijgekomen door oxidatie	-0.06	0.01	0.07	0.01
Versnelde afvoer door ontbossing	0.08	0.09	0.11	0.09
Afname van oppervlakte moerasland	0.0010	0.0015	0.0020	0.0015
Reservoirs en dammen	-1.15	-0.99	-0.84	
Opslag	-0.33	-0.3	-0.27	
Infiltratie	-0.81	-0.68	-0.56	
Verdamping	-0.01	-0.01	-0.01	
Irrigatie	-0.64	-0.56	-0.50	
Infiltratie	-0.49	-0.44	-0.40	
Evapotranspiratie	-0.15	-0.12	-0.10	
Totaal	-1.37	-0.91	-0.46	

tabel 4.1 – tabel met antropogene oorzaken van zeespiegelstijging; (bron: Douglas, 2001)

4.2.4 Totaal

Door alle factoren uit eerdere paragrafen bij elkaar op te tellen is er bij elk van de drie stabilisatieprofielen die worden bekeken een profiel gemaakt voor de zeespiegelstijging. Deze profielen zijn ook te vinden in bijlage B.2.



figuur 4.2 - profielen van het verloop van de zeespiegel over de komende 2500 jaar

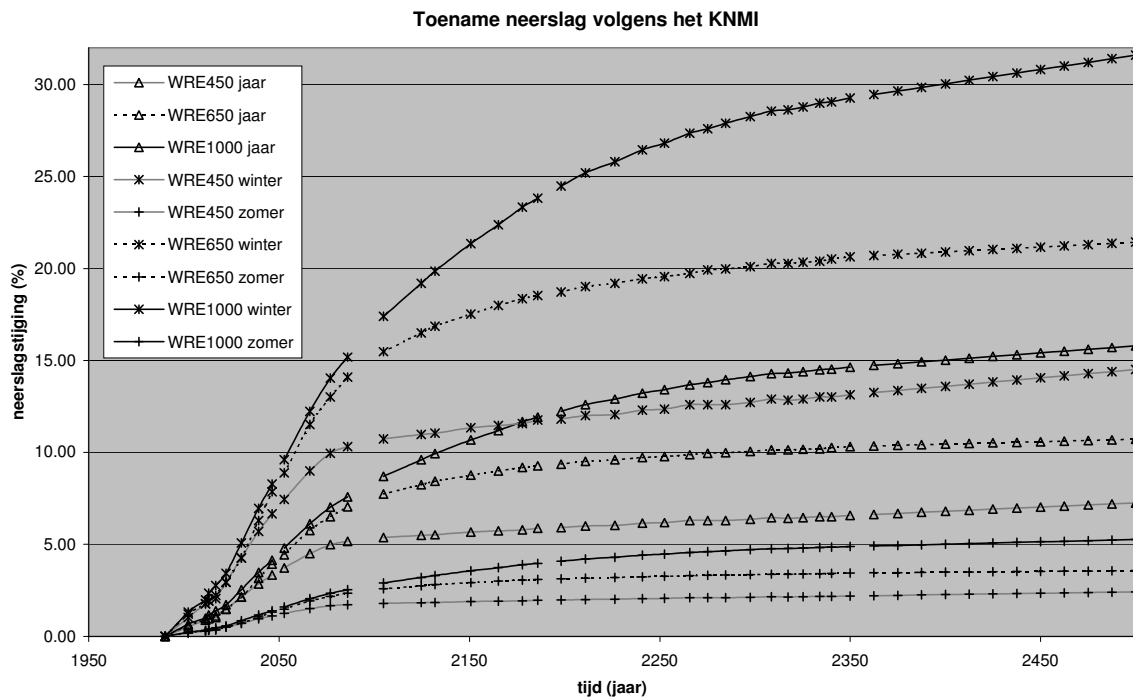
4.3 Neerslag

Kennis over het verloop van de neerslag is nodig om de veranderingen in de rivierafvoeren te kunnen bekijken in de toekomst. Over het verloop van de neerslag als gevolg van temperatuurveranderingen zijn echter meningsverschillen. In tegenstelling tot de algemene opvatting dat de neerslag toeneemt wanneer de temperatuur stijgt heeft bijvoorbeeld Alterra in 1999 op basis van gegevens van het Hadley Centre GCM²⁰ een studie gedaan waarbij de neerslag, ondanks een stijgende temperatuur, gelijk bleef. Deze studie is gedaan in het kader van het Nationaal Onderzoeksprogramma Mondiale Luchtverontreiniging en Klimaatverandering (NOP I).

In de rest van deze studie is echter de algemene opvatting aangehouden, dat de hoeveelheid neerslag toeneemt wanneer de temperatuur stijgt. In het rapport "Meteorologie ten behoeve van de 'Vierde Nota Waterhuishouding' " (Können, 1999) heeft het KNMI de toename in de jaarlijkse neerslaghoeveelheid geschat op 3% per graad temperatuurstijging. Ook voor de winter- en de zomerneerslag zijn dergelijke schattingen gemaakt.

Met deze waarden zijn aan de hand van de geëxtrapolerde temperatuurprofielen van de IPCC, neerslagprofielen samen te stellen voor de drie stabilisatiescenario's WRE450, WRE650 en WRE1000.

²⁰ General Circulation Model, zie paragraaf 3.6.1



figuur 4.3 - Het verloop van de neerslag in de komende 2500 jaar

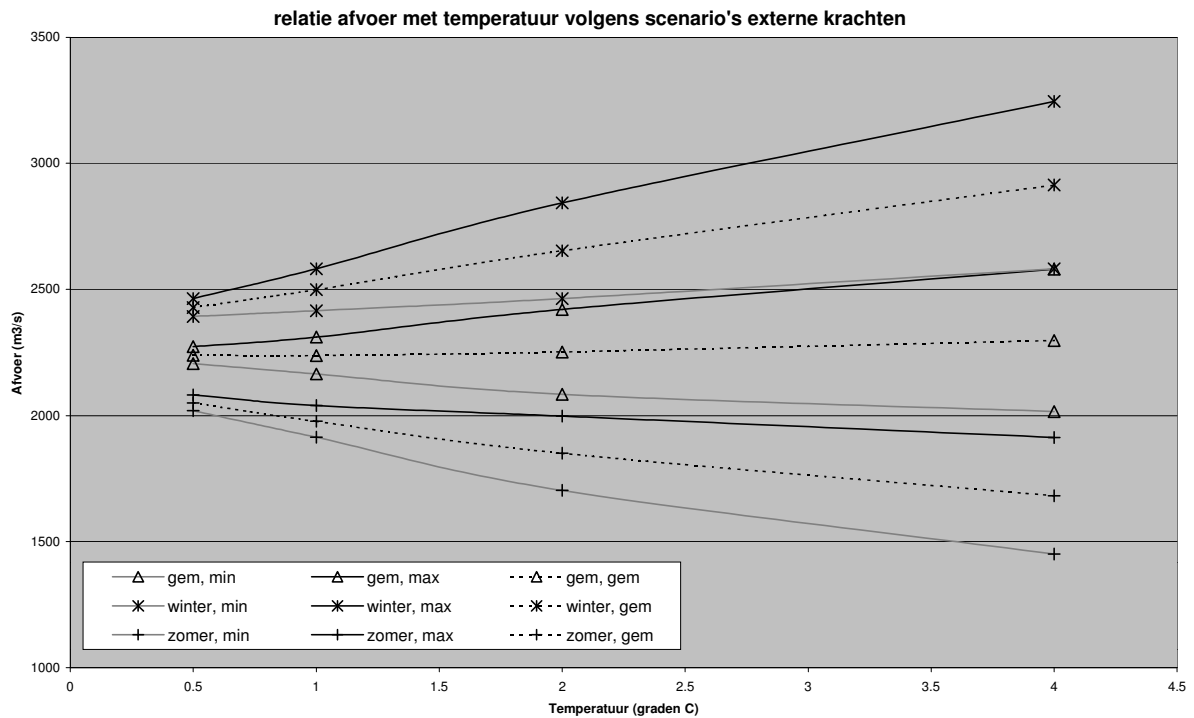
In figuur 4.3 staan de relatieve toename van de jaarlijkse hoeveelheid neerslag, de zomer- en de winterneerslag voor de drie scenario's uitgetekend. In de winter stijgt de neerslag het meest, in de zomer heminst, de toename van de jaarneerslag zit er tussenin.

In de volgende paragraaf zal met resultaten uit het rapport "Scenario's externe krachten" een relatie worden gelegd tussen het temperatuurverloop en de afvoer. De hier getoonde relatie is verder alleen gebruikt om deze relatie mee te controleren.

4.4 Rivierafvoeren

In het rapport "Scenario's Externe Krachten voor WB21" (Kors, 2000) zijn voor de scenario's uit "Meteorologie ten behoeve van de 'Vierde nota waterhuishouding'" (Können, 1997) de afvoeren van ~~de~~ andere de Maas en de Rijn bekeken. In dit rapport (Kors, 2000) zijn de veranderingen in de neerslag uit het rapport van het KNMI (Können, 1997) omgezet naar veranderingen in de rivierafvoeren. De betrouwbaarheid rond deze afvoeren is kleiner dan die van de klimaatveranderingen. De waarden zijn daarom, nog meer dan voor het klimaat, te beschouwen als input voor what-if scenario's.

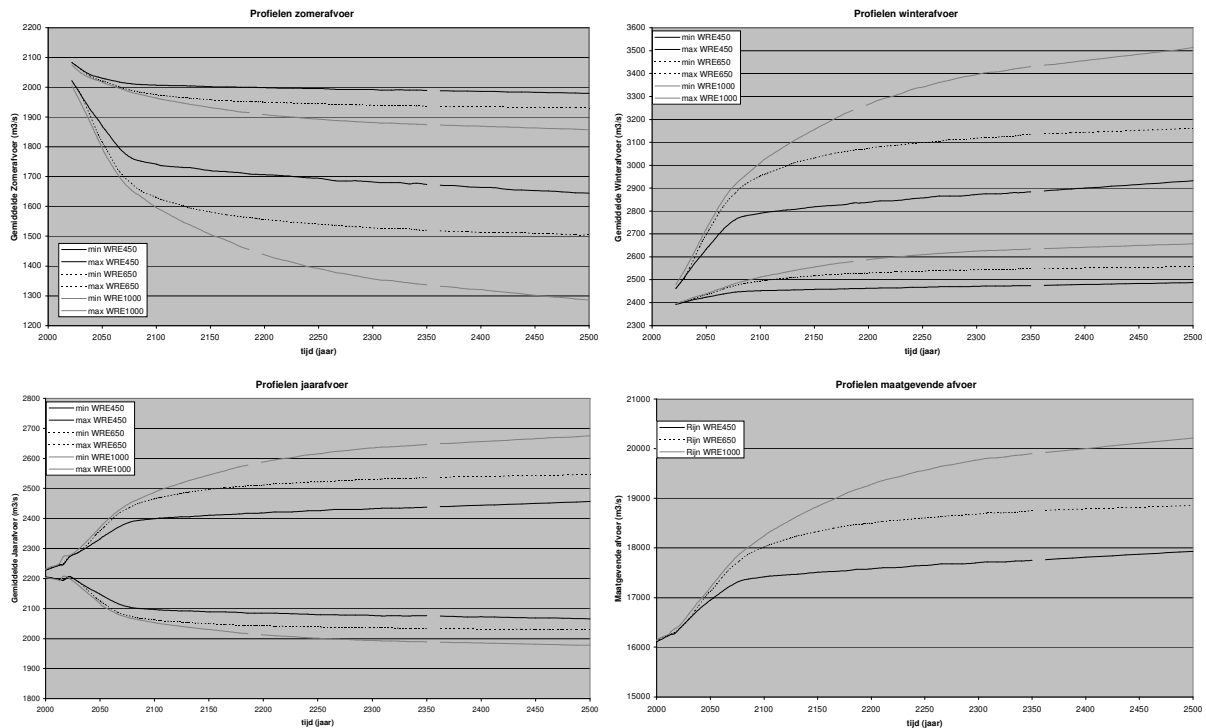
Met behulp van de waarden uit "Scenario's Externe Krachten voor WB21" is voor elk scenario een relatie tussen de temperatuurstijging en de rivierafvoer gemaakt.



figuur 4.4 - relaties tussen temperatuurstijging en de afvoer van de Rijn

De bovenste lijn in figuur 4.4 is de relatie tussen de temperatuur stijging en de maximale winterafvoer, de derde lijn van boven de relatie tussen de temperatuurstijging en de minimale winterafvoer, de lijn ertussenin de relatie tussen de temperatuurstijging en de gemiddelde winterafvoer. Of de afvoer verloopt volgens het maximale, minimale of gemiddelde profiel is afhankelijk van de maand waarin gekeken wordt.

Met behulp van deze relaties is het mogelijk profielen voor de zomer-, winter-, gemiddelde en maatgevende afvoeren op te stellen per stabilisatiescenario.



figuur 4.5 - verandering van de verschillende afvoeren van de Rijn op langere termijn.

Deze profielen zijn ook uitvergroot in de bijlage B3 te vinden.

Uit de profielen blijkt dat bij deze scenario's de zomerafvoer zal afnemen en de winterafvoer zal toenemen. De gemiddelde jaarafvoer zal schommelen, maar vaker toenemen dan afnemen. De maatgevende afvoer tenslotte zal toenemen. De mate waarin de afvoeren veranderen is sterker naarmate van een "sterker" stabilisatiescenario wordt uitgegaan.

Als controle is de relatie tussen de neerslagtoename en de tijd gecombineerd met de neerslagtoename uitgezet tegen de afvoer. De bij deze methode gevonden afvoeren waren exact gelijk aan die die al eerder in dit hoofdstuk zijn besproken. Hieruit blijkt dat voor de twee berekeningen dezelfde relaties zijn gebruikt.

4.5 Gebruikte scenario's

Voor de simulaties zijn de eerder behandelde scenario's voor de rivierafvoeren en de zeespiegelstijging samengevoegd tot de hieronder volgende scenario's.

scenario	zeespiegel	afvoer	zeespiegelstijging na 200 jaar	gemiddelde afvoerverandering na 200 jaar	
				zomerafvoer	winterafvoer
S0W0	huidige	huidige	0	0 %	0 %
S1W1	WRE450	WRE450 min	0	- 7 %	+ 5 %
S1W2	WRE450	WRE650 min	0	- 9 %	+ 8 %
S2W3	WRE650	WRE1000 min	+1.8 m	- 11 %	+ 11 %
S2W4	WRE650	WRE450 max	+1.8 m	- 21 %	+ 21 %
S3W5	WRE1000	WRE650 max	+2.4 m	- 28 %	+ 31 %
S3W6	WRE1000	WRE1000 max	+2.4 m	- 33 %	+ 39 %

tabel 4.2 - de scenario's waarmee simulaties zijn uitgevoerd en enkele kenmerken.

Het S0W0-scenario is het nul-scenario. In dit scenario wordt er, zowel voor de zeespiegel als voor de rivierafvoer, van uitgegaan dat er geen veranderingen optreden. Het scenario wordt gebruikt om de resultaten bij de andere scenario's te kunnen vergelijken met de situatie wanneer er geen vergelijkingen optreden.

Bij het S2W4 scenario wordt uitgegaan van een zeespiegelstijging die volgt uit het WRE650 stabilisatieprofiel van de IPCC. Voor de rivierafvoer wordt uitgegaan van de bovengrens van de afvoeren bij het WRE450 stabilisatieprofiel.

De profielen voor de zeespiegel en de rivierafvoeren zijn bij de betreffende paragrafen te vinden.

Hoe deze profielen zijn omgezet naar invoerwaarden voor het model is te vinden in paragraaf 6.2.4.

Bij een scenario met minder veranderingen wordt gesproken van een lichter scenario (bijvoorbeeld S1W1), bij het scenario met de meeste veranderingen, S3W6, van het zwaarste scenario.

5 Maatregelen

In het Ruimte voor Rijntakken project worden verschillende maatregelen genoemd. Deze zijn onderverdeeld in maatregelen in het zomerbed, maatregelen in de uiterwaarden, en maatregelen binnendijs. Ook worden de mogelijkheden van het verminderen van de toevoer van water en het bergen van water langs de Rijntakken genoemd. In dit hoofdstuk is veelvuldig gebruik gemaakt van tekst en illustraties uit Silva (2000).

5.1 Verminderen van de toevoer

De toevoer van water aan de rivier wordt bepaald door het landgebruik in het stroomgebied. Bij ander landgebruik kan er een groter of kleiner deel van het water verdampen voordat het de rivier bereikt.

Bij maatgevende situaties is de invloed hiervan echter klein, door een lange periode van regenval is de grond verzadigd en de verdamping door extra opnamecapaciteit te verwaarlozen.

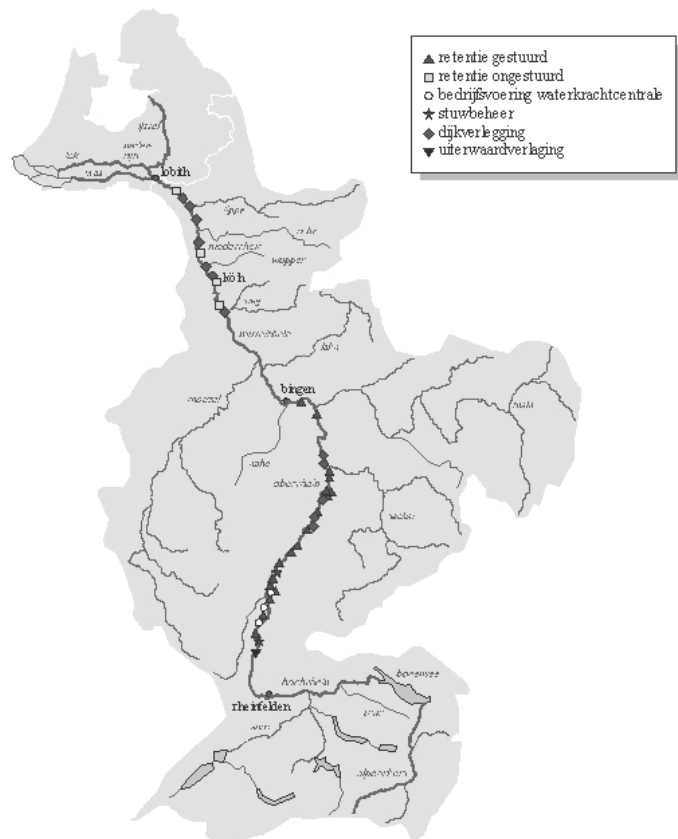
De hoogte van de afvoergolf is wel te veranderen door bijvoorbeeld in bepaalde zijtakken de piekafvoer te vertragen, maar omdat deze piekafvoer meestal vooruit loopt in die in de Rijn heeft dit niet altijd het gewenste effect.

Verandering van landgebruik op korte termijn wordt bovendien niet haalbaar geacht.

Een andere manier om de piekafvoer te verminderen is retentie van de afvoer bovenstrooms. Hoewel retentiemaatregelen in Duitsland een beperkte bijdrage kunnen leveren aan het verlagen van de maatgevende afvoerpiek vormen deze geen alternatief voor maatregelen in Nederland. Een nadere beschouwing wijst uit dat de waterstandsverlaging bij Lobith wordt geschat op maximaal 10 centimeter.



figuur 5.1 – landgebruik is mede bepalend voor de snelheid van afvoer



figuur 5.2 - maatregelen bovenstrooms.

5.2 Bergen van water

Met het bergen van water langs de Rijntakken kan de hoogwatergolf worden afgevlakt. Hierboven zijn de retentiegebieden bovenstrooms van Lobith al genoemd. In Nederland zijn twee gebieden theoretisch interessant als retentiegebied, het Rijnstrangengebied en de Ooipolder/Duffelt.

Het geschikt maken van deze gebieden als retentiegebied zal echter zeer duur zijn. Tientallen kilometers dijk moeten worden verhoogd en deels opnieuw aangelegd. Gebruikers moeten schadeloos worden gesteld voor de incidentele overstroming en investeringen moeten worden vergoed. De totale kosten worden geschat op minstens 0,3 miljard euro. Hierbij is nog geen rekening gehouden met plannen die nu worden voorbereid of uitgevoerd, zoals de verlenging van de A15 en de aanleg van de Betuwelijn.

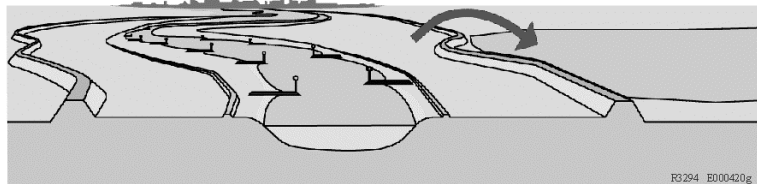
Daarnaast is het probleem bij retentiegebieden dat wanneer het water niet precies op het juiste moment in het retentiegebied wordt gelaten, de piekafvoer niet wordt verminderd en het resultaat dus nul is.

Tenslotte is er het sociale effect. Wanneer retentie wordt overwogen zullen eventuele gebruikers van het gebied hiertegen protesteren.

Aan de retentiegebieden als maatregelen zijn dus enkele grote bezwaren verbonden



figuur 5.3 – het Rijnstrangengebied

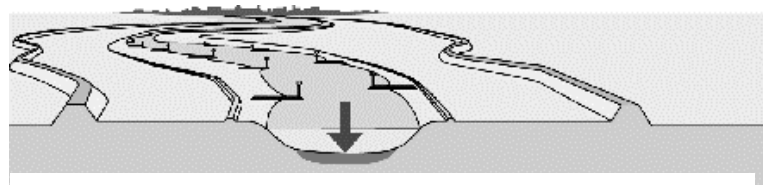


figuur 5.4 – berging van water in retentiegebieden

5.3 Maatregelen in het zomerbed

5.3.1 zomerbedverlaging

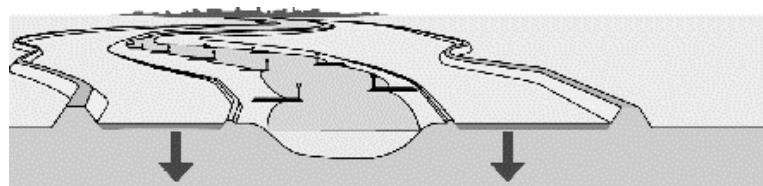
Hoewel het zomerbed aan de bovenstroomse kant door ingrepen in het verleden fors is gedaald, kan het benedenstrooms wel als maatregel worden toegepast. In de benedenstroomse trajecten vindt op dit moment aanzanding plaats. Daarom wordt er op dit moment ook al gebaggerd. Voor de drie Rijntakken is onderzocht wat een extra zomerbedverdieping in de benedenstroomse trajecten van 1 meter voor effect zou hebben. Een waterstandsverlaging van 20 tot 30 centimeter over een afstand van 50 kilometer blijkt haalbaar te zijn. Wel is het noodzakelijk om te blijven baggeren om de waterstandsverlaging in stand te houden. Bovendien kan zomerbedverlaging ongewenste gevolgen hebben voor de grondwaterhuishouding en de zoutindringing.



figuur 5.5 - zomerbedverlaging

5.3.2 kribben

Door de kribben te verwijderen kan de afvoercapaciteit ook worden vergroot. Dit is echter niet wenselijk in verband met de scheepvaart. Er kunnen dan



figuur 5.6 – kribverlaging

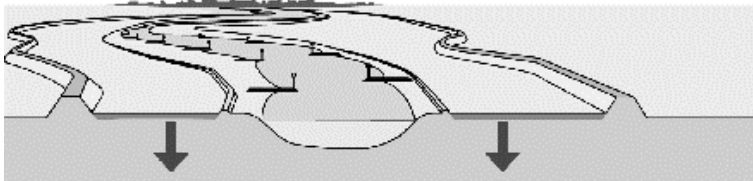
zandbanken ontstaan en de hoofdgeul zou zich kunnen verplaatsen.

Verlaging van de kribben is wel interessant, maar niet overal mogelijk. In de bovenstroomse trajecten kunnen de kribben soms met ruim twee meter worden verlaagd. In benedenstroomse trajecten geheel niet. Al met al kan het effect van kribverlaging variëren, 5 tot 15 centimeter op de Waal en de IJssel en maximaal 10 centimeter op de Nederrijn. Hoewel de waterstandsverlaging hierdoor niet heel groot is, is kribverlaging wel interessant vanwege de lage kosten.

5.4 Maatregelen in de uiterwaarden

5.4.1 Uiterwaardverlaging

Met uiterwaardverlaging kan de sedimentatie die door maatregelen in het verleden in de uiterwaarden heeft plaatsgevonden weer teniet worden gedaan. Uiterwaardverlaging wordt onderverdeeld in uiterwaardplannen en aanvullende maatregelen, afhankelijk van de ruimtelijke beperking van de plannen. Het herinrichten van grote delen van de uiterwaarden is ook onderdeel van de herinrichting van de Ecologische Hoofdstructuur (EHS) van Nederland, het doel van deze herinrichting is echter geen waterstandsverlaging. Herinrichting van de EHS zonder uiterwaardverlaging kan tot maximaal 10 centimeter waterstandsverlaging leiden.



figuur 5.7 – uiterwaardverlaging

Uiterwaardplannen

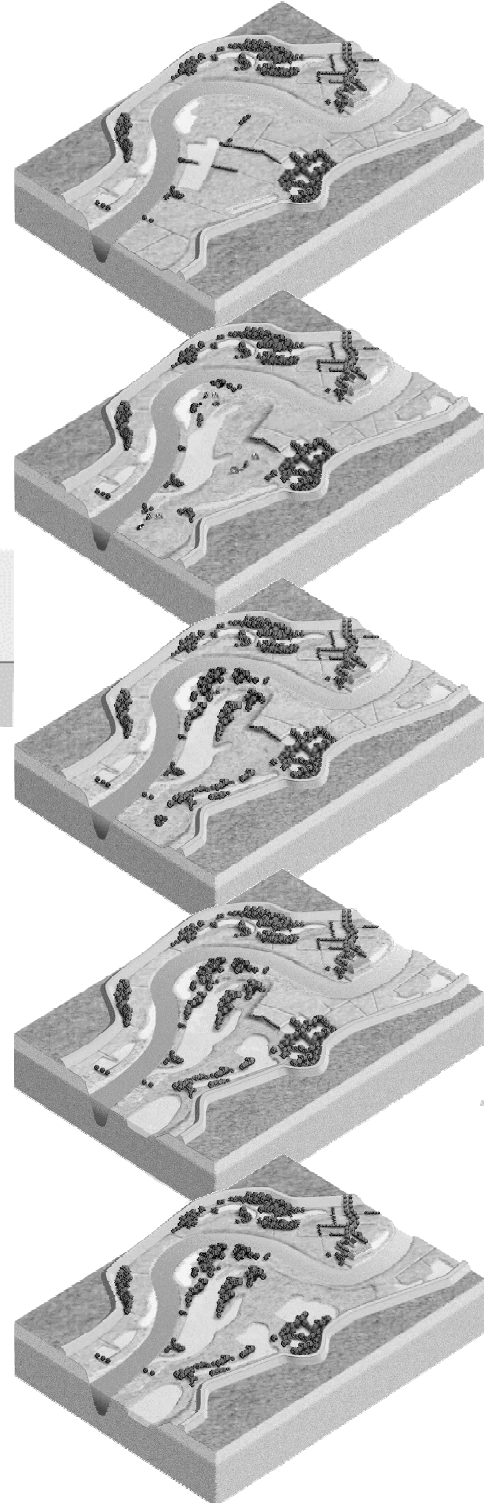
Uiterwaardplannen zijn herinrichtingsplannen die zijn opgesteld door gemeenten, waterschappen of provincies en zijn van toepassing op een beperkt deel van de uiterwaard. Meer dan 150 van dergelijke plannen zijn aangedragen. Deze plannen zijn onder te verdelen in:

- ♣ plannen zonder verlaging
- ♣ plannen met ‘maximale verlaging zonder dat de beoogde natuurontwikkeling gevaar loopt’
- ♣ plannen met ‘extra verlaging’ waarbij ‘droge en v ochtige natuur’ wordt vervangen door ‘hette natuur’.

Het effect van deze plannen varieert van 10 centimeter waterstandsverhoging bij plannen zonder uiterwaardverlaging tot 30 centimeter zonder aantasting van de huidige natuurontwikkeling. Bij de plannen met extra verlaging is nog eens 10 tot 20 centimeter extra waterstandsverlaging mogelijk. Plaatselijk is het ook mogelijk een extra waterstandsverlaging tot 15 centimeter te verkrijgen door vegetatiebeheer, waarbij stroombelemmerende vegetatie wordt vermeden en grasland in stand blijft.

Aanvullende maatregelen

Aanvullende maatregelen zijn van toepassing op de gehele uiterwaard en zijn onderzocht om te kijken wat er met ‘integrale’



figuur 5.8 – van uiterwaard naar uiterwaardplannen naar aanvullende maatregelen met natuurontwikkeling

uiterwaardverlaging mogelijk is. Hier wordt als volgt onderscheid in gemaakt:

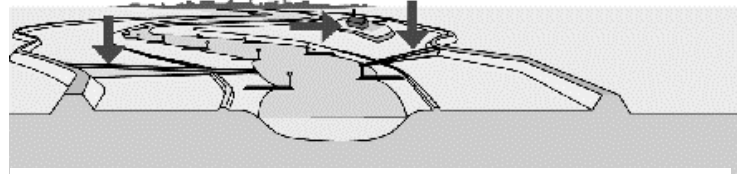
- ♣ met behoud van de huidige gebruiksfuncties
- ♣ met natuurontwikkeling in de gehele uiterwaard

Bij de eerste aanvullende maatregel kan de waterstand langs Nederrijn, Lek en IJssel met zo'n 30 tot 40 centimeter worden verlaagd, langs de Waal is dit zo'n 50 centimeter. Bij de tweede variant kan de waterstand worden verlaagd met gemiddeld 80 centimeter op de Waal en 60 centimeter op de andere takken.

De verlaging is hierbij bovenstrooms het grootst en benedenstrooms het kleinst. Wanneer deze maatregel wordt uitgevoerd in combinatie met het verwijderen van de zomerkades (zie elders in deze paragraaf) zal de effectiviteit hiervan vergroot worden.

5.4.2 Verwijderen hydraulische knelpunten

Op basis van de hydraulische verhanglijn in de Rijntakken zijn zo'n 254 knelpunten aangewezen, dit zijn vaak hoogwatervrije fabrieksterreinen, bruggenhoofden en veerstoepen. Niet al deze knelpunten zijn te verwijderen en niet altijd heeft het evenveel effect. De kosten van verwijdering van een knelpunt kan sterk variëren, tussen de 2,5 miljoen en 70 miljoen euro. De efficiëntie kan dus sterk uiteen lopen. 60 maatregelen zijn aan de hand van de efficiëntie geselecteerd om in aanmerking te komen als waterstandsverlagende maatregel. Gemiddeld kan per knelpunt met het verwijderen van deze 60 knelpunten een waterstandsverlaging worden bereikt van ongeveer 10 centimeter op de Nederrijn, Lek en IJssel tot 20 centimeter op de Waal. Dit verschilt echter per knelpunt en soms is het effect zeer plaatselijk. Bovenstrooms is het effect van de verwijdering het grootst.

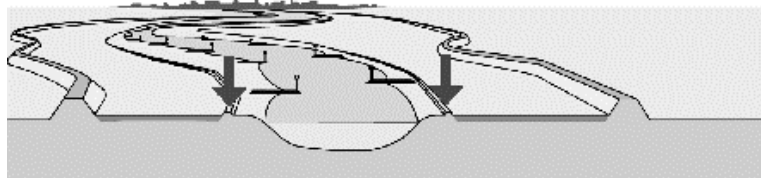


figuur 5.9 – verwijderen van hydraulische knelpunten

60 maatregelen zijn aan de hand van de efficiëntie geselecteerd om in aanmerking te komen als waterstandsverlagende maatregel. Gemiddeld kan per knelpunt met het verwijderen van deze 60 knelpunten een waterstandsverlaging worden bereikt van ongeveer 10 centimeter op de Nederrijn, Lek en IJssel tot 20 centimeter op de Waal. Dit verschilt echter per knelpunt en soms is het effect zeer plaatselijk. Bovenstrooms is het effect van de verwijdering het grootst.

5.4.3 Verwijderen zomerkades

Het verwijderen van de zomerkades kan ongeveer 15 centimeter waterstandsverlaging opleveren in de Waal tussen Nijmegen en Tiel. De landbouwfunctie van de uiterwaarden en de scheepvaartfunctie van de hoofdgeul lopen hierdoor wel gevaar omdat de rivier dynamischer wordt. Er zullen zandbanken ontstaan in de vaargeul, bovendien is het mogelijk dat deze zandbanken niet op 1 plek blijven liggen.

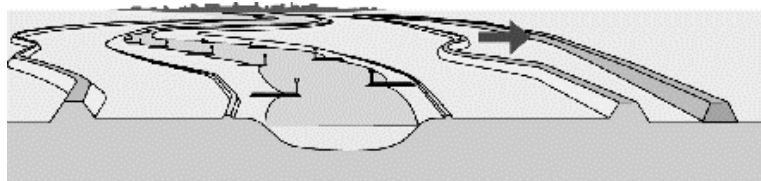


figuur 5.10 – verwijderen zomerkades

5.5 Maatregelen binnendijks

5.5.1 Dijkverlegging

Dijkverlegging heeft ook als functie hydraulische knelpunten op te heffen. Rekening houdend met de haalbaarheid zijn 33 mogelijke grootschalige dijkverleggingen geselecteerd.



figuur 5.11 – grootschalige dijkverlegging

Bij een grootschalige dijkverlegging wordt de dijk in het winterbed over een lengte van 1 tot 5 kilometer 300 tot 600 meter teruggelegd, in één geval met 1000 meter. De kosten variëren van 5 tot 60 miljoen euro.

Ondanks de hoge kosten zijn de dijkverleggingen wel efficiënt, vooral bij vernauwingen die bovenstrooms veel opstuwung veroorzaken. Alle dijkverleggingen samen kunnen langs de Waal en de Nederrijn/Lek tot maximaal 60 centimeter waterstandsverlaging leiden. Langs de IJssel zijn er slechts enkele beperkte dijkverleggingen mogelijk.

Voor stedelijke knelpunten zijn grootschalige dijkverleggingen vaak niet haalbaar omdat het daar om dicht bebouwde gebieden gaat. Voor deze situaties zijn groene rivieren onderzocht.

5.5.2 Groene rivieren

Door een groene rivier stroomt alleen water bij hoogwater. Bij lagere afvoeren valt deze droog en kunnen deze bijvoorbeeld als landbouwgrond worden gebruikt. Hoewel deze maatregelen veel geld kosten, zijn ze toch interessant vanwege de grote waterstandsverlaging. Bij Nijmegen



figuur 5.12 – groene rivier

kan zo een verlaging van 50 centimeter worden behaald en bij Zutphen 50 centimeter. Andere interessante maatregelen zijn groene rivieren in de Waal bij Haften en in de IJssel bij Deventer en Kampen.

5.6 Oplossingen

De verschillende typen maatregelen zijn vervolgens naast elkaar gelegd en vergeleken naar hydraulische efficiëntie, dat wil zeggen hoeveel waterstandsverlaging krijgen we terug per geïnvesteerd geld. Hieruit blijken grootschalige dijkverleggingen, groene rivieren, zomerbedverdieping en kribverlaging het beste uit te komen. Het verwijderen van hydraulische knelpunten scoort gemiddeld en het afgraven van uiterwaarden het minst.

De typen maatregelen zijn echter niet overal toe passen, dus moet er naar een combinatie van maatregelen worden gekeken. Hierbij kunnen echter niet zomaar de effecten van de losse maatregelen worden opgeteld. Bovendien zijn er natuurlijk meer criteria dan alleen de kosten-effectiviteit, bijvoorbeeld natuurontwikkeling.

Met de verschillende maatregelen zijn enkele basisalternatieven geconstrueerd. In deze alternatieven worden verschillende maatregelen gecombineerd om de afvoer van de maatgevende afvoer van 16.000 m³/s mogelijk te maken. Daarnaast zijn er alternatieven ontwikkeld om te kijken of dit ook mogelijk is met 18.000 m³/s. De alternatieven zijn ontwikkeld aan de hand van de volgende motto's:

- ♣ alternatief 1: ‘herinrichting van uiterwaarden in lijn met de Ecologische Hoofdstructuur’
- ♣ alternatief 2: ‘meer natuurontwikkeling’
- ♣ alternatief 3: ‘het behoud van uiterwaarden die cultuurhistorisch of landschappelijk waardevol zijn’
- ♣ alternatief 4: de meeste efficiënte maatregelen eerst, maar alleen binnendijkse maatregelen
- ♣ alternatief 5: de meest efficiënte maatregelen eerst, ook met dijkverleggingen

Alternatieven 4 en 5 zijn ontwikkeld met een ander concept, ‘overal waar nodig en beginnend met de meest efficiënte’. Met efficiënt wordt hier bedoeld kosten-effectief. Hierbij worden in alternatief 4 alleen binnendijkse maatregelen gebruikt en in alternatief 5 ook dijkverleggingen.

In deze studie zal niet worden gekeken naar de alternatieven maar naar de effecten van enkele losse maatregelen.

5.6.1 Uitgangspunten

Verder zijn in de Ruimte voor Rijntakken-studie de volgende uitgangspunten aangehouden bij het maken van de alternatieven:

- ♣ de doelstelling van de alternatieven is te voorkomen dat extra dijkverhogingen noodzakelijk zijn;
- ♣ op de korte termijn kan de waterstand aan de monding van de IJssel in het Ketelmeer worden gehandhaafd op het huidige niveau;
- ♣ de maatgevende hoogwaterstand kan op de overgang naar het benedenrivierengebied zowel op de korte als op de lange termijn zo' n 20 centimeter hoger worden;
- ♣ retentie wordt bij alle alternatieven buiten beschouwing gelaten; daarom wordt in de alternatieven vooral vergroting van de afvoercapaciteit nagestreefd;
- ♣ de zogenaamde INTERREG-projecten worden in alle alternatieven onverkort uitgevoerd;

- ♣ bijzondere natuur- of landschapswaarden en grote boscomplexen met een beschermde status worden ontzien: daar zijn de uiterwaardplannen op aangepast;
- ♣ de waterverdeling over de drie Rijntakken blijft in eerste instantie gelijk; daarom zijn in de basisalternatieven maatregelen langs alle Rijntakken nodig;
- ♣ zomerbedverdieping op de benedenstroomse trajecten mag pas bij doorontwikkeling voor hogere afvoeren worden ingezet, vanwege ongewenste gevolgen voor de ontwikkeling van de rivierbodembodem;
- ♣ maatregelen bij de stedelijke knelpunten blijven in eerste instantie buiten beeld;
- ♣ er is geen rekening gehouden met de overhoogte van de dijken die in het verleden zijn aangelegd, noch met de extra ruimte die is ontstaan door autonome bodemdaling, de zogenaamde Boertienruimte.

Tijdens het Ruimte voor Rijntakken onderzoek zijn enkele randvoorwaarden ter discussie gesteld, dit zijn de volgende:

- ♣ het vast houden aan de afvoerverdeling over de Rijntakken, onder meer omdat in de Integrale Verkenning Benedenrivierengebied werd geconstateerd dat extra afvoer over de Lek zeer grote moeilijkheden zou opleveren;
- ♣ bij de Integrale Verkenning Benedenrivierengebied zag het ernaar uit dat het mogelijk is de maatgevende hoogwaterstanden op de overgangen van Waal en Lek naar het benedenrivierengebied op de korte termijn - maar zelfs op de lange - op het huidige niveau te handhaven;
- ♣ er is onderzocht hoe maatregelen rond de ergste stedelijke knelpunten eruit zouden kunnen zien en wat ze zouden kunnen betekenen voor sommige alternatieven, ongeacht de bestuurlijke complexiteit. Deze maatregelen zijn niet in de alternatieven verwerkt, maar afzonderlijk bekeken.

5.7 Berekeningen met maatregelen

Om de maatregelen te simuleren moet per maatregel het model worden aangepast. Dit gebeurt door de dwarsprofielen aan te passen. Hoeveel, welke en op welke manier de dwarsprofielen moeten worden aangepast is afhankelijk van de maatregel. In tabel 5.1 staat een overzicht van hoeveel dwarsprofielen er moeten worden aangepast bij de verschillende maatregelen:

maatregel	aantal	aantal profielen (schatting)	haalbaarheid (model-technisch)	haalbaarheid (in de praktijk)	haalbaarheid (totaal)
zomerbedverlaging	4	177	1	1	2
aanvullende maatregelen	grootschalig	637	2	4	6
uiterwaardplannen	154	500	5	3	8
kribverlaging	1800	1800	7	2	9
groene rivieren	6	-	4	6	10
verwijderen zomerkades	grootschalig	5000	3	8	11
verwijderen hydraulische knelpunten	57	114	6	5	11
grootschalige dijkverlegging	33	200	8	7	15

tabel 5.1 - afweging van de maatregelen (bij haalbaarheid staat een laag getal voor een goede haalbaarheid)

In verband met de beschikbare tijd is het helaas niet haalbaar voor alle maatregelen aparte schematisaties te maken. Daarom is er aan iedere maatregel een score toegekend voor de modeltechnische en de praktische haalbaarheid. Op deze manier is ervoor gekozen om alleen de maatregelen zomerbedverlaging en aanvullende maatregelen te simuleren. Ook wordt er gekeken naar het effect bij het verwijderen van een enkel hydraulisch knelpunt. Hieronder is uitgelegd waarom de scores aan de maatregelen zijn toegekend.

Zomerbedverlaging

Het verlagen van het zomerbed, gebeurt nu ook reeds door de jaarlijkse onderhoudsbaggerwerkzaamheden. Het is daarom zeer waarschijnlijk dat dit in de toekomst ook gebeurt. Voor het toevoegen van de baggerwerkzaamheden hoeven geen profielen te worden aangepast. Er kan eenvoudig eenmalig sediment aan het

model worden onttrokken. Als maatregel in het Ruimte voor Rijntakken project wordt echter ook een eenmalige zomerbedverlaging voorgesteld.

Aanvullende maatregelen : grootschalige uiterwaardverlaging

De aanvullende maatregelen kunnen als grootschalige maatregelen worden toegepast op het model. Bij deze maatregelen wordt in praktijk echter ook de ruwheid veranderd doordat de vegetatie verandert. In het SOBEK Rijntakken model is het echter niet haalbaar de ruwheden ook aan te passen. (zie hoofdstuk 26 'Model') In deze studie worden de aanvullende maatregelen daarom vervangen door enkel het verlagen van de uiterwaarden. Van de aanvullende maatregelen kunnen wel beide varianten worden bekeken, de grootte van de verlaging tussen deze varianten verschilt.

Uiterwaardplannen

De uiterwaardplannen omvatten veel verschillende plannen. Het omzetten naar nieuwe profielen is zeer veel werk omdat er voor elk plan andere aanpassingen moeten worden gedaan.

Kribverlaging

Voor de kribverlaging moeten er zeer veel profielen worden aangepast. De aanpassing van deze profielen is afhankelijk van de locatie in de rivier. De manier van aanpassen is echter wel steeds dezelfde.

Groene rivieren

Groene rivieren kunnen worden gemodelleerd door extra takken toe te voegen met een overlaat. Het modelleren van deze overlaten is echter lastig.

Verwijderen zomerkades

Het verwijderen van de zomerkades in het model is als grootschalige maatregel toe te passen, de verandering aan het profiel is dan steeds dezelfde. Praktisch gezien is het echter niet eenvoudig deze maatregel toe te passen omdat de scheepvaartfunctie dan zeer moeilijk te handhaven blijft.

Verwijderen hydraulische knelpunten

In de oude versie van SOBEK-Rijn zijn er 57 knelpunten geïdentificeerd. Deze moeten op verschillende manieren worden verwijderd. Voor het nieuwe model dat bij deze studie is gebruikt is deze lijst van knelpunten echter niet correct. Van het nieuwe model is nog geen lijst van hydraulische knelpunten aanwezig. Bovendien zijn enkele knelpunten niet door middel van de dwarsprofielen geschematiseerd maar door extra wrijving toe te passen of de wrijving van de bodem aan te passen.

Een nieuwe lijst van knelpunten kan gemaakt worden door de verhanglijnen van de rivier te vergelijken met een evenwichtsverhang en vervolgens de dwarsprofielen en de wrijving te bekijken waar deze afwijkt van het evenwichtsverhang. Afhankelijk van de afwijkingen hierin kunnen de knelpunten dan worden verwijderd. In deze studie is dit echter niet meer gedaan. Wel zal nog worden gekeken naar de effecten van het verwijderen van de extra wrijvings-elementen bij de veerstoep Lexkesveer aangezien deze eenvoudig zijn toe te passen op het model



figuur 5.13 – de zuidelijke veerstoep bij Lexkesveer

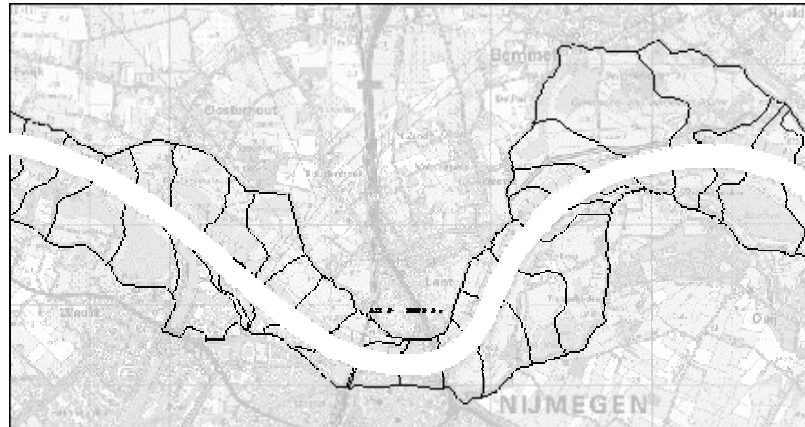
6 Simulaties

In dit hoofdstuk wordt besproken hoe met behulp van de eerder genoemde scenario's en maatregelen de morfologische effecten kunnen worden berekend. Eerst zal kort besproken worden hoe rivieren worden gesimuleerd. Hierna volgt een beschrijving van het model waarmee is gerekend en van de rekengevallen die met het model zijn uitgevoerd.

6.1 Simulatie van rivieren

6.1.1 1-D model

Een ééndimensionaal model is het eenvoudigste model dat op dit moment wordt gebruikt om de morfologie van rivieren door te rekenen. Voor de Rijntakken zijn meerdimensionale modellen ook nog niet stabiel of kosten erg veel rekentijd. Omdat het 1-dimensionale model bovendien op relatief eenvoudige wijze beschikbaar was, is er bij deze studie gekozen voor een 1-dimensionaal model.



figuur 6.1 – Bij een ééndimensionaal model wordt een rivier geschematiseerd in doorsnedes

Het nadeel van een 1-D model is echter dat het mogelijk is dat problemen waarin twee- en driedimensionale processen een grote rol spelen niet goed worden gesimuleerd. Een voorbeeld hiervan is bochtstroming en de uitwisseling van sediment tussen de hoofdgeul en uiterwaarden.

Bij een ééndimensionaal model wordt een rivier geschematiseerd met doorsnedes (figuur 6.1). Het rekenprogramma berekent vervolgens de uitwisseling tussen deze doorsnedes. Deze uitwisseling is in één richting, het model is dus ééndimensionaal.

6.1.2 Dynamica

Rivieren zijn dynamische systemen, niet alleen op verschillende gebieden maar ook op verschillende schaalniveau's. De volgende vakgebieden spelen een rol:

- ♣ hydrodynamica hoe het water reageert
- ♣ morfologie hoe het sediment en de rivierbodem reageert
- ♣ ecologie hoe de natuur reageert
- ♣ sociaal-economische dynamiek hoe de maatschappij en de economie reageren

Alle factoren kunnen van invloed op elkaar zijn: wanneer er bijvoorbeeld iets verandert aan de hydrodynamica kan dit gevolgen hebben voor de morfologie, de ecologie en de sociaal-ecologische dynamiek. Bij de andere gebieden is dit ook het geval. Bovendien zijn de relaties tussen de bepaalde gebieden niet altijd met eenvoudige vergelijkingen omschreven maar is soms een stelsel van vergelijkingen nodig om de relaties uit te drukken. Dit is het geval bij de hydrodynamica en de morfologie. Hieronder zal worden uitgelegd welke vergelijkingen hiervoor nodig zijn, wanneer slechts één dimensie wordt bekeken. Een uitgebreidere beschrijving van deze dynamica is te vinden in Jansen (1994).

Hydrodynamica

De hydrodynamica beschrijft de manier waarop het water reageert op invloeden van buiten. Met de hydrodynamica wordt bijvoorbeeld berekend hoe hoog de waterstand zal worden wanneer een bepaalde hoogwatergolf passeert en hoeveel debiet door elke riviertak komt te stromen. Voor de hydrodynamica zijn er twee vergelijkingen nodig, een continuïteitsvergelijking en een bewegingsvergelijking. De bewegingsvergelijking beschrijft de hoeveelheid van beweging van het water, terwijl de continuïteitsvergelijking

voor behoud van massa zorgt, zodat de juiste hoeveelheden water in elke doorsnede passeren en er geen water wordt ‘gemaakt’ of ‘verloren’ gaat.

De continuïteitsvergelijking voor het water luidt:

$$\frac{\partial A_t}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

waarin A_t : totale oppervlakte van de doorsnede (m^2),
 t : de tijd (s),
 Q : afvoer (m^3/s),
 x : de afstand in de richting van de rivier (m).

De onafhankelijke variabelen in deze vergelijking zijn de tijd en de afstand (x). De overige variabelen worden hiermee berekend.

De bewegingsvergelijking voor de hydrodynamica luidt:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_B \frac{Q^2}{A_f} \right) + gA_f \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 R A_f} = 0$$

waarin \hat{C}_B : Boussinesq constante,
 A_f : de oppervlakte van het stroomvoerende gedeelte van de doorsnede (m^2),
 g : gravitatieversnelling van de aarde (m/s^2),
 h : waterniveau,
 C : wrijvingscoëfficiënt van Chézy,
 R : hydraulische straal.

De Boussinesq constante in de bewegingsvergelijking wordt berekend en is dus een afhankelijke variabele. De gravitatieversnelling is een parameter. De overige variabelen, ook de Boussinesq constante, worden berekend en zijn dus afhankelijke variabelen.

Morfologie

Met de morfologie wordt de interactie beschreven tussen het sediment in de rivier en de rivierbodem. Voor de morfologie zijn er ook een continuïteitsvergelijking en een bewegingsvergelijking.

De continuïteitsvergelijking voor het sediment:

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} - \frac{\partial S}{\partial x} = 0$$

hierin is A_s : de oppervlakte van het sedimenttransporterende deel van de doorsnede (m^2)
 S : het sedimenttransport door de doorsnede (m^3/s), inclusief poriën volume van het gesedimenteerde of geërodeerde bodemmateriaal

De bewegingsvergelijking voor het sediment heeft vaak de vorm van een transportformule, dit is een grotendeels empirisch bepaalde relatie tussen het transport en één of meer eigenschappen van de waterbeweging. Een gangbare vorm is:

$$S = B_s a u^b$$

waarin B_s : de breedte waarover het sedimenttransport plaatsvindt,
 a : een constante, afhankelijk van de toegepaste transportformule,
 u : de stroomsnelheid,
 b : een constante, afhankelijk van de toegepaste transportformule,

Ecologie en Sociaal-economische dynamiek

Ondanks de sterke interactie met de ecologie en de sociaal-economische dynamiek, vallen deze buiten het vakgebied van de civiele techniek.

Bovendien is het erg moeilijk om deze dynamiek in formules samen te vatten omdat de relaties tussen de fysieke parameters van de rivieren, zoals stroomsnelheid, breedte, waterstand en de ecologische en sociaal-economische parameters niet altijd even duidelijk zijn.

Een ecologische parameter die bijvoorbeeld een rol kan spelen:

- ♣ ontwikkeling van flora en fauna in het stroomgebied

Enkele sociaal-economische parameters zijn:

- ♣ bebouwing
- ♣ industrie
- ♣ waterverkeer
- ♣ bedrijking

Wanneer de interacties tussen deze parameters voor de toekomst moeten worden bekeken, is het niet alleen nodig scenario's voor het klimaat te ontwikkelen. Ook scenario's voor de economie en de toekomstige sociologie zijn dan nodig. De relaties tussen al deze vakgebieden zijn te complex om hier te behandelen.

6.1.3 Schaalniveau's

Ook de schaalniveau's kunnen verschillen in de ruimte en de tijd; zo zijn in de morfologie van een rivier de volgende schaalniveau's te onderkennen:

- ♣ bodemribbels
- ♣ bodemligging (in de diepte)
- ♣ breedte van de rivier
- ♣ dwarsprofiel van de rivier
- ♣ aanzanding en erosie van oevers en geulen
- ♣ ligging van de geulen binnen het stroomgebied
- ♣ veranderingen in (aantal) geulen binnen het stroomgebied

6.1.4 Conclusie

Dit alles zorgt ervoor dat rivieren ingewikkelde dynamische systemen zijn die niet eenvoudig te simuleren zijn.

Door de vele invoerparameters bij een dergelijke simulatie zijn er veel verschillende resultaten mogelijk, vergelijkbaar met het aantal oplossingen van een ingewikkelde wiskundige vergelijking. Een enkele simulatie van een mogelijke toekomstige situatie voldoet daarom niet. Een reeks van simulaties is nodig om daadwerkelijk inzicht te krijgen in de toekomst. Met behulp van een Monte-Carlo-simulatie is het mogelijk de invoerparameters te variëren met verschillende kansverdelingen. Uit de kansverdelingen worden dan telkens invoerwaarden getrokken. Met de resultaten van de vele simulaties is het dan mogelijk een kansverdeling te genereren voor de uitkomsten van het model. Deze methode is echter erg rekenintensief, daarom wordt voor deze studie gebruik gemaakt van enkele deterministische berekeningen bij verschillende klimaatscenario's en maatregelen.

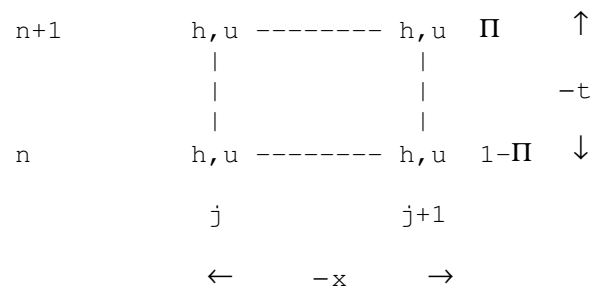
6.2 Model

6.2.1 SOBEK

Voor de 1-D berekeningen wordt gebruik gemaakt van het rekenprogramma "SOBEK Rivers & Estuaries". Meer informatie hierover is te vinden in WLIDelft Hydraulics (2001)

SOBEK is een 1-dimensionaal dynamisch numeriek modelleersysteem voor open waterlopen. Het programma is in staat vergelijkingen op te lossen die waterbeweging, zoutindringing, sedimenttransport, morfologie en waterkwaliteit beschrijven. SOBEK is ontwikkeld door WLIDelft Hydraulics in samenwerking met Rijkswaterstaat RIZA.

Bij de berekeningen in deze studie is gebruik



figuur 6.2 – het tijd-ruimte grid van de Preissmann-schematisatie

gemaakt van de modules "Water Flow", "Sediment Transport" en "Morphology".

Het is mogelijk in SOBEK een model te maken, dat bestaat uit opeenvolgende doorsneden. Het programma rekent vervolgens met de verschillende modules uit op welke manier de verschillende parameters (bijvoorbeeld debiet en sedimenttransport) van de doorsnede aan de volgende moeten worden doorgegeven. Dit gebeurt met behulp van gediscretiseerde vergelijkingen.

De vergelijkingen van de waterbeweging worden gediscretiseerd met een Preissmann box schematisatie. (zie figuur 6.2)

Tenslotte kan SOBEK als uitvoer verschillende parameters geven per rekencel, zoals:

- debiet
- stroomsnelheid
- waterniveau
- breedtegemiddelde bodemniveau van het sedimenttransporterende deel
- laagste bodemniveau van de doorsnede

De laatste twee zijn verschillende manieren waarop met SOBEK het bodemniveau kan worden uitgevoerd. Bij de resultaten zal meestal naar de breedtegemiddelde doorsnede worden gekeken omdat hiermee de hele bodem (van het sedimenttransporterende deel) wordt meegenomen.

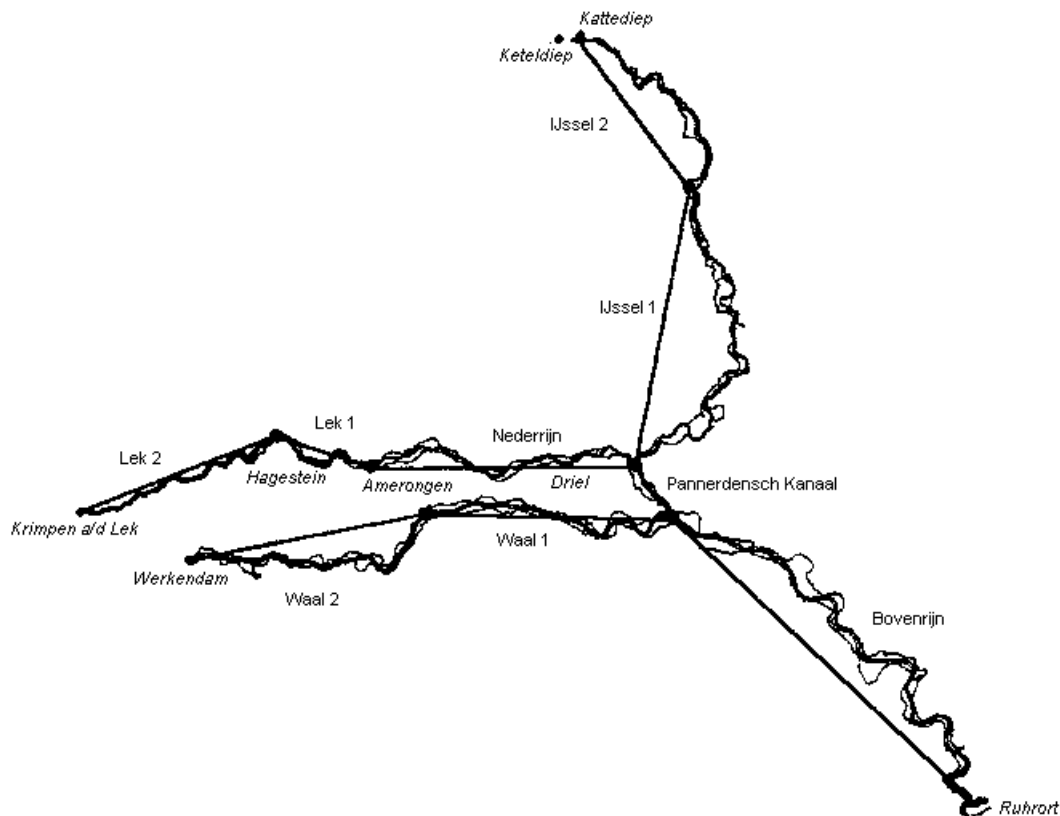
Bij de uiterwaardverlagingen zal echter ook naar de laagste bodem van de doorsnede worden gekeken.

6.2.2 SOBEK-Rijn versie 2000.3M9

Door Rijkswaterstaat is een model ontwikkeld om de morfologie van de Rijntakken in SOBEK door te rekenen. Dit model, SOBEK-Rijn versie 2000.3M9, is het model dat is gebruikt voor de spankrachtstudie om berekeningen te maken omtrent de invloed van baggerwerkzaamheden en zeespiegelstijging op de grootschalige morfologie. De berekeningen met dit model zijn gedaan over de periode van 1997 tot 2097.

Schematisatie

De schematisatie van het model is als volgt:



figuur 6.3 – SOBEK-Rijn versie 2000.3M9 – de schematisatie

Het model beschrijft de Bovenrijn vanaf Ruhrort (km 781.10), de Waal, de Boven Merwede tot km 961.03, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn, de Lek tot Krimpen a/d Lek (km 988.58), de IJssel, het Keteldiep en het Kattediep tot in de monding in het Ketelmeer. In tabel 6.1 zijn deze takken nog eens genoemd.

tak	plaats van (Rijn km)	tot (Rijn km)
Bovenrijn	781.10 (Ruhrort)	867.06
Waal 1	867.06	913.44
Waal 2	913.44	961.00 (Werkendam)
Pannerdensch Kanaal	867.06	878.59
Nederrijn	878.59	929.00
Lek 1	929.00	947.36
Lek 2	947.36	988.58 (Krimpen a/d IJssel)
IJssel 1	878.59	957.10
IJssel 2	957.10	1001.14
Keteldiep	1001.14	1006.60
Kattediep	1001.14	1002.23

tabel 6.1 – overzicht van de geschematiseerde takken

De hele rivier is ingedeeld in vakken van 500 meter lang, met uitzondering van de Bovenrijn, deze heeft vakken van 1000 meter. Voor elk vak is een dwarsdoorsnede gedefinieerd. Elke dwarsdoorsnede is gedefinieerd met behulp van een bodemprofiel en een aantal waarden voor de definitie van het stroomvoerende deel en het sediment transporterende deel.

Bij de stuwen van Hagestein, Driel en Amerongen zijn structures geplaatst met een hydraulische controller. Dit houdt in dat de drempelhoogte van de stuwen wordt gecontroleerd met behulp van een hydraulische variabele, bijvoorbeeld de waterstand.

Er zijn enkele laterale debieten geplaatst die het mogelijk maken dat er water kan worden uitgewisseld met enkele zijtakken en kortsluitingen:

tak	rivierkilometer	naam
Waal	883.21	WAAL_1
Waal	911.43	WAAL_2
Pannerdensch Kanaal	873.48	PANKAN
Nederrijn	883.89	NEDR_1
Nederrijn	890.99	min.afvoer Nedrijn1
Nederrijn	891.95	min.afvoer Nedrijn2
Nederrijn	897.45	NEDR_2
Nederrijn	902.06	Linge 1
Nederrijn	928.51	NEDR_3
Lek	964.92	LEK__1
IJssel	886.61	YSSEL1
IJssel	888.61	Kortsl Rhederlaag 1
IJssel	896.87	Kortsl Rhederlaag 2
IJssel	900.35	YSSEL2
IJssel	901.00	OUDEYS
IJssel	916.86	YSSEL3
IJssel	922.67	YSSEL4
IJssel	931.00	TWENTK
IJssel	935.54	YSSEL5
IJssel	946.69	YSSEL6
IJssel	977.82	YSSEL7
IJssel	992.94	YSSEL8

tabel 6.2 – overzicht van de laterale debieten in het originele model

Verder zijn er een aantal extra weerstandselementen geplaatst door lokaal extra wrijving toe te voegen. Bijvoorbeeld bij de veerstoep bij Lexkesveer (km 900,20) in de Nederrijn.

De randvoorwaarden voor het model zijn opgelegd aan de bovenstroomse kant bij Ruhrort (Duitsland) en aan de benedenstroomse kant bij Werkendam, Krimpen aan de Lek, het Keteldiep en het Kattediep.

In bijlage C is een kaart met rivierkilometers en een lijst met steden gevoegd.

Hydraulisch model

SOBEK-Rijn versie 2000.3M9 maakt gebruik van het hydraulische model SOBEK-Rijn 2000.3. Een uitgebreide beschrijving van dit model is gegeven door Van der Veen (2001).

Het hydraulische model is gecalibreerd om de waterstanden en de afvoerdeling over zomerbed, oeversectie en winterbed "goed" te beschrijven bij het hoogwater van januari 1995. Hiertoe zijn ruwheden in het winterbed, oeversecties en het zomerbed aangepast.

Bij de validatie is gekeken naar de hoogwaters van december 1993 en november 1998. Hieruit bleek dat het model bij dergelijke extreme hoogwaters de waterstanden goed weergeeft. Op de Nederrijn en de Lek ontstaan verschillen door het gemodelleerde stuwbeheer dat verschilt van de werkelijkheid en op de IJssel is een goede beschrijving van de laterale toestroming erg belangrijk. Bij extremere afvoeren neemt het belang van de modelaannames op deze punten af.

Transport formule

Bij de berekeningen is gebruik gemaakt van een door de gebruiker gedefinieerde transport formule. Deze transportformule is als volgt:

$$\phi = \frac{1}{1-\varepsilon} \beta_u (\mu\theta_s)^{\gamma_u} (\mu\theta_s - \theta_c)^{\alpha_u}$$

waarin \ddot{O} : dimensieloze sediment parameter (-),
 \dot{a} : poriën gehalte (-),
 \dot{i} : ribbelfactor(-),
 \dot{e}_s : shields parameter (-),
 \dot{Q}_u : coëfficiënt (-), (bij deze berekeningen: 8,0),
 \dot{Q}_d : coëfficiënt (-), (bij deze berekeningen: 0,0),
 \dot{e}_c : coëfficiënt (-), (bij deze berekeningen: 0,025),
 \dot{Q}_i : coëfficiënt (-), (bij deze berekeningen: 1,5).

Met deze formule is het mogelijk bepaalde termen van de transportformule zwaarder of lichter mee te laten wegen door andere coëfficiënten in te voeren. De meeste transportformules kunnen in deze vorm worden geschreven. Het sedimenttransport is vervolgens te berekenen met:

$$s = \sqrt{g \Delta_d D_r^3} \phi$$

waarin s : sedimenttransport per eenheid van breedte (m^2/s),
 g : gravitatieversnelling van de aarde (m/s^2),
 \dot{A}_d : $(\dot{r}_s - \dot{r}_w) / \dot{r}_w$: de relatieve dichtheid van het sediment (-),
 D_r : representatieve korreldiameter (m) (afhankelijk van de transportformule).

Morfologisch model

Het 1-D morfologische model is uitgebreid beschreven door Jesse (2001). De studie die in dit rapport wordt beschreven behelst de calibratie en validatie van versie 2000.3M1 van het model en heeft het huidige model dan ook als resultaat gehad.

Het model is gecalibreerd om zo goed mogelijk de bodemontwikkeling te beschrijven over de periode 1987-1997 en de sedimenttransporten tijdens het hoogwater van 1997 en 1998. Hierbij zijn de korrelgrootte, de sedimentverdeling over de splitsingspunten²¹ en de calibratiefactor²² van de transportformule als stuurvariabelen gebruikt.

²¹ De splitsingspuntverdeling werkt volgens de volgende formule:

$$\frac{S_1}{S_2} = \alpha \frac{Q_1}{Q_2} + b$$

Met deze formule wordt het sediment over de takken verdeeld aan de hand van de hydraulisch berekende debieten.

²² Met de calibratiefactor kan het sedimenttransport per tak worden beïnvloed. Met een factor kleiner dan 1 zal het sedimenttransport kleiner zijn en de erosie dus minder of de aanzanding meer.

Uit de calibratie blijkt dat het model het beste resultaat geeft wanneer:

- ♣ voor de bodemsamenstelling van het Nederlandse deel wordt uitgegaan van de bodemmonsters van 1976-1995 (5 km lopend gemiddelde);
- ♣ voor het Duitse deel gebruik wordt gemaakt van de korrelgrootte uit het Rijntakkenmodel van Termes e.a. (1998);
- ♣ voor de sedimenttransportvergelijking wordt gekozen voor de standaard Meyer-Peter & Muller vergelijking met een verlaagde kritische Shields-waarde;
- ♣ binnen SOBEK de volgende calibratiefactoren per tak worden aangehouden:

SOBEK Tak	factor
Bovenrijn	A=0.8
Nederrijn-Lek	A=0.8
IJssel (bovenstroomse deel)	A=0.6
IJssel (benedenstroomse deel)	A=0.8
Waal	A=0.8
Pannerdensch Kanaal	A=0.8
Keteldiep	A=0.8
Kattendiep	A=0.8

tabel 6.3 – calibratiefactoren voor het sedimenttransport

- ♣ voor de splitsingspuntverdelingen de volgende α -waarden worden aangehouden:

Splitsingspunt	factor
Pannerdensch Kop	$\alpha=3.0$
IJsselkop	$\alpha=1.5$
Keteldiep/Kattendiep	$\alpha=0.2$

tabel 6.4 – α -waarden bij de splitsingspuntverdelingen

De validatie van het model is uitgevoerd op bekende baggervolumes over de periode 1971-1997 en in tweede instantie op de trend in de afvoerdeling bij de OLR²³. Bij deze validatie blijkt dat het model voor de Waal en de IJssel goede prestaties levert en voor de Lek redelijk. Voor het traject Lobith – Pannerdensch Kop, voor het Pannerdensch Kanaal en voor de bovenstroomse delen van de Nederrijn en de IJssel levert het model echter slechte prestaties. Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt door een irreële voorstelling van de korrelgroottes in de bodem.

Uitgangspunten

Het aangeleverde model ging uit van de volgende punten:

- ♣ Hydraulisch model SOBEK-Rijn versie 2000.3 (Van der Veen, 2001)
- ♣ Morfologisch model Rijntakken 2001 (uniform sediment, Jesse e.a., 2001)
- ♣ Berekening van 1997 - 2097
- ♣ Hydraulische bovenrand: historische afvoerreeks van 16 jaar (1959-1974) met dagafvoeren, 6¼ keer herhaald
- ♣ Hydraulische benedenrand: Q-h relaties (Van der Veen, 2001)
- ♣ Morfologische bovenrand: constant bodemniveau in de tijd (ter plaatse van de Duitse plaats Ruhrort, km780)
- ♣ Inbouw 'vaste lagen': Nijmegen, St. Andries en Erlecom (bodemkribben)
- ♣ Alle laterale debieten gerelateerd aan de afvoer bij Lobith (relatie Van der Veen, 2001)
- ♣ Stuwaaansturing door middel van een hydraulische controller in plaats van een PID²⁴-controller
- ♣ Aanpassing vermenigvuldigingsfactoren sedimenttransport voor de takken Keteldiep en Kattendiep ter voorkoming afbreking morfologische berekening (t.o.v. het oorspronkelijke model)

²³ Overeengekomen Lage Rivierstand: Dit is de laagste waterstand in de rivier waarbij scheepvaart nog mogelijk moet zijn.

²⁴ Proportional-Integrating-Differential of Proportional-Integral-Derivative controller: Als gevolg van morfologische veranderingen kan de waterstand en daarmee het stuwbeheer veranderen. Dit soort effecten kan met een hydraulische controller niet worden meegenomen. Met een PID controller kan dit wel. Hiermee wordt de stuwstand zo gestuurd dat een opgelegde waterhoogte wordt gehandhaafd. Nadeel van deze controller is dat deze gevoeliger is voor veranderingen in de afvoer en een kleinere tijdstap noodzakelijk maakt. Ook moet er dan dynamisch in plaats van stationair worden gerekend, wat ook de rekentijd vergroot.

- ♣ Initiële waterstanden bepaald met behulp van de relatie van Van der Veen (2001)
- ♣ geen baggerwerkzaamheden
- ♣ geen zeespiegelstijging
- ♣ tijdstap morfologische berekeningen: 12 uur

6.2.3 Aanpassingen aan SOBEK-Rijn versie 2000.3M9

Om de simulatie mogelijk te maken zijn er verschillende aanpassingen gedaan aan het oorspronkelijke model. Deze aanpassingen zijn gecontroleerd met behulp van controle berekeningen.

Simulatieduur

In het aangepaste model is de simulatieperiode aangepast naar 1997 – 2497.

Laterale debieten

Ook zijn in verband met de rekentijd enkele laterale debieten verwijderd. Deze laterale debieten zijn slechts klein en kunnen daarom zonder al te veel problemen worden verwijderd.

De laterale debieten 'min.afvoer Nedrijn1', 'min.afvoer Nedrijn2', 'Kortsl Rhederlaag 1' en 'Kortsl Rhederlaag 2', zijn laten staan. De overige laterale debieten zijn verwijderd.

Tijdstap

In verband met de rekentijd is voor de meeste simulaties een grotere rekenstap aangehouden dan in het oorspronkelijke model. Uit de resultaten van een controle-berekening over 100 jaar blijkt de invloed van deze aanpassing vrij klein te zijn. Bij enkele simulaties bleek het echter niet mogelijk deze kleine tijdstap te gebruiken vanwege problemen met iteraties, voornamelijk bij de berekening voor de controllers van de stuwen. Daarom is ook geprobeerd deze controllers weg te halen en anders in te stellen.

Stuwen

Doordat de stuwen werden aangestuurd door hydraulische controllers treden hier vaak iteratieproblemen op. Om dit te verbeteren is geprobeerd de stuwen weg te laten en de controllers van de stuwen te verplaatsen naar de bovenstroomse randvoorwaarde. Bij deze tweede simulatie zijn de tabellen van de waterstanden en stuwhoogtes vervangen door tabellen van bovenstroomse debieten en stuwhoogtes. De relatie hiertussen is bepaald door resultaten van eerdere simulaties grafisch uit te zetten tegen de stuwhoogtes. Bij controle-berekeningen bleek echter dat er op langere termijn toch een verandering in de trend plaatsvindt door deze aanpassingen. Bij het simuleren van de cases zijn deze aanpassingen dan ook niet gebruikt.

Baggerwerkzaamheden

Bij het toepassen van de verschillende klimaatscenario's bleken verschillende dwarsdoorsneden van het model vol te lopen met zand. Ook waren er veranderingen in de bodemhelling te zien in de Waal en de IJssel.

Dit wordt niet waarschijnlijk geacht. Evenals in de morfologische studies Kroekenstoel (2001) en Sloff (1999) zijn er daarom "onderhoudsbaggerwerkzaamheden" toegevoegd waardoor het model meer realistische uitkomsten geeft. Deze baggerwerkzaamheden zijn zo gekozen dat de ligging van de bodem zo lang mogelijk gelijk blijft. Hiertoe zijn 7 verschillende simulaties uitgevoerd waarbij de baggerhoeveelheden steeds zijn aangepast. De waarden van de simulatie waarbij de oplossing het minst veranderde zijn gekozen als "onderhoudsbaggerwerkzaamheden". Deze waarden zijn in tabel 6.5 te zien.

tak	traject (Rijn km)	hoeveelheid (* 10 ⁻⁷) (m ² /s)
Waal 2	939.03 – 946.66	-14.3226
Waal 2	946.66 – 955.70	-7.16130
Waal 2	955.70 – 961.00	-3.58065
Pannerdensch Kanaal	867.06 – 878.59	+1.47523
Nederrijn	878.59 – 929.00	-0.409931
Lek 1	929.00 – 947.36	-0.409931
Lek 2	947.36 – 988.58	-0.409931
IJssel 1	878.59 – 957.10	-0.0660869
IJssel 2	957.10 – 1001.14	-0.0660869
Keteldiep	1001.14 – 1002.24	-3.53728
Kattediep	1001.14 – 1002.23	+8.52029

tabel 6.5 – overzicht van toegevoegde baggerwerkzaamheden

Randvoorwaarden

Afvoerreeks

Om eenvoudig afvoerreeksen te kunnen maken bij de verschillende klimaatscenario's is een hulpprogramma gemaakt. In het programma moeten de volgende waarden worden ingevuld:

- ♣ de oorspronkelijke afvoerreeks
- ♣ een tijdreeks van veranderende zomerafvoeren
- ♣ een tijdreeks van veranderende winterafvoeren
- ♣ per maand een vermenigvuldigingsfactor voor de verandering in die maand

Het programma berekent vervolgens een nieuwe afvoerreeks, hierbij is gebruik gemaakt van de volgende formule:

$$Q_n = Q_0 * f_{scenario} * f_{maand}$$

hierbij is: Q_n : het nieuwe debiet
 Q_0 : het debiet uit de oorspronkelijke afvoerreeks
 $f_{scenario}$: de factor horend bij het klimaatscenario
 f_{maand} : de maandfactor

Het programma bepaalt voor elke waarde in de nieuwe afvoerreeks of de scenario-factor moet worden bepaald uit de tijdreeks van zomerafvoeren of de tijdreeks van winterafvoeren. De nieuwe afvoerreeks wordt vervolgens uitgevoerd naar een tekstbestand, zodat deze kan worden ingelezen in SOBEK. In bijlagen B.4 is een grafiek van de oorspronkelijke afvoerreeks en scenario's S1W1, S2W3 en S3W6 te vinden. Voor elk klimaatscenario is een nieuwe afvoerreeks van 500 jaar gemaakt. De afvoerreeks is ingevoerd als een reeks, afhankelijk van de tijd.

10 dagen gemiddelde

De afvoerreeks is vervangen door een 10 dagen-gemiddelde afvoerreeks. Wanneer de dagelijkse afvoerreeks als invoer wordt gebruikt is de lijst met waarden namelijk te groot voor SOBEK. Er kunnen geen 182.500 waarden worden ingevoerd.

"vierkante afvoer"

Er is gekeken naar de afvoerschematisatie zoals die momenteel door Hanneke van der Klis bij WLIDelft Hydraulics wordt onderzocht. Hierbij worden de pieken van de afvoerreeks afgevlakt door ze te vervangen met rechthoeken. Het idee van deze schematisatie is dat, door de constante afvoer over enkele rekenstappen, het aantal iteraties bij de hydraulische berekeningen afneemt en dus ook de rekentijd afneemt. Bovendien blijft de afvoerreeks dan, ook met klimaatveranderingen in het gecalibreerde gebied.

Om eenvoudig deze nieuwe reeksen te kunnen genereren is hier ook een hulpprogramma voor gemaakt.

Bij de controle-berekeningen bleek echter dat het model niet stabiel genoeg is om de grote sprongen in de afvoerreeks die door de schematisatie worden gecreëerd te kunnen verwerken. Ook wanneer een kleinere tijdstap

werd gekozen, bleef dit probleem bestaan. Bij minder complexe modellen is de schematisatie waarschijnlijk wel goed te gebruiken.

Zeespiegel

De benedenstroomse randvoorwaarde is in het oorspronkelijke model gegeven door een relatie tussen het debiet en het waterniveau op de 4 knooppunten Werkendam, Krimpen a/d Lek, het Keteldiep en het Kattendiep. Door verandering van de zeespiegel, verandert deze Q-h relatie. Er zijn echter geen eenduidige relaties tussen de verandering van deze Q-h relaties en de veranderende zeespiegel. Bovendien is het in SOBEK niet mogelijk een Q-h relatie op te geven die verandert in de tijd. De enige manier om een veranderende zeespiegel in te kunnen voeren is door een tijdreeks in te voeren van de waterstand op de benedenstroomse randen.

Deze tijdreeks is als volgt bepaald:

1. met de oorspronkelijke Q-h tabel van het model is een relatie bepaald tussen het debiet bij een benedenstroomse rand en de waterstand.
2. door voor elk klimaatscenario een simulatie uit te voeren zonder veranderende zeespiegel zijn de debieten bepaald die bij de klimaatscenario's optreden op de benedenstroomse punten.
3. met behulp van een Q-h relatie die is gemaakt voor de spankrachtstudie (Jesse, 2001) voor een zeespiegelstijging van 0,60 m is er een relatie bepaald voor de invloedsfactor van de veranderende zeespiegel op de waterstanden bij de verschillende benedenstroomse randen bij verschillende debieten.
4. de nieuwe waterstand is bepaald door bij de waterstand behorende bij de debieten volgend uit de eerdere simulaties de zeespiegelstijging vermenigvuldigd met de invloedsfactor op te tellen.

Met behulp van een schatter voor het debiet is dus een waterstand bepaald. Bij deze waterstand is de zeespiegelstijging opgeteld en de nieuwe waterstand is – als functie van de tijd – als nieuwe randvoorwaarde ingevoerd.

De relaties tussen de verschillende parameters zijn bepaald door een curve-fitter toe te passen op de verschillende tabellen.

Hoewel deze werkwijze zeer onnauwkeurig is, de debieten worden immers sterk beïnvloed door de waterstand, is het de enige manier om toch een veranderende zeespiegel in te kunnen voeren. In plaats van een Q-h relatie wordt er nu dus van een "relatie" tussen de waterstand en het debiet en de zeespiegelstijging gebruik gemaakt. Deze "relatie" wordt ingevoerd als reeks, afhankelijk van de tijd.

Sediment

De randvoorwaarde voor het sediment is bepaald door een vast bodemniveau aan de bovenstroomse rand, bij Ruhrort, aan te nemen. Deze randvoorwaarde is niet aangepast.

6.3 Rekengevallen

In dit hoofdstuk zal worden besproken welke rekengevallen er zullen worden uitgevoerd. Er zijn verschillende series van berekeningen gedaan.

De eerste serie berekeningen is gedaan om te controleren of de vereenvoudigingen aan het model niet een te groot morfologisch effect hebben op de lange termijn resultaten.

De tweede serie berekeningen is de set met referentieberekeningen. Bij deze berekeningen is voor elk scenario de situatie doorgerekend zonder maatregelen.

In de derde serie is vervolgens voor elke maatregel een simulatie gedaan met verschillende klimaatscenario's. Deze simulaties worden vergeleken met de referentieset zodat per maatregel de invloed van de klimaatverandering kan worden bekeken.

Vanwege het ontbreken van de modellen in SOBEK is ervoor gekozen niet alle maatregelen te modelleren. Voor de maatregelen moeten namelijk nieuwe modellen worden gemaakt. In paragraaf 5.7 "Berekeningen met maatregelen" is reeds besproken welke maatregelen wel en welke maatregelen niet zijn gesimuleerd

6.3.1 Controle berekeningen

Voor de verschillende aanpassingen zijn de volgende controleberekeningen uitgevoerd. In paragraaf 6.2 "Model" is al uitgelegd waarom deze berekeningen zijn gedaan.

100 jaar:

naam	omschrijving
CON100ORG	berekening origineel model
CON100NLAT0	berekening zonder laterale debieten
CON100STR0	berekening zonder stuwen
CON100STRQH	berekening met stuwen met controllers afhankelijk van het debiet op de Bovenrijn
CON100Q10DGEM	berekening met 10 dagen gemiddelde afvoerreeks
CON100Q10DTREK	berekening met 10 dagen trekking uit oorspronkelijke afvoerreeks
CON100T10	berekening met 10 dagen tijdstap
CON100TOTAAL	berekening met 10 dagen tijdstap, zonder laterale debieten, met 10 dagen gemiddelde afvoerreeks

tabel 6.6 – overzicht van de controle berekeningen van 100 jaar

500 jaar:

naam	omschrijving
CON500Q10DGEM	berekening met 10 dagen gemiddelde afvoerreeks
CON500BAGn	berekening met n maal aangepaste baggerwerkzaamheden

tabel 6.7 – overzicht van de controle berekeningen van 100 jaar

In de bijlage D zijn enkele grafieken van deze controle berekeningen te vinden.

6.3.2 Referentieberekeningen

Bij de referentieberekeningen is voor elk klimaatscenario een simulatie gedaan zonder maatregelen. Deze simulaties zullen in het vervolg als volgt worden aangeduid.

naam	omschrijving
REFS0W0	referentieberekening bij scenario S0W0
REFS1W1	referentieberekening bij scenario S1W1
REFS1W2	referentieberekening bij scenario S1W2
REFS2W3	referentieberekening bij scenario S2W3
REFS2W4	referentieberekening bij scenario S2W4
REFS3W5	referentieberekening bij scenario S3W5
REFS3W6	referentieberekening bij scenario S3W6

tabel 6.8 – overzicht van de referentieberekeningen

Voor de beschrijvingen van de verschillende scenario's wordt verwezen naar paragraaf 4.5 'Gebruikte scenario's'.

6.3.3 Maatregelen

De volgende maatregelen zijn in paragraaf 5.7 'Berekeningen met maatregelen' reeds geselecteerd om simulaties van te doen;

- ♣ grootschalige uiterwaardverlaging, variant 1
- ♣ grootschalige uiterwaardverlaging, variant 2
- ♣ zomerbedverlaging
- ♣ verwijderen hydraulisch knelpunt Lexkesveer

Hieronder zal worden uitgelegd op welke wijze deze maatregelen in het model zijn toegepast.

grootschalige uiterwaardverlaging, variant 1

Deze maatregel is in het model verwerkt door per tak een gemiddelde uiterwaardverlaging te berekenen met behulp van de lijst van maatregelen die onder de "Aanvullende Maatregelen 1"²⁵. In de tabel hieronder staan de waarden die op deze manier zijn berekend. Deze waarden zijn gebruikt om het 'Floodplain base level' van de cross-sections, die binnen deze verzameling van maatregelen vallen, van de takken te veranderen. Bij deze variant waren dit 637 van de 769 cross-sections.

²⁵ Deze lijst komt uit RIZA (1999), 'Screening Maatregelen'

tak	uiterwaardverlaging (m)	traject (Rijn km)
Bovenrijn	-1.49	857.70 – 867.06
Waal 1 / Waal 2	-1.47	867.06 – 954.96
Pannerdensch Kanaal	-1.88	867.06 – 878.59
Nederrijn / Lek 1 / Lek 2	-1.12	878.59 – 969.45
IJssel 1 / IJssel 2 / Keteldiep / Kattediep	-1.47	878.59 – 1006.60
gemiddeld	-1.15	

tabel 6.9 – verandering van floodplain base level voor maatregel “grootschalige uiterwaardverlaging 1”

In de bijlage E is een lijst te vinden met de waarden die bij deze maatregelen horen.

grootschalige uiterwaardverlaging, variant 2

Deze variant is op dezelfde manier geïmplementeerd als de eerste variant. In plaats van de waarden van de “Aanvullende Maatregelen 1” zijn echter de waarden van de “Aanvullende Maatregelen 2”²⁵ gebruikt. Bij deze variant zijn 633 cross-sections aangepast. Hiermee zijn de volgende waarden berekend.

tak	uiterwaardverlaging (m)	traject (Rijn km)
Bovenrijn	-2.19	857.70 – 867.06
Waal 1 / Waal 2	-2.30	867.06 – 952.73
Pannerdensch Kanaal	-2.82	867.06 – 878.59
Nederrijn / Lek 1 / Lek 2	-1.67	878.59 – 969.45
IJssel 1 / IJssel 2 / Keteldiep / Kattediep	-1.92	878.59 – 1006.60
gemiddeld	-1.64	

tabel 6.10 – verandering van floodplain base level voor maatregel “grootschalige uiterwaardverlaging 2”

In de bijlage F is een lijst te vinden met de waarden die bij deze maatregelen horen.

zomerbedverlaging

Ook de zomerbedverlaging is in het model verwerkt met behulp van een lijst van RIZA (1999). Het deel van het profiel van de cross-sections binnen deze trajecten dat in het zomerbed valt, is verlaagd met 1 meter. Voor deze maatregel zijn 177 cross-sections aangepast.

tak	zomerbedverlaging (m)	traject (Rijn km)
Waal 2	-1.00	914.77 – 953.00
Lek 1	-1.00	946.74 – 969.58
IJssel 2	-1.00	979.78 – 1006.00

tabel 6.11 – verandering van zomerbed voor maatregel “zomerbedverlaging”

verwijderen hydraulisch knelpunt Lexkesveer

Bij deze maatregel is slecht één hydraulisch knelpunt verwijderd, in tegenstelling tot de maatregel van het Ruimte voor Rijntakken project. Het verwijderen van dit knelpunt is gedaan door de “extra wrijvingselementen” “Veerstoep Lexkesveer1” en “Veerstoep Lexkesveer 2” te verwijderen.

6.3.4 Uitgangspunten

In tabel 6.12 zijn kort nog de uitgangspunten vermeld die bij de simulaties van de verschillende cases zijn gehanteerd.

bovenstroomse hydraulische randvoorwaarde	afhankelijk van het klimaatscenario zijn verschillende tijdreeksen gebruikt
benedenstroomse randvoorwaarde	afhankelijk van het klimaatscenario en een simulatie met de oorspronkelijke randvoorwaarde is voor elke simulatie een nieuwe tijdreeks gemaakt
beginvoorwaarde bodemligging laterale debieten	afhankelijk van de case is een bodemligging ingevoerd voor alle cases zijn de laterale debieten gebruikt zoals die in paragraaf 6.2.4 zijn beschreven
structures	voor alle cases zijn de oorspronkelijke controllers van de structures gebruikt
baggeren	voor alle cases zijn de baggerwerkzaamheden gebruikt zoals beschreven in paragraaf 6.2.4
simulatieduur	alle cases zijn gestart met als simulatieduur 500 jaar, veel cases hebben echter de 500 jaar niet vol kunnen maken als gevolg van stabiliteitproblemen
tijdstap	als tijdstap is voor alle simulaties 10 dagen gebruikt

tabel 6.12 – uitgangspunten bij de uitgevoerde simulaties

6.3.5 Overzicht

In de tabel hieronder staan alle simulaties van de maatregelen met de klimaatscenario's nog eens genoemd.

klimaatscenario	referentiecasse	grootschalige uiterwaardverlaging 1	grootschalige uiterwaardverlaging 2	verwijderen hydraulisch knelpunt Lexkesveer	zomerbedverlaging
S0W0	REFS0W0	UV1S0W0	UV2S0W0	HYDS0W0	ZOMS0W0
S1W1	REFS1W1	UV1S1W1	UV2S1W1	HYDS1W1	ZOMS1W1
S1W2	REFS1W2	UV1S1W2	UV2S1W2	HYDS1W2	ZOMS1W2
S2W3	REFS2W3	UV1S2W3	UV2S2W3	HYDS2W3	ZOMS2W3
S2W4	REFS2W4	UV1S2W4	UV2S2W4	HYDS2W4	ZOMS2W4
S3W5	REFS3W5	UV1S3W5	UV2S3W5	HYDS3W5	ZOMS3W5
S3W6	REFS3W6	UV1S3W6	UV2S3W6	HYDS3W6	ZOMS3W6

tabel 6.13 – overzicht van de uitgevoerde simulaties

7 Resultaten

7.1 Inleiding

Van alle berekeningen zijn in de bijlagen G en H de grafieken nogmaals te vinden, maar dan groter uitgeprint. Om de variatie binnen de tijdreeks van de afvoer, van 16 jaar, uit te middelen, zijn van alle resultaten, voordat hier grafieken van zijn gemaakt, de 16-jaar-gemiddelde waarden gebruikt. Niet alle berekeningen hebben tot het einde van de simulatieperiode gelopen. Veel simulaties zijn voortijdig gestopt. In de onderstaande tabel staan de data waarop de laatste maal bij de berekeningen waarden zijn uitgevoerd. De oorspronkelijke simulatieperiode is van 1 januari 1997 tot 1 januari 2497. Doordat de uitvoer om de 60 dagen gebeurt, hebben ook de simulaties die wel tot het eind hebben gelopen een andere datum.

simulatie	laatste uitvoer op	foutmelding (indien van toepassing)
REFS0W0	30-12-2496	
REFS1W1	30-12-2496	
REFS1W2	30-12-2496	
REFS2W3	27-02-2484	'Levels not in increasing order after adapting cross sections at Waal_2_21967''
REFS2W4	28-05-2440	'Levels not in increasing order after adapting cross sections at Waal_2_21967''
REFS3W5	01-03-2228	'Levels not in increasing order after adapting cross sections at Waal_2_21967''
REFS3W6	20-02-2228	'Levels not in increasing order after adapting cross sections at Waal_2_21967''
UV1S0W0	30-12-2496	
UV1S1W1	30-12-2496	
UV1S1W2	30-12-2496	
UV1S2W3	27-02-2484	'Levels not in increasing order after adapting cross sections at Waal_2_16975''
UV1S2W4	28-05-2440	'Levels not in increasing order after adapting cross sections at Waal_2_16975''
UV1S3W5	01-03-2228	'Levels not in increasing order after adapting cross sections at Waal_2_16975''
UV1S3W6	20-02-2228	'Levels not in increasing order after adapting cross sections at Waal_2_16975''
UV2S0W0	30-12-2496	
UV2S1W1	30-12-2496	
UV2S1W2	30-12-2496	
UV2S2W3	27-02-2484	'Levels not in increasing order after adapting cross sections at Waal_2_16975''
UV2S2W4	28-05-2440	'Levels not in increasing order after adapting cross sections at Waal_2_16975''
UV2S3W5	01-03-2228	'Levels not in increasing order after adapting cross sections at Waal_2_16975''
UV2S3W6	20-02-2228	'Levels not in increasing order after adapting cross sections at Waal_2_16975''
HYDS0W0	30-12-2496	
HYDS1W1	30-12-2496	
HYDS1W2	30-12-2496	
HYDS2W3	30-03-2064	'Froude number too large (1,48) in branch Kattedi ep at X = 882''
HYDS2W4	28-05-2440	'Levels not in increasing order after adapting cross sections at Waal_2_21967''
HYDS3W5	01-03-2228	'Levels not in increasing order after adapting cross sections at Waal_2_21967''
HYDS3W6	20-02-2228	'Levels not in increasing order after adapting cross sections at Waal_2_21967''
ZOMS0W0	30-12-2496	
ZOMS1W1	30-12-2496	
ZOMS1W2	15-03-2045	'Water level < bottom at Nederryn X = 12540''
ZOMS2W3	30-05-2392	'Levels not in increasing order after adapting cross sections at Waal_2_21967''
ZOMS2W4	18-01-2324	'Levels not in increasing order after adapting cross sections at Waal_2_16975''
ZOMS3W5	16-01-2164	'Levels not in increasing order after adapting cross sections at Waal_2_16975''
ZOMS3W6	14-01-2132	'Levels not in increasing order after adapting cross sections at Waal_2_16975''

tabel 7.1 – overzicht duur simulaties

Van de foutgelopen simulaties hebben de meeste de melding 'Levels not in increasing order after adapting cross sections at ...'. Dit betekent dat het niveau van het zomerbed boven het niveau van de uiterwaarden uitkomt. Dit wordt veroorzaakt door de lokale geometrie. Wanneer er na een relatief nauwe doorsnede een grotere doorsnede volgt, zal de stroomsnelheid sterk afnemen. Hierdoor vindt er in het zomerbed een grote sedimentatie plaats. Bij extreme waarden kan het voorkomen dat deze sedimentatie te groot is voor het model en komt de bodem van het zomerbed hoger te liggen dan de uiterwaarden. Het model begrijpt dit niet en stopt dan met rekenen.

Wanneer wordt gekeken naar de locaties waarop deze foutmeldingen voorkomen, is te zien dat er bij deze locaties een winningput of een vergelijkbaar meer langs de rivier ligt.

De referentieberekeningen (dus zonder maatregelen) zijn bekeken door het effect van de veranderde randvoorwaarden te bepalen. Dit is gedaan door de resultaten van de berekening zonder klimaatverandering van de resultaten van de berekening met klimaatverandering af te trekken. Bij de cases met maatregelen is eerst gekeken naar het effect van de maatregel. Daarna is gekeken naar het verschil in effect wanneer de veranderde randvoorwaarden worden toegevoegd. De vergelijkingen worden dus niet gemaakt met de huidige situatie, maar met de situatie zonder maatregel, met het veranderde klimaat.

Bij de berekeningen is de klimaatverandering ingevoerd door de randvoorwaarden afvoer en zeespiegel te veranderen. Wanneer bij de bespreking van de resultaten van de berekeningen wordt over ‘klimaatverandering’ wordt gesproken, wordt daarmee bedoeld ‘verandering van de afvoer en de zeespiegel’.

7.2 Controle-berekeningen

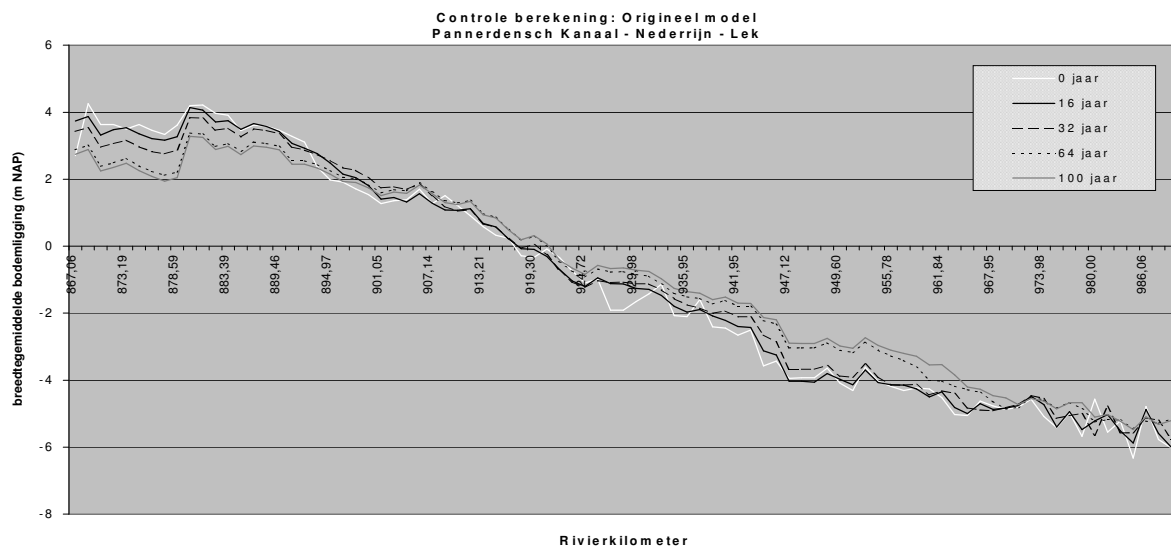
De controle-berekeningen zijn gedaan om te controleren of de toegepaste aanpassingen aan het model toepasbaar zijn, zonder dat dit teveel onnauwkeurigheid met zich meebrengt.

De resultaten van de controle-berekeningen worden besproken door de resultaten van de simulatie zonder aanpassing van de resultaten af te trekken. Op deze manier wordt het effect van de aanpassing zichtbaar. De meeste controle-berekeningen zijn gedaan op het model bij een simulatieperiode van 100 jaar.

Bij alle berekeningen wordt alleen het deel ‘Pannerdensch Kanaal –Nederrijn – Lek’ besproken. Grafieken van de overige takken zijn in de bijlagen terug te vinden.

In bijlage D "Controle berekeningen", zijn de grafieken van alle takken te vinden.

7.2.1 Origineel model, zonder aanpassingen, 100 jaar



figuur 7.1 – De breedtegemiddelde bodemligging zoals die door het originele model wordt berekend over 100 jaar.

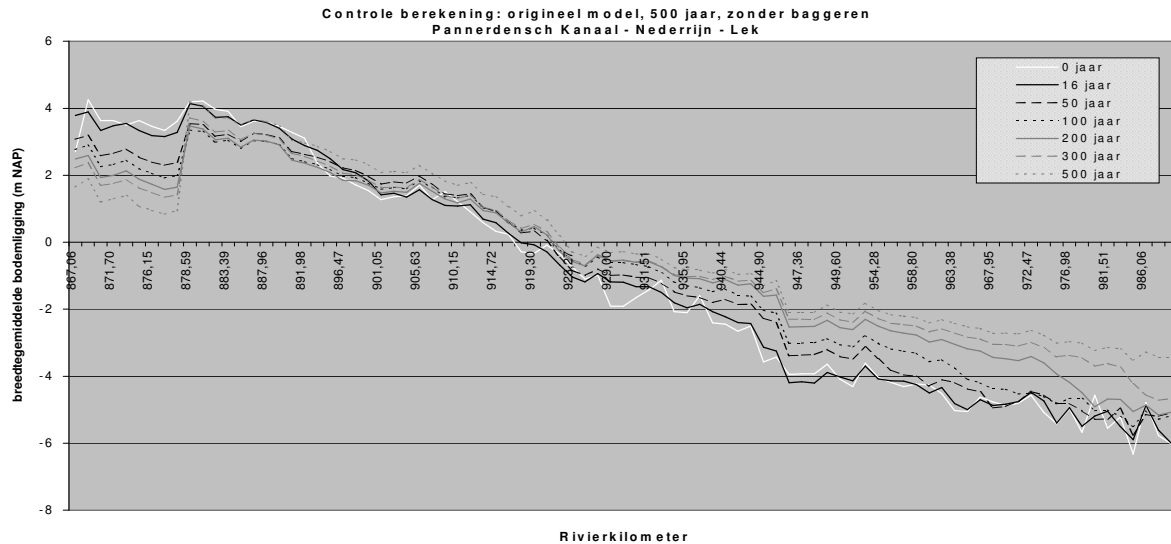
Hierin is een lichte kanteling te zien, de helling in deze takken wordt kleiner

7.2.2 Origineel model, zonder aanpassingen, 500 jaar

Wanneer een langere berekening, van 500 jaar wordt bekeken, is te zien dat deze trend zich, ook na de eerste 100 jaar nog voort zal zetten (figuur 7.2).

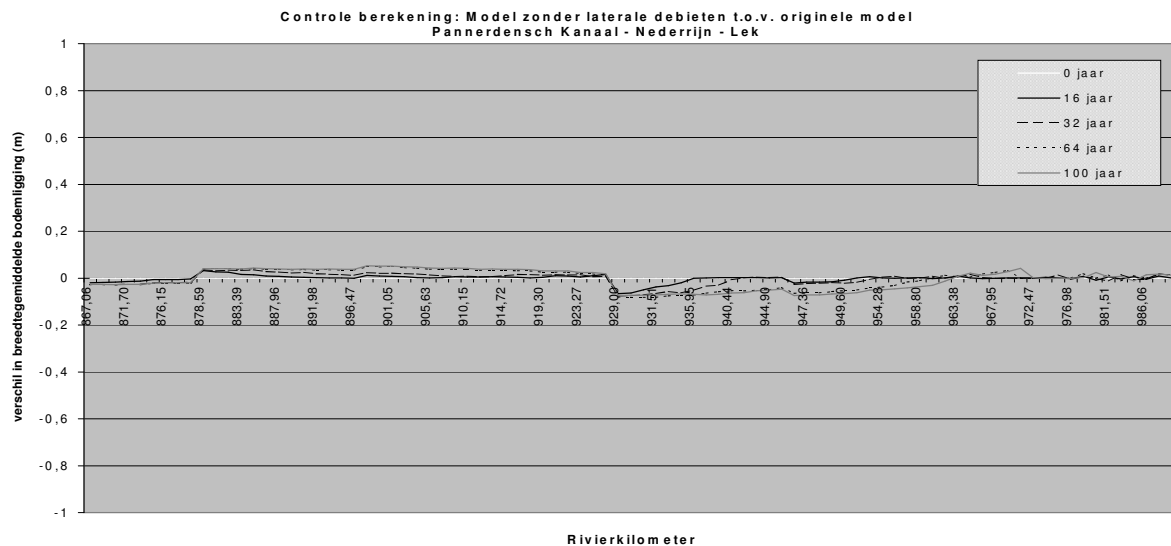
Om deze berekening te kunnen doen zijn de volgende aanpassingen al toegepast:

- ♣ 10 dagen tijdstap
- ♣ verwijderen laterale debieten
- ♣ 10 dagen-gemiddelde afvoerreeks



figuur 7.2 – De breedtegemiddelde bodemligging zoals die door het model wordt berekend over 500 jaar, wanneer enkele aanpassingen zijn gedaan, zonder onderhoudsbaggerwerkzaamheden.

7.2.3 Zonder laterale debieten



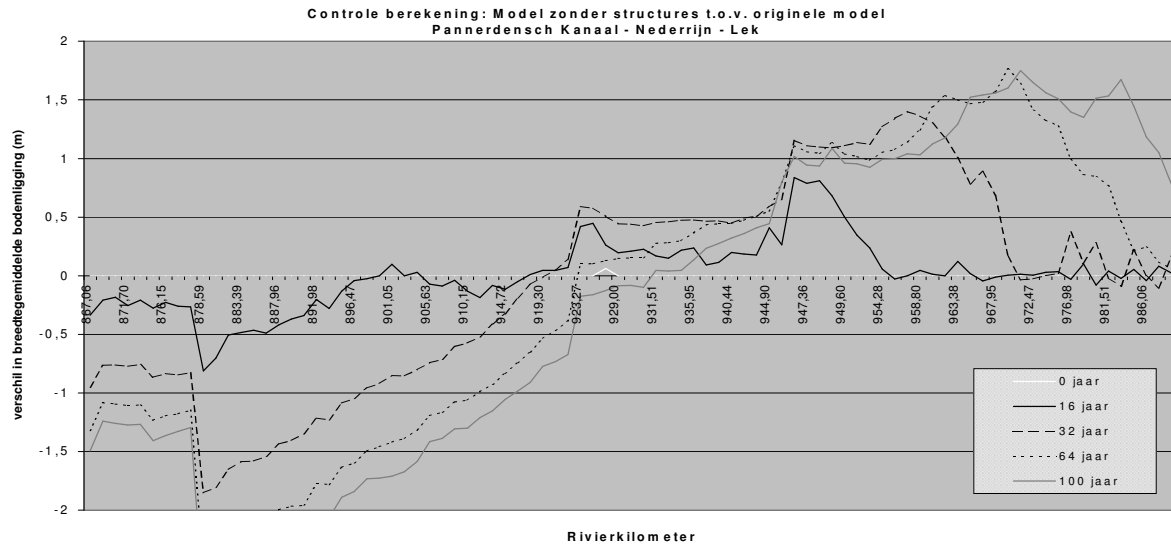
figuur 7.3 – De breedtegemiddelde bodemligging zoals die door het model wordt berekend over 100 jaar, wanneer de laterale debieten uit het model zijn gehaald, ten opzichte van het originele model.

De veranderingen door deze aanpassing zijn klein, de vereenvoudiging is daarom toelaatbaar.

7.2.4 Zonder stuwen

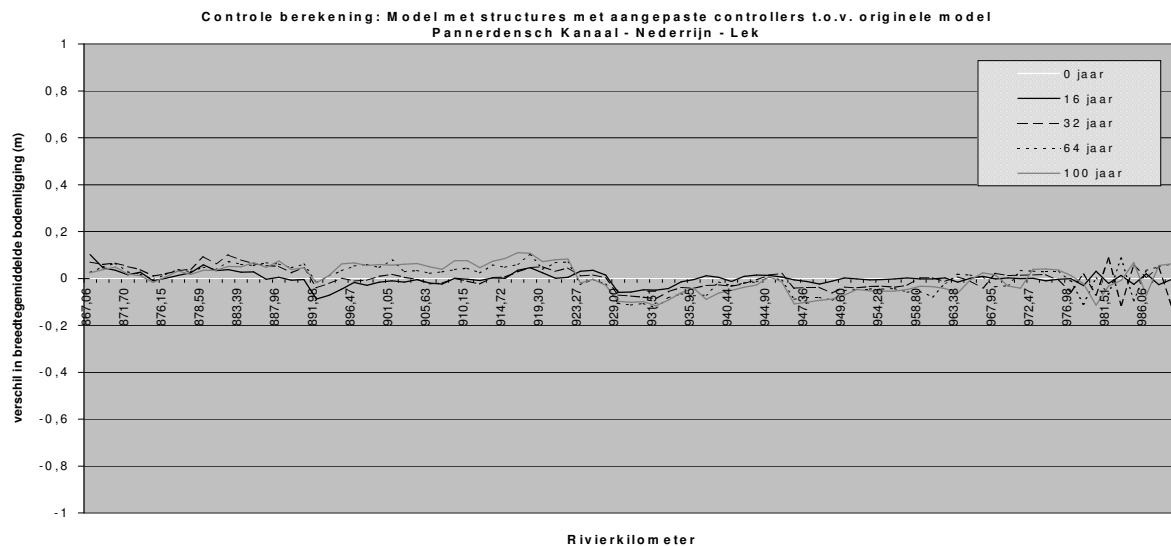
In verband met convergentieproblemen van de hydraulische berekening is geprobeerd de stuwen uit het model te verwijderen. Door deze aanpassing wordt de bodem echter ernstig verstoord (figuur 7.4), wat zeer waarschijnlijk van invloed is op de morfologie in de rest van de rivier. Deze aanpassing kan dus niet ongestraft plaatsvinden.

De laterale debieten zijn voor deze berekening al verwijderd.



figuur 7.4 – De breedtegemiddelde bodemligging zoals die door het model wordt berekend over 100 jaar, wanneer de stuwen uit het model zijn gehaald, ten opzichte van het originele model.

7.2.5 Met stuwen, afhankelijk van het debiet op de Bovenrijn



figuur 7.5 – De breedtegemiddelde bodemligging zoals die door het model wordt berekend over 100 jaar, wanneer de stuwen worden gecontroleerd door het debiet op de Bovenrijn, ten opzichte van het originele model.

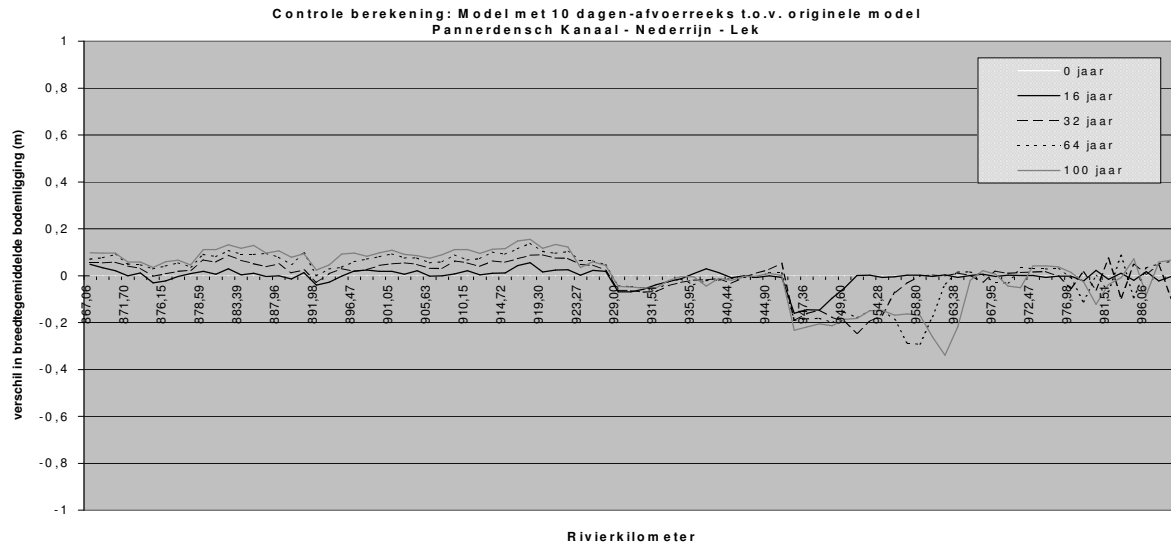
Een tweede poging om de controllers van de stuwen te veranderen naar het debiet in de Bovenrijn is wel geslaagd. De convergentieproblemen bleken hierdoor echter niet voldoende te verminderen. Deze aanpassing is dus uiteindelijk niet gebruikt.

De laterale debieten zijn voor deze berekening al verwijderd.

7.2.6 Met 10 dagen-gemiddelde afvoerreeks, 100 jaar

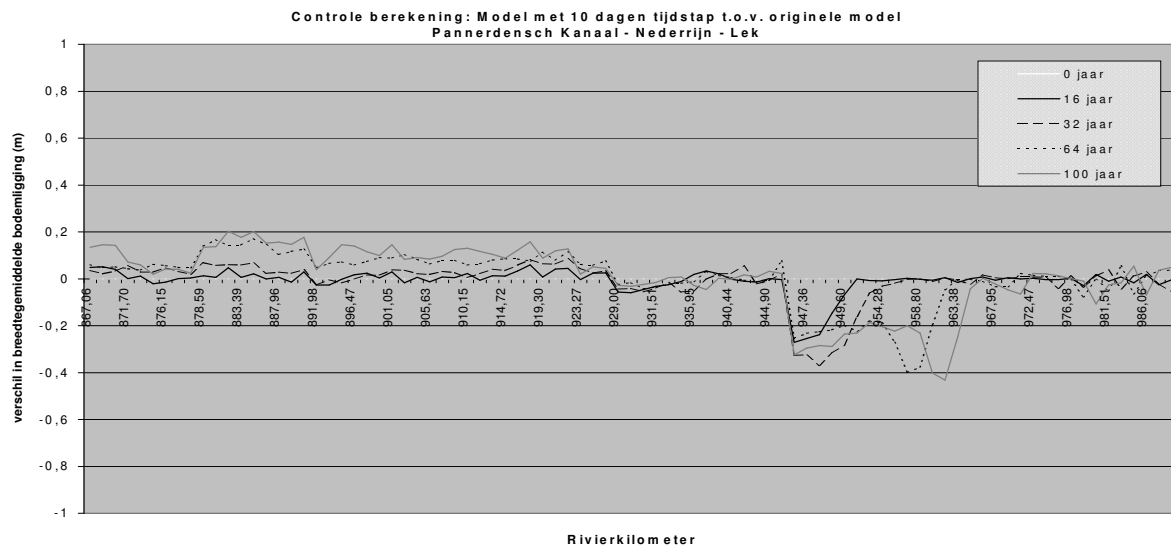
Om een afvoerreeks in te kunnen voeren van 500 jaar, is het nodig de bestaande afvoerreeks aan te passen. Uit de resultaten van de controle berekening, blijkt dat deze, niet veel afwijken van de berekeningen van model met een dagelijkse afvoer (figuur 7.6).

Bij deze berekening is gebruik gemaakt van een 10 dagen tijdstap, de laterale debieten waren ook voor deze berekening al verwijderd.



figuur 7.6 – De breedtegemiddelde bodemligging zoals die door het model wordt berekend, bij een 10 dagen-gemiddelde afvoer.

7.2.7 Met 10 dagen tijdstap

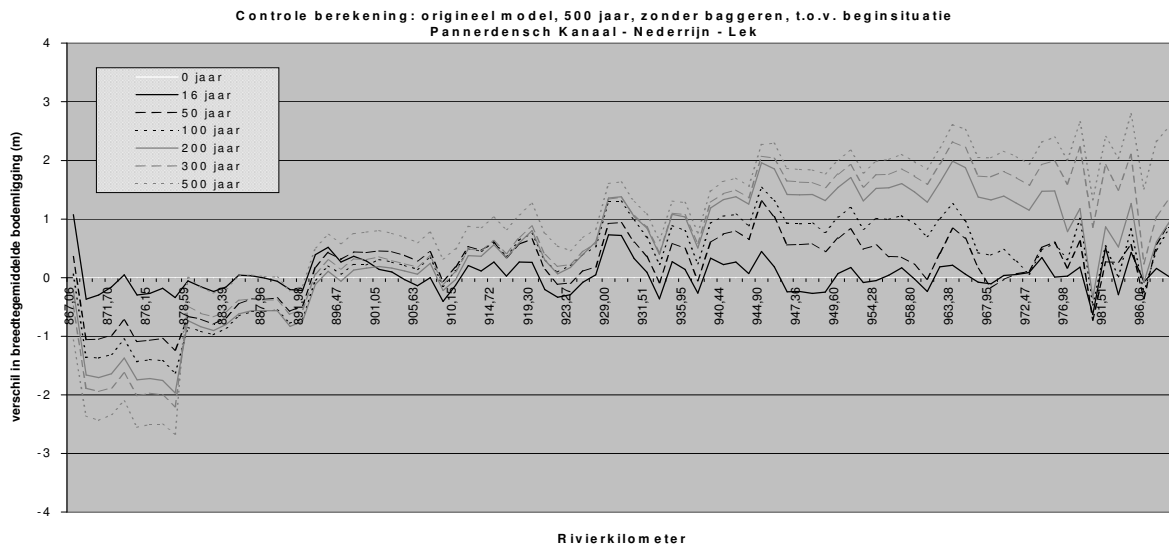


figuur 7.7 – De breedtegemiddelde bodemligging zoals die door het model wordt berekend, bij een 10 dagen tijdstap.

Om de rekentijd te verkorten is de tijdstap van de berekeningen veranderd naar 10 dagen in plaats van 12 uur, voor morfologische berekeningen is deze tijdstap ook gebruikelijker. Uit de controle berekening blijkt dat de resultaten lokaal licht afwijken van die van het originele model. Vanwege het lange-termijn-karakter van de simulaties is de aanpassing echter wel noodzakelijk en geen onoverkomelijk probleem.

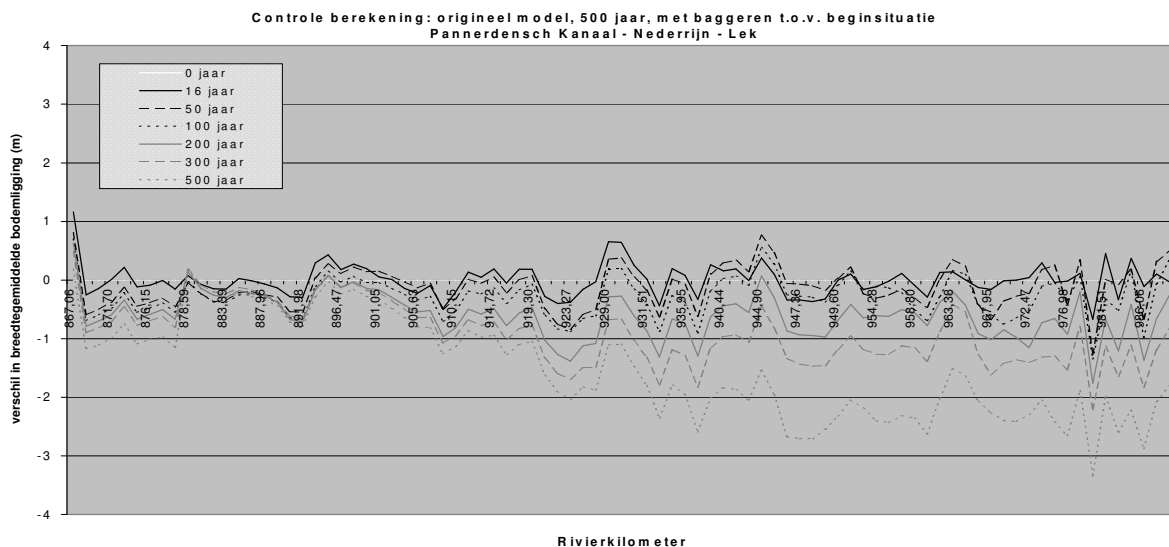
De laterale debieten zijn voor deze berekening al verwijderd.

7.2.8 Baggerwerkzaamheden²⁶, 500 jaar



figuur 7.8 – De breedtegemiddelde bodemligging zoals die door het model wordt berekend over 500 jaar, wanneer enkele aanpassingen zijn gedaan, ten opzichte van het originele model, zonder onderhoudsbaggerwerkzaamheden.

Wanneer de aanpassingen bij een simulatieperiode van 500 jaar worden gedaan, is te zien dat de bodem van de verschillende takken nog verandert (figuur 7.8). Om dit tegen te gaan zijn onderhoudsbaggerwerkzaamheden toegevoegd. Na deze aanpassing verandert de bodem minder snel (figuur 7.9).



figuur 7.9 – De breedtegemiddelde bodemligging zoals die door het model wordt berekend over 500 jaar, wanneer enkele aanpassingen zijn gedaan, ten opzichte van het originele model, met onderhoudsbaggerwerkzaamheden.

Door de baggerwerkzaamheden wordt niet alleen de bodem in de verschillende takken rechtstreeks beïnvloed, door de veranderingen verandert ook de afvoer- en sedimentverdeling, wat vervolgens weer invloed heeft op de bodem in de verschillende takken

In de volgende paragraaf zullen nog enkele gevolgen van het baggeren aan bod komen wanneer de referentieberekeningen worden besproken.

7.3 Referentie-berekeningen

De referentieberekeningen zijn de berekeningen die zijn gedaan zonder maatregelen. Bij de eerste referentieberekening is uitgegaan van het klimaatscenario zonder verandering. Uit de resultaten hiervan blijkt dat

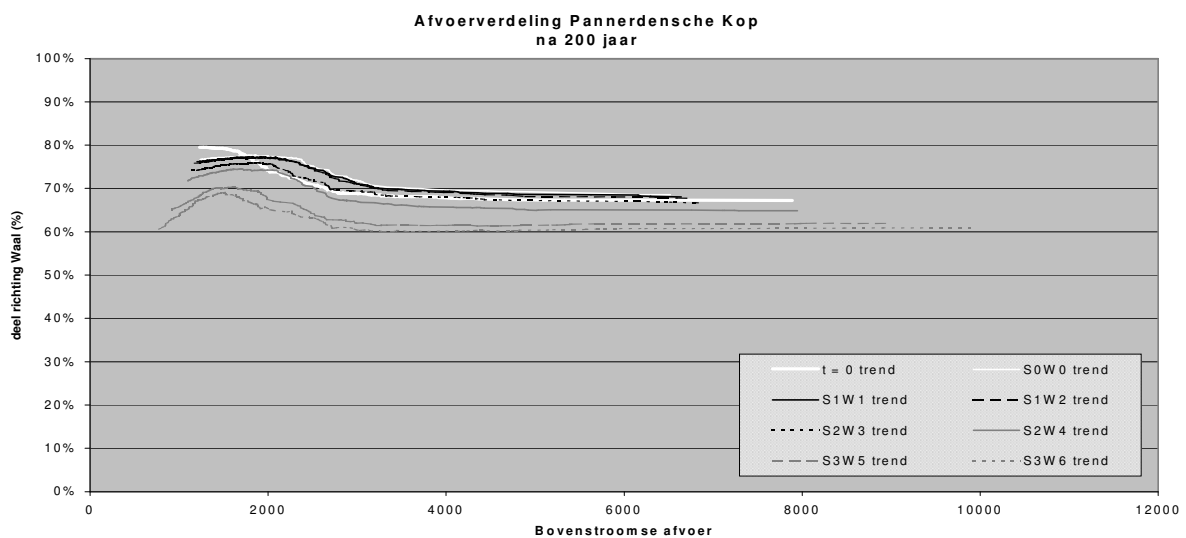
²⁶ zie ook paragraaf 6.2.4, “Aanpassingen aan SOBEK -Rijn versie 2000.3M9”

met de originele afvoer en zeespiegel de bodem slechts licht verandert, mede dankzij de toegevoegde "onderhoudsbaggerwerkzaamheden". Bij de referentieberekeningen zijn (evenals bij de berekeningen met maatregelen) de volgende aanpassingen gebruikt:

- ♣ verwijderen laterale debieten
- ♣ 10 dagen tijdstap
- ♣ 10 dagen-gemiddelde afvoerreeks
- ♣ onderhoudsbaggerwerkzaamheden

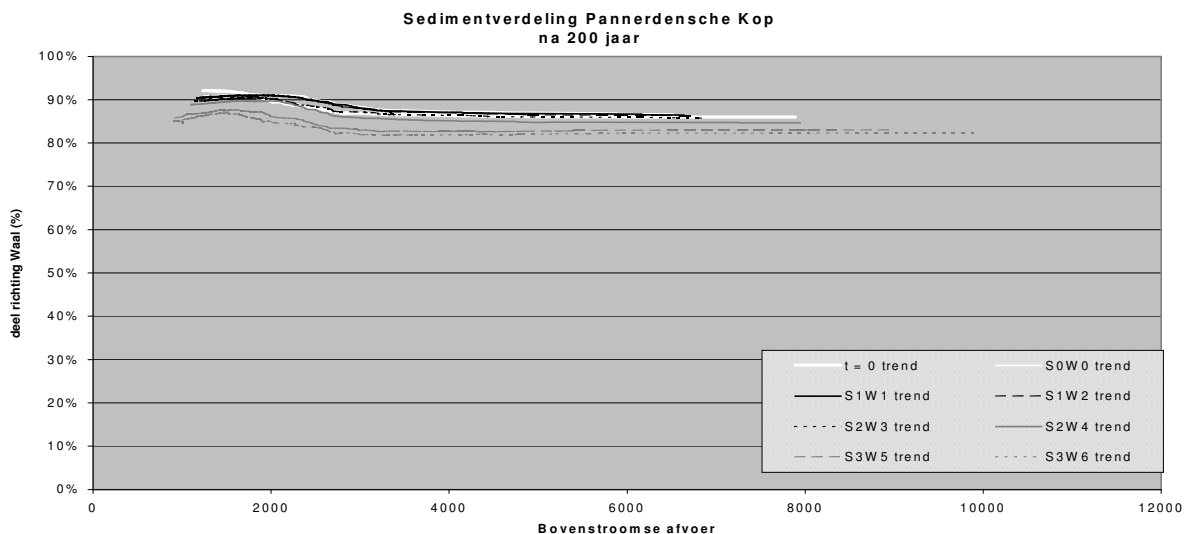
Afvoer- en sedimentverdeling

Al enkele malen is opgemerkt dat de verdeling van de afvoer en het sediment op de lange termijn en als gevolg van veranderde afvoer en zeespiegel veranderen. In figuren 7.10 en 7.11 is de afvoer- en sedimentverdeling te zien als functie van de bovenstroomse afvoer voor de Pannerdensch Kop. In figuren 7.12 en 7.13 is de afvoer- en sedimentverdeling bij de IJsselkop te zien. In bijlage G.2 "Afvoer per tak" zijn enkele grafieken gevoegd van de verandering in gemiddelde afvoer als functie van de tijd van de verschillende takken bij de verschillende klimaatscenario's.



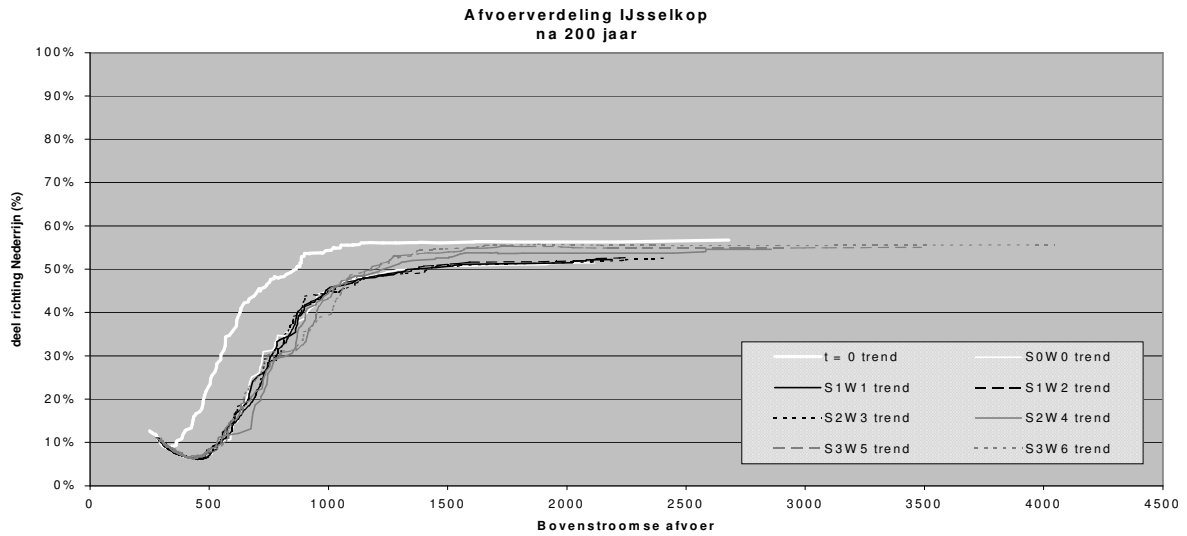
figuur 7.10 – Afvoerverdeling Pannerdensch Kop na 200 jaar, bij de referentieberekeningen

In figuur 7.10 is te zien dat de afvoerverdeling bij de Pannerdensch Kop verandert, naarmate het klimaatscenario zwaarder wordt gaat er minder afvoer in de richting van de Waal. Dit is te verklaren omdat er meer extremere afvoeren zullen optreden. In figuur 7.10 is te zien dat er, wanneer gekeken wordt naar de S0W0 serie, bij extreme afvoeren minder water naar de Waal wordt afgevoerd.



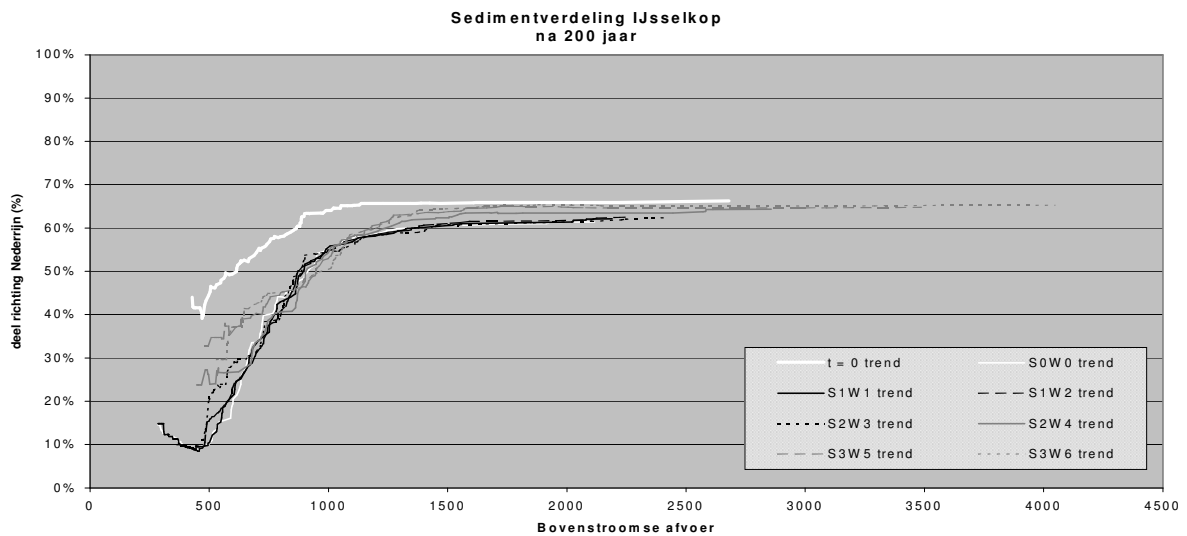
figuur 7.11 – Sedimentverdeling Pannerdensch Kop na 200 jaar, bij de referentieberekeningen

De sedimentverdeling bij de Pannerdensch Kop verandert ook. Deze verandering is conform de splitsingspuntrelatie²⁷.



figuur 7.12 – Afvoerdeling IJsselkop na 200 jaar, bij de referentieberekeningen.

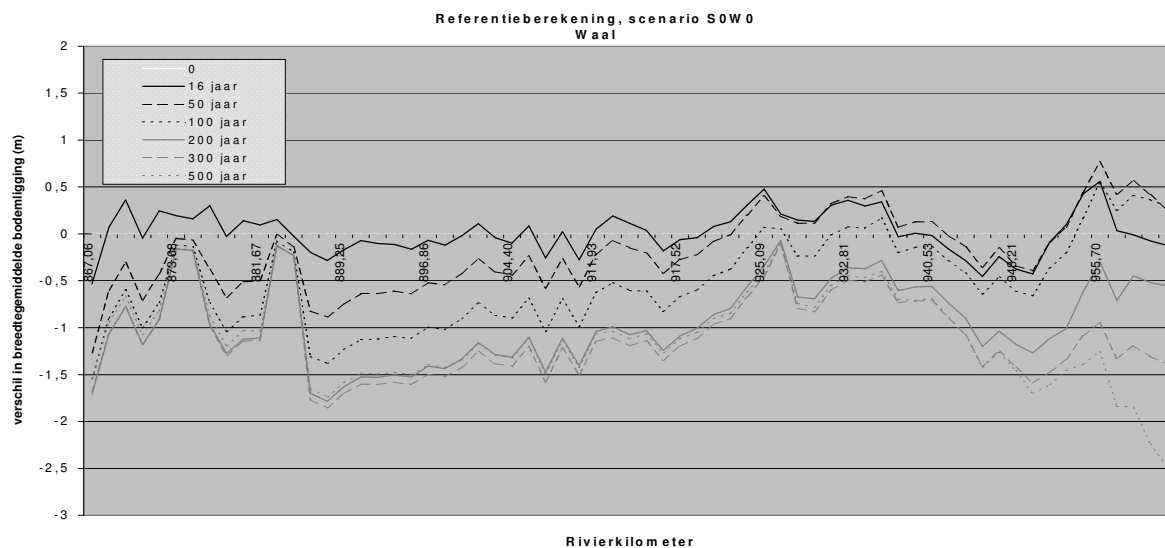
Bij de IJssel valt op dat de verdeling wel in de tijd wat verandert, maar dat er, vooral bij de lagere afvoeren, weinig verandering is wanneer de klimaatscenario's veranderen. Bij de hogere afvoeren krijgt de Nederrijn iets meer afvoer bij zwaardere klimaatscenario's. De sedimentverdeling volgt volgens de splitsingspuntrelatie.



figuur 7.13 – Sedimentverdeling IJsselkop na 200 jaar, bij de referentieberekeningen.

²⁷ zie ook 6.2.3, 'SOBEK -Rijn versie 2000.3M9'

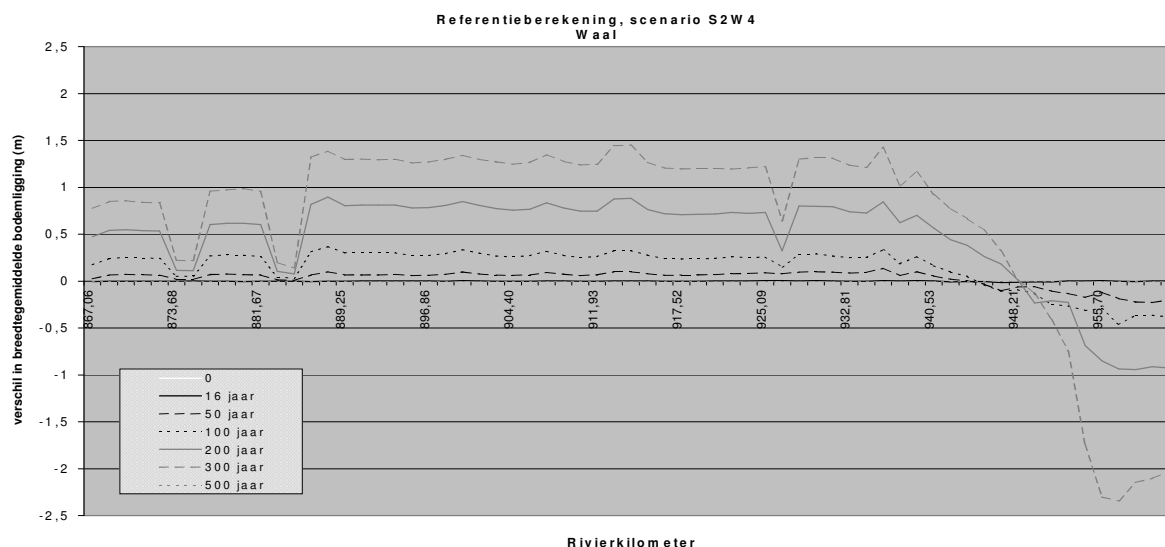
Waal



figuur 7.14 - De breedtegemiddelde bodemligging bij de referentieberekening, zonder maatregelen, zonder klimaatverandering van de Waal ten opzichte van de beginsituatie.

Wanneer de referentieberekening met onveranderde randvoorwaarden, wordt bekeken (figuur 7.14), valt op dat de gehele bodem van de Waal in 200 jaar ongeveer 1 meter zakt. Deze zakking wordt veroorzaakt doordat de bodem aan de benedenstroomse kant door de baggerwerkzaamheden wordt verlaagd. Hierna zakt de bodem ter plaatse van de baggerwerkzaamheden nog door, maar daarboven niet.

Ook zijn duidelijk de vaste lagen bij Erlecom, Nijmegen, St. Andries en te herkennen, respectievelijk bij rivierkilometers 875, 884 en 926.

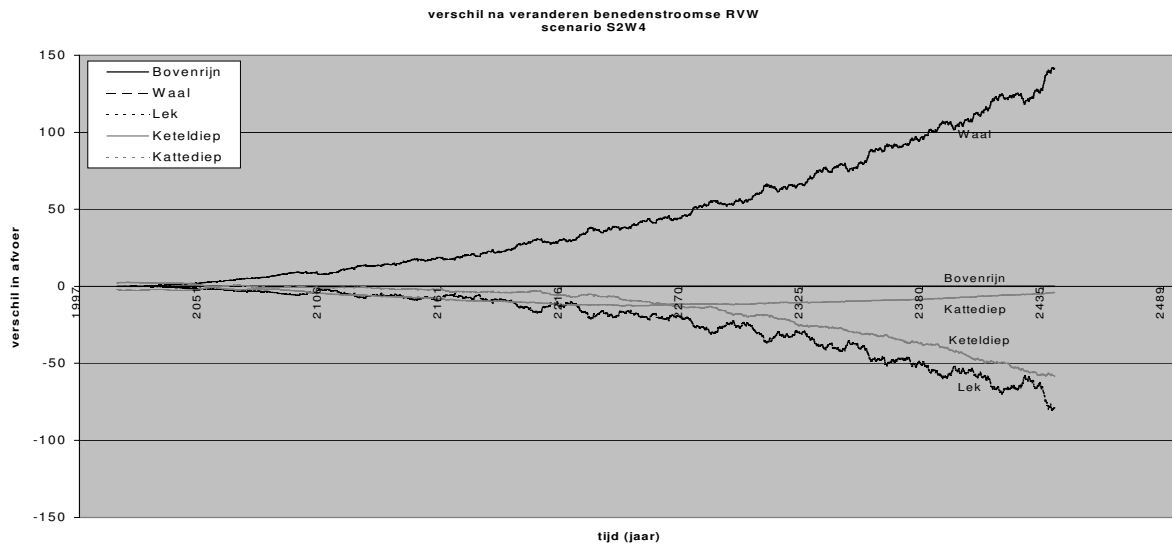


figuur 7.15 - Het verschil in de breedtegemiddelde bodemligging in de Waal van de simulatie met klimaatscenario S2W4 ten opzichte van de referentieberekening, zonder klimaatverandering.

Wanneer de resultaten van de simulaties met klimaatscenario's worden bekeken, is te zien dat, ten opzichte van de referentieberekening, de bodem over het grootste deel in de loop der tijd omhoog komt. Deze stijging neemt toe naarmate het klimaatscenario zwaarder wordt. Deze toename is gedeeltelijk te verklaren door de afname van de afvoer in de Waal bij zwaardere klimaatscenario's. Dit blijkt uit een simulatie waarbij alleen de afvoer is veranderd zonder de zeespiegel te veranderen. Door de verandering van de afvoer- en sedimentverdeling bij de Pannerdensch Kop krijgt de Waal teveel sediment te verwerken. Het andere deel van de stijging is door de stijging van de zeespiegel te verklaren.

Ook valt op dat aan de benedenstroomse kant van de Waal de bodem sterk erodeert. Deze erosie wordt ook groter naarmate het klimaatscenario zwaarder wordt. Deze erosie wordt veroorzaakt door de manier waarop de benedenstroomse randvoorwaarde, een waterstand, is opgelegd. Om deze waterstanden te bepalen zijn waarden

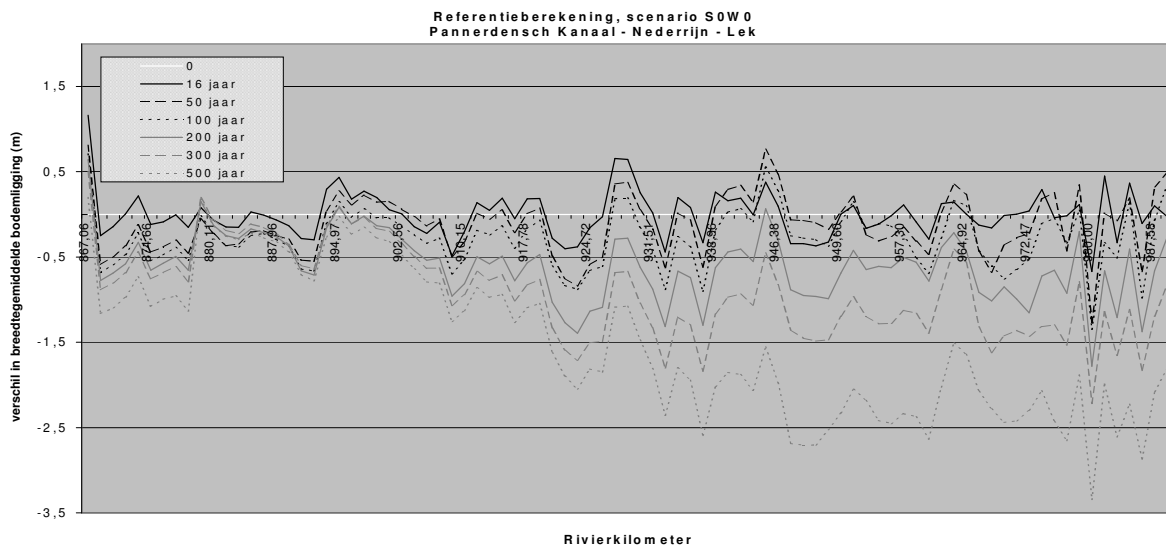
berekend voor de afvoer als functie van de tijd. Wanneer deze afvoeren worden vergeleken met de afvoeren die volgen uit de simulatie waarbij de randvoorwaarden zijn toegepast, is te zien dat de afvoeren uit de simulaties groter zijn dan de afvoeren die vooraf waren berekend (figuur 7.16). Omdat er echter een waterstand is opgelegd bij de benedenstroomse randvoorwaarde zal de bodem ter plaatse eroderen door een grotere stroomsnelheid.



figuur 7.16 – Het verschil aan de benedenstroomse randen van de verschillende takken tussen de gemiddelde vooraf bepaalde afvoer en de gemiddelde gesimuleerde afvoer bij de aanpassing van de benedenstroomse randvoorwaarde bij klimaatscenario S2W4

In bijlage D.9 zijn nog enkele grafieken van andere klimaatscenario's te vinden.

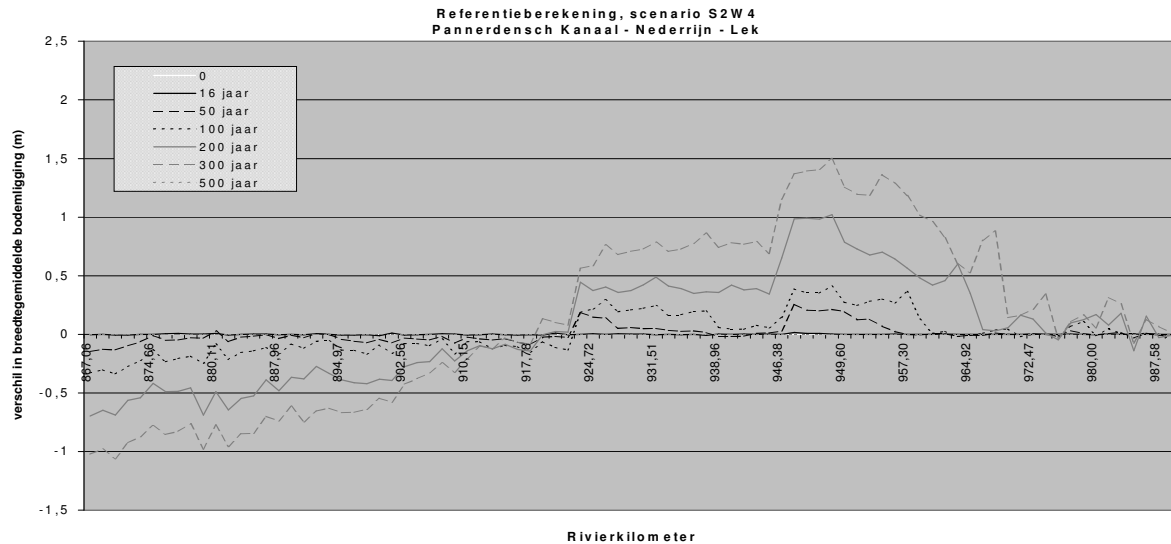
Pannerdensch Kanaal - Nederrijn - Lek



figuur 7.17 - De breedtegemiddelde bodemligging bij de simulatie zonder maatregelen, zonder klimaatverandering van Pannerdensch Kanaal, Nederrijn en Lek ten opzichte van de beginsituatie.

Bij het Pannerdensch Kanaal (van km 867.06 tot 878.59) is te zien dat de bodem daalt.

In de Nederrijn en de Lek is te zien dat de bodem de eerste 200 jaar ongeveer gelijk blijft. Daarna wordt de bodem steiler met het draaipunt in de buurt van de IJsselkop, benedenstrooms is dan een erosie te zien van 2,5 meter.

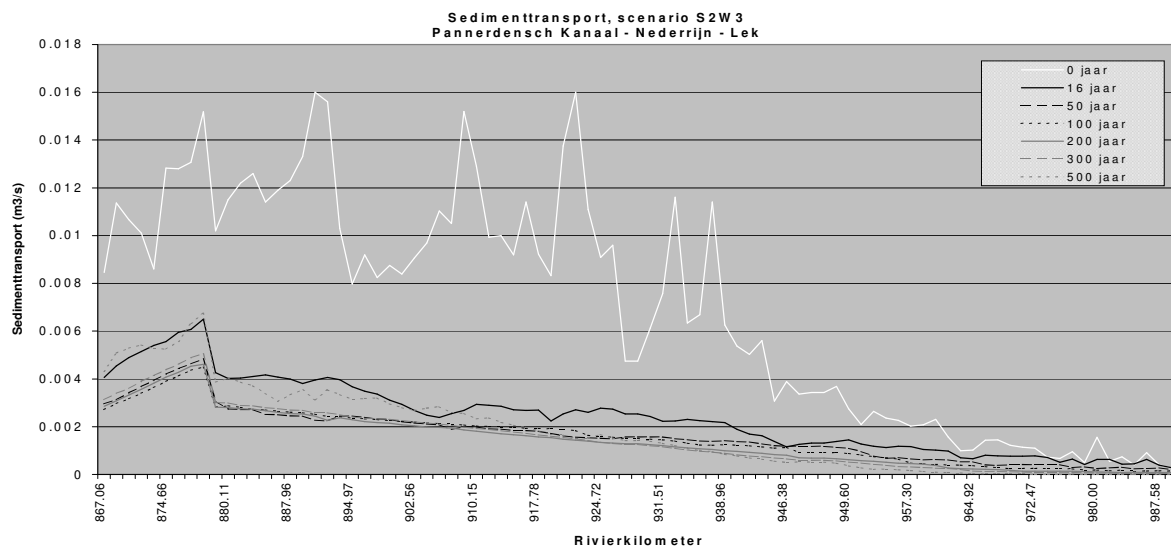


figuur 7.18 - Het verschil in de breedtegemiddelde bodemligging in het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de Lek van de simulatie met klimaatscenario S2W4 ten opzichte van de referentieberekening, zonder klimaatverandering.

Bij de simulaties met voor het klimaat aangepaste randvoorwaarden blijft de bodem van het Pannerdensch Kanaal zakken. Deze daling wordt veroorzaakt door het tekort aan sediment dat door de herverdeling het Pannerdensch Kanaal binnen komt.

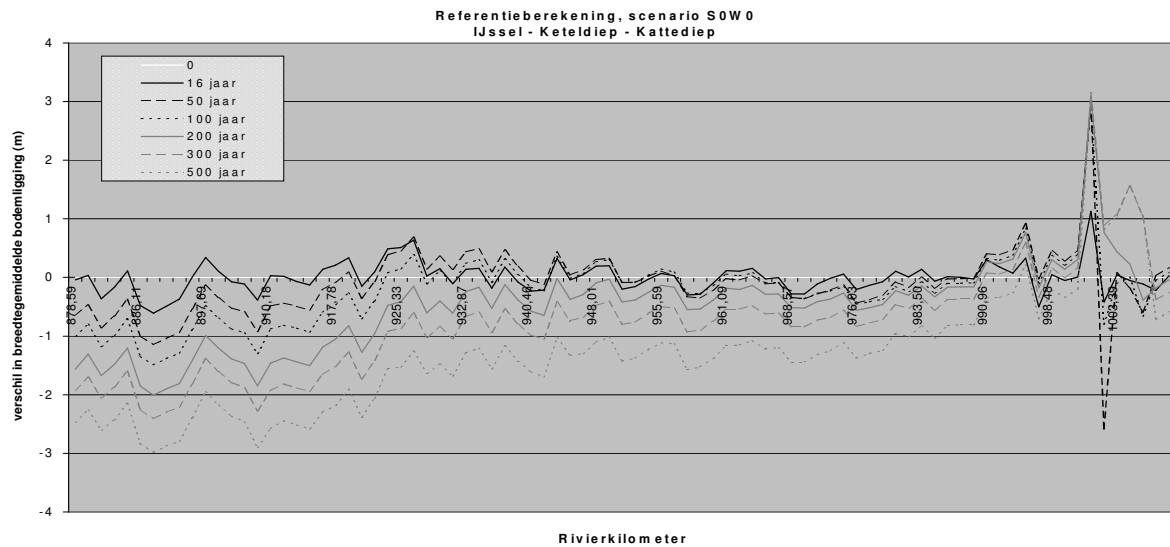
In de Nederrijn en de Lek valt op dat, naarmate het klimaatscenario zwaarder wordt, de kanteling minder wordt en bij de zwaarste scenario's zelfs omdraait. Bij het zwaarste scenario worden de Nederrijn en de Lek dus minder steil. Dit wordt veroorzaakt door de verandering van de afvoer- en sedimentverdeling bij de splitsingspunten in combinatie met de verhoging van de zeespiegel. De zeespiegelstijging zorgt voor een stijging van de bodem benedenstreams, terwijl het tekort aan sediment de bodem bovenstreams doet eroderen.

Bij zwaardere klimaatscenario's is te zien dat er aan de benedenstroomse kant erosie plaatsvindt, vooral na verloop van tijd, dit wordt veroorzaakt door de baggerwerkzaamheden. Wanneer het sedimenttransport ter plaatse wordt bekeken (figuur 7.19) is te zien dat er, vooral bij de zwaardere klimaatscenario's, benedenstreams geen sedimenttransport is. Er wordt dus sediment aan de bodem onttrokken en de bodem erodeert.



figuur 7.19 – sedimenttransport in de tak ‘Pannerdensch Kanaal – Nederrijn – Lek’ bij de referentieberekening met klimaatscenario S2W4

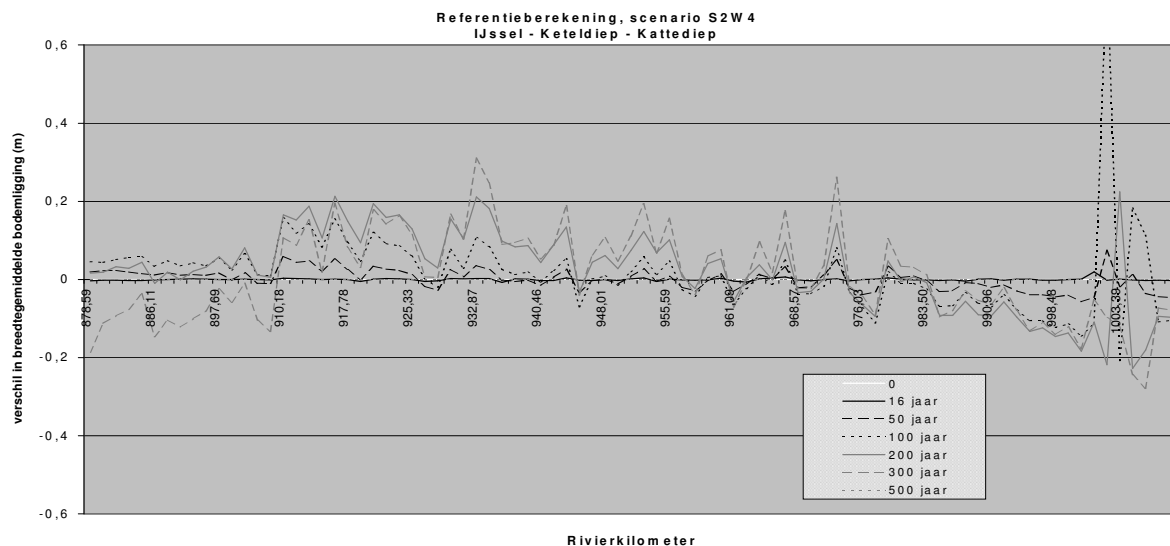
IJssel – Keteldiep – Kattediep



figuur 7.20 – De breedtegemiddelde bodemligging ten opzichte van de beginsituatie in de takken IJssel, Keteldiep en Kattediep bij de referentieberekeningen zonder klimaatverandering.

De referentieberekening zonder klimaatverandering van de IJssel laat zien dat de helling iets afneemt in de loop der tijd. De verandering van de helling is een stuk kleiner dan zonder onderhoudsbaggerwerkzaamheden. Bij het Keteldiep en het Kattediep zien we een grote variatie in bodemniveaus. Dit wordt echter niet waarschijnlijk geacht. Aangezien het slechts om een klein deel van de rivier gaat zullen deze uiteinden verder worden gelaten voor wat ze zijn.

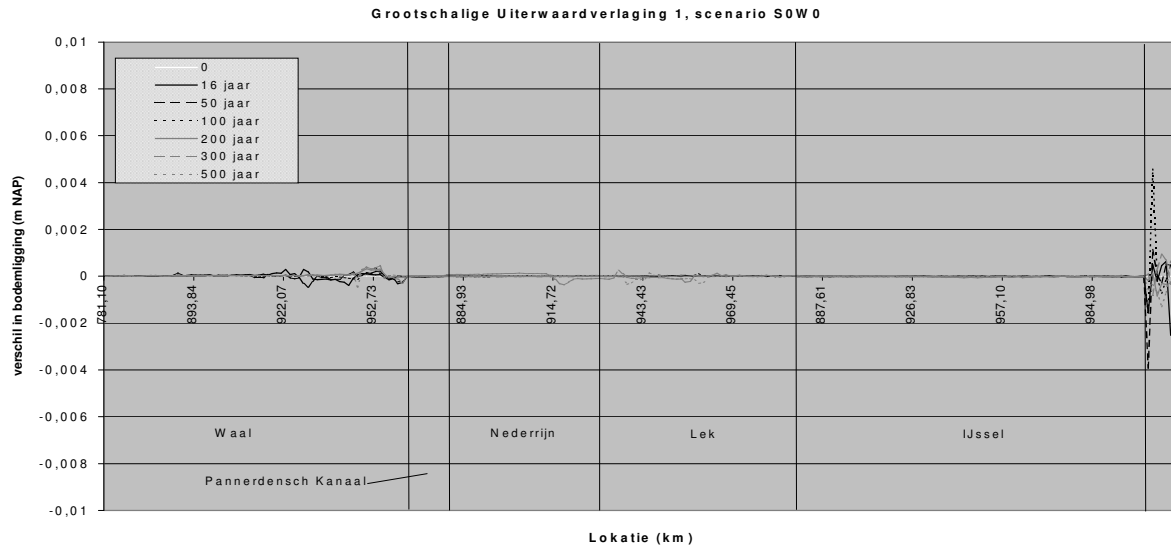
Wanneer wordt gekeken naar de berekeningen met veranderde afvoer en zeespiegel is te zien dat de bodem van de IJssel slechts licht verandert door klimaatveranderingen (figuur 7.21), ondanks de toename van de afvoer in de IJssel. De veranderde sedimentverdeling naar de IJssel is blijkbaar in evenwicht met de veranderde afvoerverdeling. Wel is te zien dat de afname van de helling door de veranderde randvoorwaarden iets wordt geremd.



figuur 7.21 - Het verschil in de breedtegemiddelde bodemligging in de IJssel, het Keteldiep en het Kattediep van de simulatie met klimaatscenario S2W4 ten opzichte van de referentieberekening, zonder klimaatverandering.

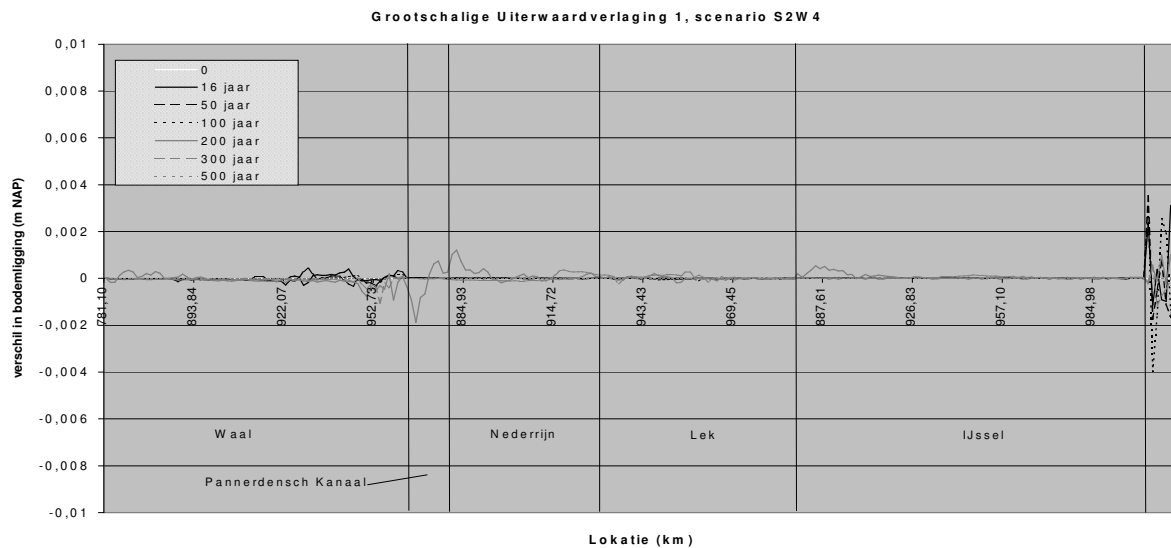
7.4 Grootschalige uiterwaardverlaging, variant 1

Uit de resultaten blijkt dat de bodemligging bij de simulatie met de oorspronkelijke afvoer en zeespiegel maximaal enkele millimeters afwijkt van de referentieberekening.



figuur 7.22 - Het verschil in bodemniveau bij maatregel "Grootschalige uiterwaardverlaging 1" t.o.v. de referentieberekening, bij klimaatscenario S0W0.

Bij de simulaties met klimaatverandering lopen de verschillen met de simulatie zonder klimaatverandering soms ook tot enkele millimeters. Als voorbeeld zijn hieronder de resultaten bij het klimaatscenario S2W4 gegeven. De verschillen zijn na 200 jaar nog duidelijk, daarna niet meer. Er is geen duidelijke trend te herkennen wanneer de verschillende klimaatscenario's met elkaar worden vergeleken.

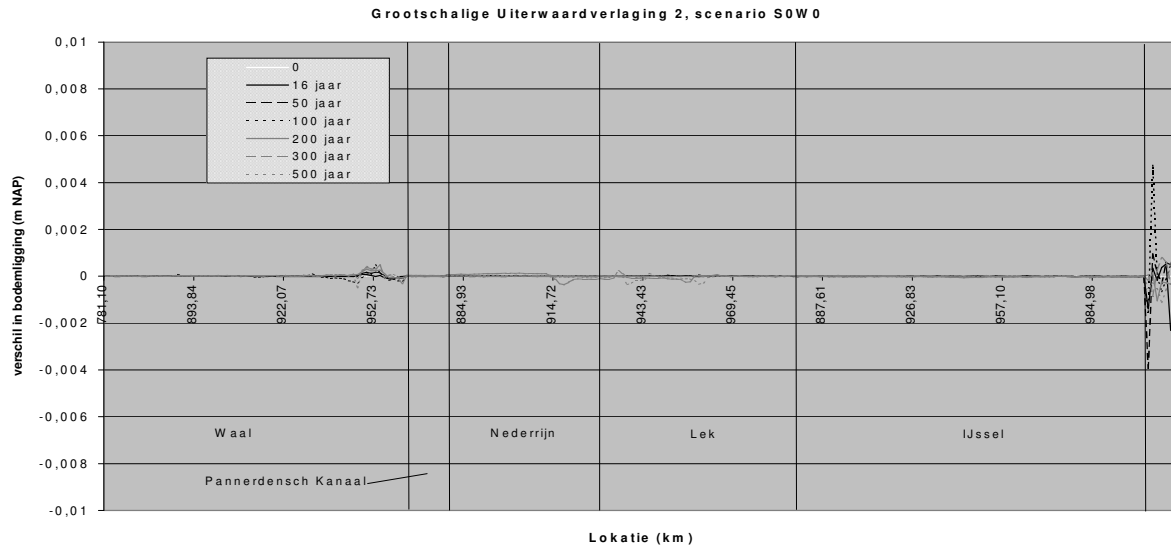


figuur 7.23 - Het verschil in effect door klimaatscenario S2W4 bij de maatregel "Groot schalige uiterwaardverlaging 1".

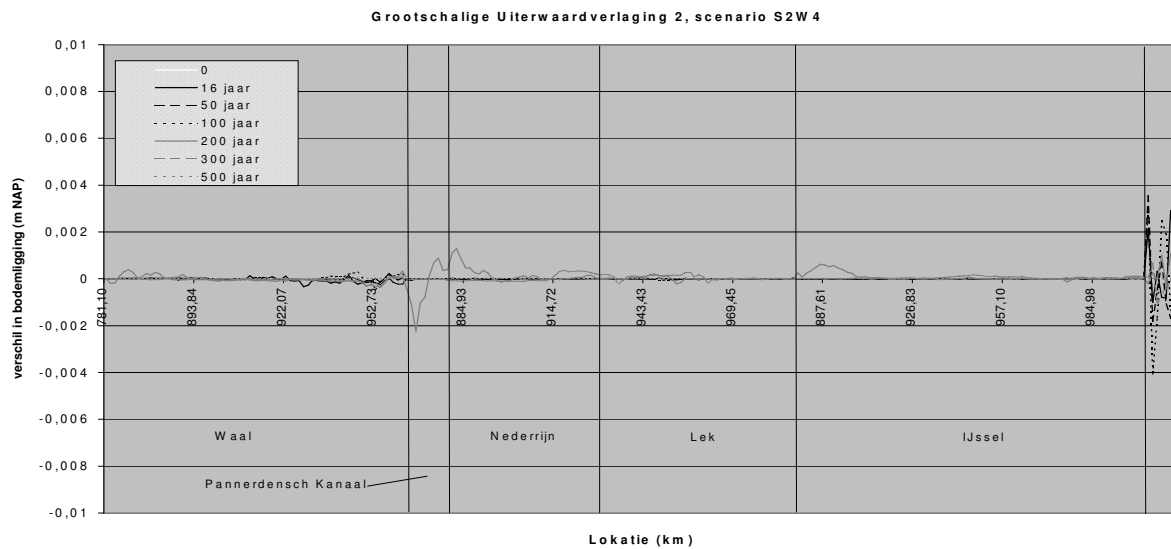
Dat de grootschalige uiterwaardverlaging weinig invloed heeft op de morfologie heeft te maken met de frequentie waarbij de uiterwaarden overstroomd en de uitwisseling van sediment tussen de hoofdgeul en de uiterwaarden. Dit laatste is een tweedimensionaal effect en kan door SOBEK niet juist worden berekend. Wanneer dit wel juist wordt meegenomen, zal er zich meer sediment afzetten buiten de hoofdgeul en zal de hoofdgeul eroderen.

7.5 Grootschalige uiterwaardverlaging, variant 2

Bij deze tweede variant zijn de resultaten ongeveer gelijk aan de resultaten bij de eerste variant. Wel zijn de verschillen met de simulatie zonder maatregelen iets groter, wat te zien is aan de hogere toppen van de grafieken.



figuur 7.24 - Het verschil in bodemniveau bij maatregel "Grootschalige uiterwaardverlaging 2" t.o.v. de referentieberekening, bij klimaatscenario S0W0.

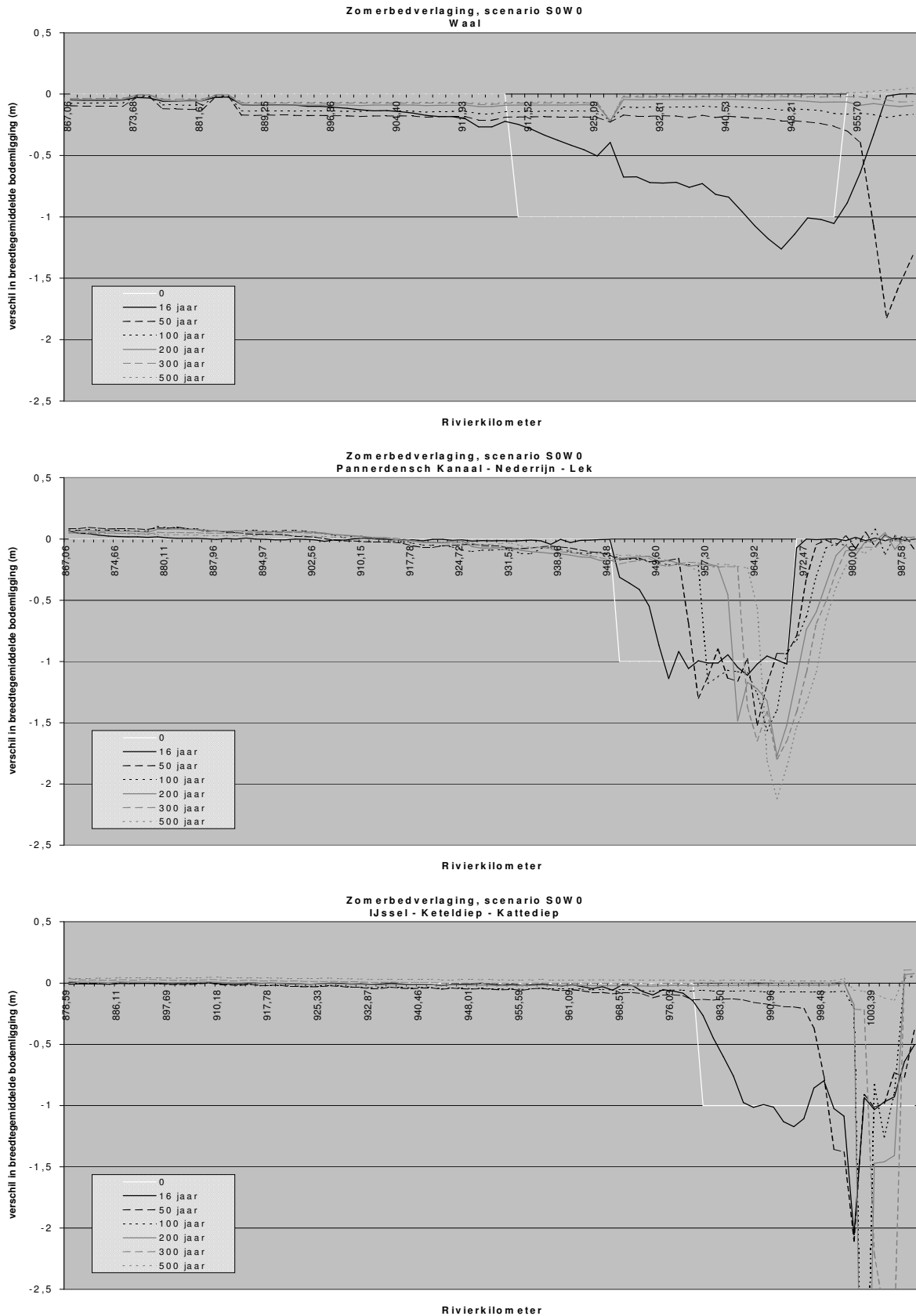


figuur 7.25 - Het verschil in effect door klimaatscenario S2W4 bij de maatregel 'Grootschalige uiterwaardverlaging 2'.

De iets grotere verschillen zijn te verwachten aangezien de toegepaste maatregel ook grotere veranderingen meebrengt. Verder gelden hier dezelfde opmerkingen als bij de eerste variant van de Grootschalige uiterwaardverlaging.

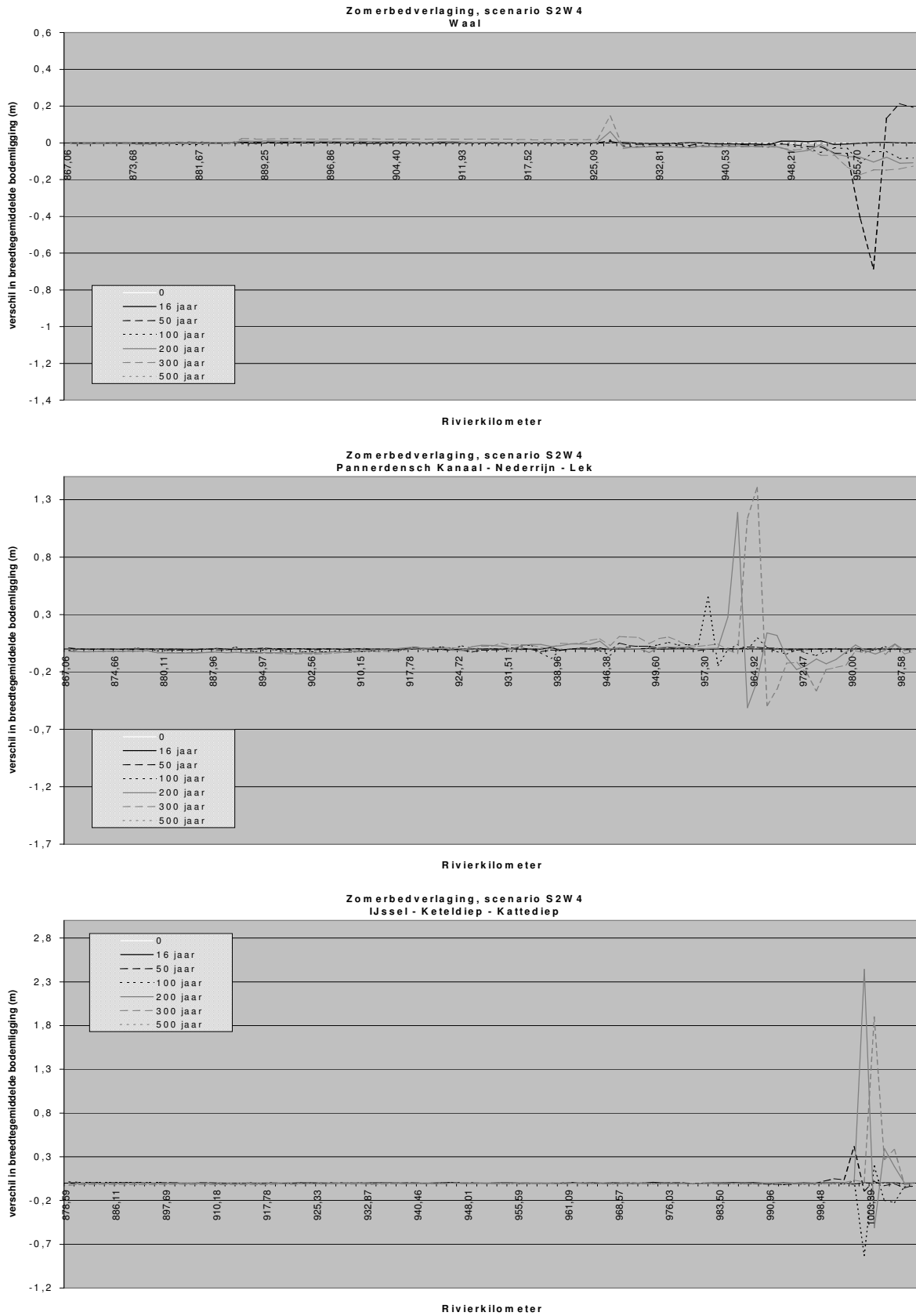
7.6 Zomerbedverlaging

Bij deze resultaten is meer te zien. Als voorbeeld zijn weer de resultaten van de simulatie zonder klimaatveranderingen en die met klimaatscenario S2W4 gegeven. De initiële verdieping van 1 meter vervormt naarmate de tijd vordert (figuur 7.26 t/m figuur 7.28). De maximale diepte en de basis worden eerst groter en benedenstrooms van de verdieping zandt de bodem iets aan. Daarna wordt de maximale diepte weer minder en wordt het verschil met de case zonder maatregelen weer minder.



figuur 7.26 – Verschil in bodemniveau bij maatregel "Zomerbedverlaging" t.o.v. de referentieberekening, bij klimaatscenario SOW0, in de verschillende takken

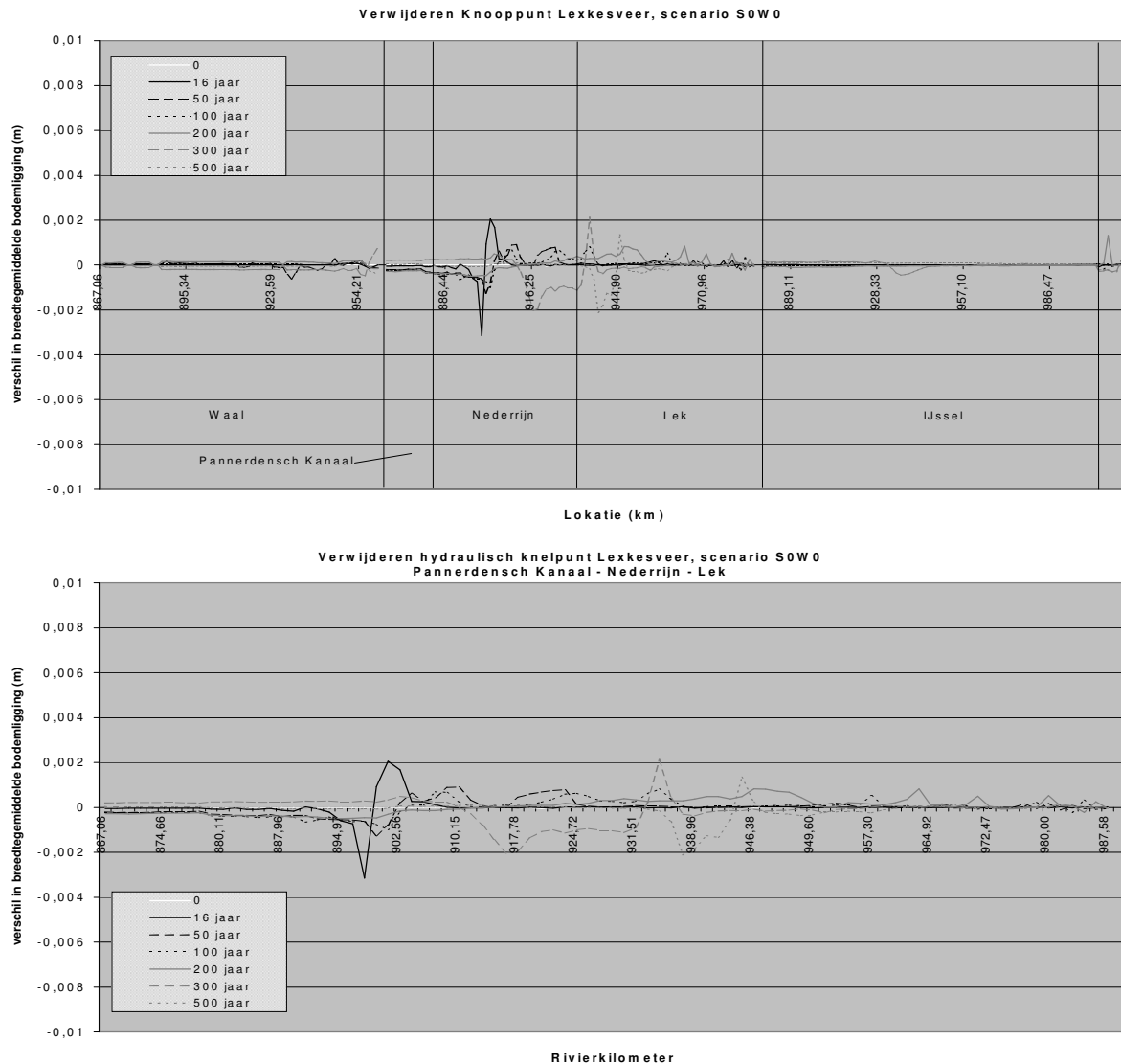
Wanneer de verschillende klimaatscenario's met elkaar worden vergeleken is te zien dat bij sterkere klimaatveranderingen de bodem iets sneller verandert. Verder zijn er niet veel veranderingen. Op de langere termijn lopen de verstoringen uit het systeem en herstelt de oorspronkelijke situatie zich.



figuur 7.27- Het verschil in effect door klimaatscenario S2W4 bij de maatregel "Zomerbedverlaging", in de verschillende takken.

7.7 Verwijderen hydraulisch knelpunt Lexkesveer

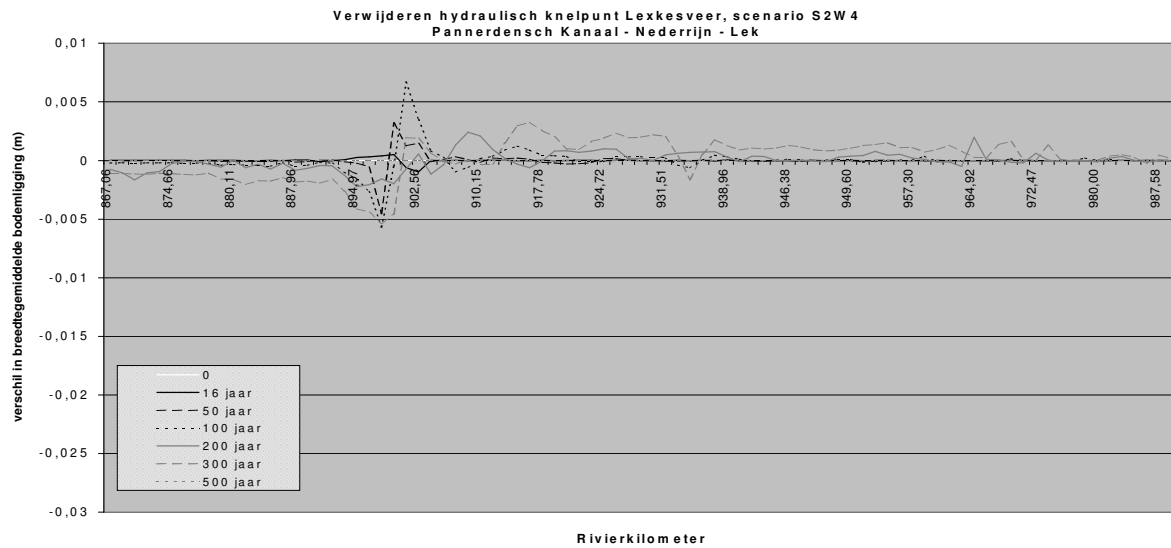
Bij het verwijderen van het hydraulisch knelpunt Lexkesveer zal de reactie van de bodem zonder klimaatverandering slechts enkele millimeters bedragen. De verschillen in de takken Waal, IJssel, Keteldiep en Kattediep zijn verwaarloosbaar (figuur 7.28). In deze paragraaf zal daarom alleen het deel "Pannerdensch Kanaal - Nederrijn - Lek" worden besproken.



figuren 7.28 en 7.29 - Het verschil in bodemniveau bij maatregel "Verwijderen hydraulisch knelpunt Lexkesveer" t.o.v. de referentieberekening, bij klimaatscenario S0W0, in de verschillende takken.

Ter plaatse van het verwijderde knelpunt verandert de bodem het meest. Voor het punt erodeert de bodem en na het punt sedimenteert de bodem (figuur 7.29). De verstoringen van enkele millimeters lopen nog door achter het punt tot ver na de verwijdering.

Bij de simulaties met klimaatveranderingen is te zien dat de bodem voor het verwijderde knelpunt sterker erodeert en de bodem na het punt sterker aanzandt. De orde van grootte van deze veranderingen is enkele millimeters tot enkele centimeters. Wanneer de verschillende klimaatscenario's met elkaar worden vergeleken is te zien dat deze erosie en aanzanding toeneemt naarmate het klimaatscenario sterker is.



figuur 7.30 - Het verschil in effect door klimaatscenario S2W4 bij de maatregel 'Verwijderen hydraulisch knelpunt Lexkesveer', in de tak 'Pannerdensch Kanaal - Nederrijn - Lek'.

8 Onzekerheden

Voordat er conclusies kunnen worden getrokken uit de resultaten van deze studie is het goed nog eens stil te staan bij de onzekerheden die een rol spelen. Er zijn namelijk veel aannames gedaan die de resultaten van het onderzoek beïnvloeden. De scenario's die zijn opgesteld zijn bijvoorbeeld van veel onzekere variabelen afhankelijk. Hieronder wordt ingegaan op enkele van deze onzekerheden.

8.1 Klimaat

8.1.1 Werking van het klimaat

Het klimaat is een ingewikkeld systeem met veel componenten. De relaties tussen deze componenten zijn nog niet helemaal duidelijk. Vaak worden bij de simulatie van het klimaat dan ook componenten en processen vereenvoudigd. Of dit echter op de juiste manier gebeurt is onduidelijk door het gebrek aan inzicht. De enige 'zekerheid' is dat het model kan worden geïjkt aan de te korte reeks meetwaarden. Volledig inzicht in de processen is hierdoor nog niet te verkrijgen. Op lokale schaal is het nog moeilijker het klimaat te simuleren. De onduidelijkheid over het veranderen van luchtcirculatiepatronen is hier een goed voorbeeld van.

8.1.2 Klimaatverandering

Klimaatverandering wordt in enkele gevallen versterkt door interne processen. Het probleem bij deze processen is hierboven reeds omschreven. Andere oorzaken voor klimaatverandering liggen vaak bij de zon. Te denken valt dan aan de variërende sterkte van de zon en de variërende afstand en helling van de aarde ten opzichte van de zon. Voor deze zaken bestaan veel theorieën, te bewijzen zijn ze echter niet of zeer moeilijk. Ook worden er nog steeds nieuwe frequenties ontdekt waarmee de kracht van de zon op aarde varieert.

8.2 Ontwikkeling van de wereld

8.2.1 Energieverbruik en technologische ontwikkeling

De ontwikkeling van de wereld is sterk van invloed op de globale klimaatverandering. Wanneer de wereldbevolking toeneemt zal het energieverbruik exponentieel toenemen. Deze toename is afhankelijk van beleid dat door de jaren heen wordt gevoerd door verschillende landen met verschillende regeringen. Het is erg onzeker of beleid dat nu wordt ingezet zal worden doorgezet door volgende regeringen. De regering Bush jr. in de Verenigde Staten is daar een voorbeeld van. Overigens zal de trend van het belangrijker worden van klimaatverandering op de politieke agenda hier kwalitatief niet door beïnvloed worden. Het tempo waarin energieverbruik wordt aangepast en dus nieuwe technologieën worden ontwikkeld zijn er echter wel van afhankelijk.

Verder is de invloed van lokale verschillen in ontwikkeling op het klimaat nog onbekend.

8.2.2 Scenario's

Voor de ontwikkeling van de wereld en haar bevolking zijn allerlei scenario's opgezet. Deze scenario's zijn de basis voor de verschillende klimaatscenario's die momenteel worden gehanteerd voor de termijn tot 100 jaar.

Voor de langere termijn (> 100 jaar) wordt er momenteel echter alleen vanuit gegaan dat de uitstoot van broeikasgassen zal stabiliseren. De in deze studie gebruikte klimaatscenario's gaan hier ook van uit.

8.2.3 Maatregelen

Welke maatregelen er worden toegepast is sterk afhankelijk van de geest van de tijd waarin de uitvoering plaats moet vinden. Ook is het niet ondenkbaar dat er nieuwe maatregelen worden bedacht en uitgevoerd wanneer er bepaalde randvoorwaarden veranderen. Wanneer bijvoorbeeld een stad een explosieve groei doormaakt waardoor er veel investeringen worden gedaan zullen maatregelen wenselijker worden, terwijl andere maatregelen – bijvoorbeeld dijkverlegging – juist minder aantrekkelijk worden.

8.3 Morfologische berekeningen

8.3.1 1-dimensionale modellering

Het gebruik van een 1-dimensionaal model betekent dat twee- en driedimensionale effecten niet meegenomen kunnen worden. Bij een natuurlijke rivier spelen deze effecten echter een grote rol. Voorbeelden hiervan zijn bochtstroming en het vol en leeglopen van uiterwaarden.

8.3.2 Morfologische processen

De morfologische processen die plaatsvinden bij sedimenttransport zijn niet volledig duidelijk. Bij het berekenen van morfologische veranderingen worden empirische vergelijkingen gebruikt. Voor verschillende situaties zijn verschillende empirische vergelijkingen beschikbaar. Hoewel de vergelijkingen goed worden getest en goed bruikbaar zijn voor individuele situaties brengt het wel een onzekerheid mee. Zeker wanneer de vergelijkingen worden gebruikt bij extreme situaties waarvoor de vergelijkingen nog niet geïjkt zijn. Met name de relatie van de afvoer- en sedimentverdeling op de splitsingspunten heeft veel invloed op de morfologische effecten op de lange termijn.

8.3.3 SOBEK-Rijn versie 2000.3M9

Het gebruikte model in SOBEK is aangepast zodat de werkelijkheid beter wordt benaderd. Een van de methoden die hierbij is gehanteerd is het veranderen van ruwheden over bepaalde trajecten. Hiermee wordt de waterstand beïnvloed zodat deze overeenkomt met meetwaarden.

Bij simulaties met klimaatveranderingen wordt gerekend met extreme waarden. Deze extreme waarden zijn extremer dan tot nu toe in de werkelijkheid is voorgekomen en gemeten. Het model is o.a. gevalideerd met behulp van waarden die gemeten zijn bij hoogwaters die enkele jaren geleden zijn voorgekomen. Het valideren van het model met de extremere waarden is uiteraard niet mogelijk.

8.3.4 Aanpassingen aan het bestaande model

Het bestaande gecalibreerde en gevalideerde model is aangepast om bepaalde randvoorwaarden in te kunnen voeren, zoals een tijdreeks van de waterstand benedenstrooms in plaats van een relatie tussen het waterniveau en het debiet.

Om meer zekerheid te hebben over de geldigheid van deze aanpassingen zou het beter zijn het model opnieuw te valideren en indien nodig te calibreren. Dit kost echter veel tijd en andere onzekerheden buiten het model worden er niet mee weggenomen.

Omdat er nogal wat onzekerheden zijn die de resultaten van deze studie kunnen beïnvloeden, is het niet verstandig kwantitatieve conclusies te trekken uit de resultaten van de studie. Er zal daarom bij de conclusies meer aandacht uitgaan naar de trends die in de resultaten te herkennen zijn.

9 Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk zullen de conclusies die volgen uit de studie worden samengevat. De resultaten van de berekeningen worden nog eens vluchtig doorgenomen en worden de morfologische effecten door de veranderde randvoorwaarden bij de maatregelen duidelijk gemaakt. Evenals in de voorgaande hoofdstukken wordt, wanneer bij de bespreking van de resultaten over ‘klimaatverandering’ wordt gesproken, daarmee bedoeld ‘verandering van de afvoer en de zeespiegel’. Want de klimaatveranderingen zijn met behulp van scenario’s voor de verandering van de rivierafvoer en de zeespiegel in het model geïntroduceerd.

9.1 Morfologische effecten

9.1.1 Referentie-berekeningen

Afvoer- en sedimentverdeling

De afvoer- en sedimentverdeling zoals die door het model, zonder klimaatverandering, worden berekend zijn nog niet constant maar veranderen nog licht. Door de verandering van de rivierafvoer en de zeespiegel zal deze verdeling zich nog verder aanpassen. Omdat de afvoer extremer zal worden, neemt gemiddeld de afvoer naar de Waal af. De afvoeren naar de Nederrijn en de IJssel nemen dan toe. Wanneer de afvoer verandert, verandert ook de sedimentverdeling, naar gelang de splitsingspuntrelatie die in het model is gedefinieerd. De Waal krijgt dan een sedimentoverschot, terwijl het Pannerdensch Kanaal een sedimenttekort krijgt.

Deze veranderingen hebben gevolgen voor de morfologie van de verschillende takken.

Waal

Zonder klimaatverandering en zonder baggerwerkzaamheden zal de bodem benedenstrooms in de Waal willen stijgen. Wanneer dit niet gebeurt, bijvoorbeeld vanwege baggerwerkzaamheden, zal de bodem bovenstrooms dalen. Op lange termijn kan deze bodemdaling ruim een meter bedragen. Dit kan gevaarlijk zijn voor constructies door en langs de rivier. Op die termijn zal de daling echter door de effecten van klimaatveranderingen worden gecompenseerd.

Op enkele plaatsen zal de aanpassing van de bodem worden tegengegaan door vaste lagen die daar zijn aangebracht (Erlecom, Nijmegen en St. Andries). Het verschil in bodemniveau dat hier ontstaat kan een gevaar zijn voor de stabiliteit van de constructies ter plaatse.

Wanneer het klimaat verandert en dus ook de afvoer- en sedimentverdeling, zal de bodem aanzanden. Naarmate het klimaat meer verandert zal de aanzanding groter worden door de vermindering van de afvoer aan de ene kant (door de afvoer verdeling) en de stijging van de zeespiegel aan de andere kant. De erosie aan de benedenstroomse kant die door het model voorspeld wordt, zal in de werkelijkheid niet optreden, maar is een gevolg van de randvoorwaarde aan de benedenstroomse kant.

Pannerdensch Kanaal – Nederrijn – Lek

Zonder klimaatverandering zal de bodem van het Pannerdensch Kanaal dalen door de sedimentverdeling bij de Pannerdensch Kop. Bij klimaatverandering zal de daling sterker worden omdat de sedimentverdeling bij de Pannerdensch Kop nog sterker verandert.

In de Nederrijn en de Lek neemt de bodemhelling af wanneer er niet gebaggerd wordt en er geen klimaatverandering optreedt. Met baggerwerkzaamheden blijft de bodem gelijk. Bij klimaatverandering zal het bodemverhang kleiner worden als gevolg van de stijging van de zeespiegel aan de ene kant en een sedimenttekort aan de andere kant.

IJssel – Keteldiep – Kattediep

Het verhang van de IJssel neemt af in de loop der tijd. Met de baggerwerkzaamheden is dit iets afgeremd. Klimaatveranderingen veranderen hier weinig aan, de afname van het verhang wordt er wel iets door afgeremd.

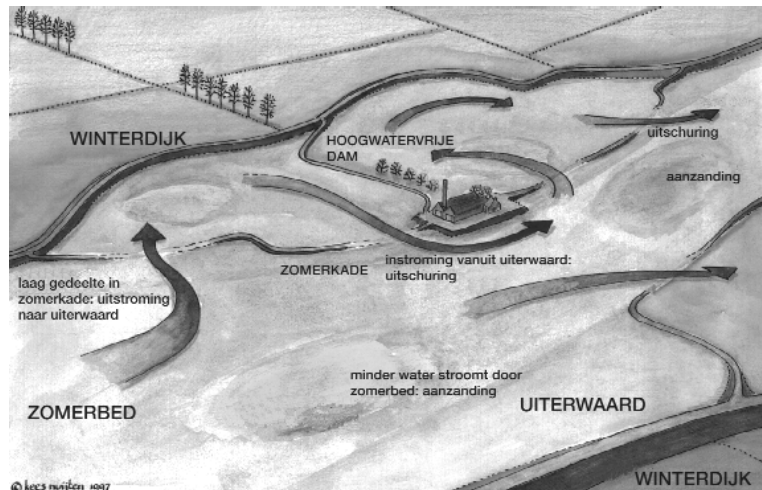
De oorzaak hiervan is de verdeling van afvoer- en sediment bij de Pannerdensch Kop. Door de veranderde verdeling bij de Pannerdensch Kop krijgt de IJssel meer afvoer.

9.1.2 Grootschalige uiterwaardverlaging

Het effect bij de resultaten van de simulaties met grootschalige uiterwaardverlagingen is in de orde grootte van millimeters. Hoewel de uiterwaardverlaging een redelijk grote verandering in het doorstroomprofiel teweeg brengt, heeft dit slechts effect wanneer het waterniveau uitstijgt boven de zomerkaden. Bovendien wordt een groot deel van het effect door de uitwisseling van sediment tussen de uiterwaard en het sedimenttransporterende deel van de doorsnede veroorzaakt. Dit kan SOBEK normaal gesproken echter niet goed simuleren aangezien het een tweedimensionaal verschijnsel is.

Noch de lange termijn noch de verandering van de randvoorwaarden veranderen hier dus veel aan. In deze studie is verder niet gekeken naar de maatregel in combinatie met het verwijderen van de zomerkades. De verwachting is dat er, wanneer de zomerkades wel worden verwijderd, meer veranderingen aan de bodem te zien zijn.

Naar alle waarschijnlijkheid zal er dan meer sediment worden afgezet in de uiterwaarden en zal de bodem in het zomerbed ook aanzanden (figuur 8.1).



figuur 8.1 – stroomingsbeeld in het rivierbed

9.1.3 Zomerbedverlaging

Alleen in de berekening met maatregel “zomerbedverlaging” is een effect te zien in de orde grootte van meters. De verdieping van het stroomvoerend profiel vervormt en verplaatst zich stroomafwaarts. Klimaatverandering heeft invloed op de snelheid waarmee de zomerbedverlaging vervormt en zich verplaatst, de grootte van de verdieping verandert er echter niet duidelijk door.

De lopende verstoring kan gevaarlijk zijn voor funderingen van constructies die zich benedenstrooms van de zomerbedverlaging bevinden.

Op lange termijn zal het effect van een éénmalige zomerbedverlaging uit het systeem verdwijnen, als blijvende maatregel is dus een periodieke/continue zomerbedverlaging noodzakelijk. Dit zal dan wel invloed hebben op het bodemverhang en de evenwichtsdiepte. Bij een veranderende afvoer en zeespiegel kan het noodzakelijk zijn de frequentie van de periodieke zomerbedverlaging aan te passen aangezien de snelheid waarmee de verstoring uit het systeem loopt erdoor kan variëren.

9.1.4 Verwijderen hydraulische knelpunten

Wanneer een enkel knelpunt wordt verwijderd, zoals in de case “Verwijderen hydraulisch knelpunt Lexkesveer” is gedaan, is het morfologische effect van de orde grootte van millimeters tot een centimeter. Voor het knelpunt zal de bodem eroderen en ter plaatse van en achter het knelpunt zal de bodem aanzanden. De grootte van het effect is afhankelijk verschillende parameters, zoals: de hydraulische weerstand van het knelpunt, de stroming ter plaatse en het sedimenttransport ter plaatse van het knelpunt.

Klimaatverandering heeft ook invloed op de grootte van de bodemveranderingen die ontstaan door de aanwezigheid én het verwijderen van het knelpunt. Bij een grotere afvoer zal het verschil ten opzichte van de situatie met knelpunt groter zijn, waardoor het effect op de morfologie ook groter is. Uit de resultaten van de simulaties met veranderde randvoorwaarden blijkt dat het morfologische effect bij een enkel knelpunt door de klimaatveranderingen kan verveelvoudigen (zie paragraaf 7.7).

Wanneer meerdere hydraulische knelpunten achter elkaar worden verwijderd, zal het effect van de individuele knelpunten worden vereffend met de veranderingen die ontstaan door de verwijderde knelpunten voor en na het betreffende knelpunt. Er zullen wel kleine bodemveranderingen over blijven, de knelpunten zijn immers niet

allen gelijk en staan niet op regelmatige afstand van elkaar. Een groter morfologisch effect zal worden veroorzaakt doordat het verwijderen van meerdere knelpunten vooral een verlaging van de hydraulische weerstand van een tak met zich meebrengt. Hierdoor zal de afvoer- en sedimentverdeling bij de splitsingspunten veranderen.

Bij een sterkere klimaatverandering zal de veranderde weerstand van een tak meer invloed hebben, de afvoer- en sedimentverdeling bij de splitsingspunten zal dan ook sterker reageren.

Omdat de invloed erg afhankelijk is van de verwijderde knelpunten is het wel interessant te kijken naar het effect van het verwijderen van meerdere knelpunten. In deze studie was dit echter niet haalbaar.

9.2 Aanbevelingen

In deze studie zijn veel zaken niet verder of dieper uitgezocht. Vaak was dit ook niet nuttig of noodzakelijk vanwege de grote onzekerheid die het probleem al met zich meebrengt.

Enkele zaken zijn echter toch zinvol om verder uit te zoeken, hoewel duidelijk moet zijn dat ook met deze studies geen kwantitatieve analyses mogelijk zijn, zodat de conclusies (momenteel) slechts kwalitatief kunnen zijn.

9.2.1 Onderzoek naar de verdelingen op de splitsingspunten

Gebleken is dat de afvoer- en sedimentverdeling een grote invloed hebben op de lange termijn morfologie. Een probleem bij deze punten is echter dat de bekende relaties voor de afvoer- en sedimentverdeling empirisch bepaald zijn aan de hand van bekende situaties. Of deze relaties ook gelden bij extremere afvoeren en een hogere zeespiegel is onduidelijk. Ook is het misschien mogelijk de verdeling op de splitsingspunten te controleren, door bepaalde maatregelen in bepaalde takken uit te voeren of de lokale geografie van het splitsingspunt te veranderen. Op deze manier kunnen ongewenste morfologische (en hydraulische) effecten worden verminderd of voorkomen.

9.2.2 Maatgevend hoogwater simulaties

Bij deze studie was het in verband met de beschikbare tijd niet meer haalbaar nog te kijken naar de hydraulische gevolgen bij de maatgevend hoogwaterafvoeren. Er is dan ook slechts gekeken naar de morfologische effecten bij de verschillende klimaatscenario's. Voor de veiligheid is het echter wel interessant te kijken naar de hydraulische effecten van de verschillende maatregelen tijdens maatgevend hoogwater bij verschillende klimaatscenario's.

9.2.3 Uitbreiding van het aantal cases

Er is bij deze studie een keuze gemaakt tussen de verschillende maatregelen. Er wordt aanbevolen om voor het complete overzicht ook simulaties te maken met de andere maatregelen en met de in het Ruimte voor Rijntakken voorgestelde combinaties van maatregelen. Hierbij kan dan ook de grootschalige uiterwaardverlaging worden meegenomen in combinatie met het verwijderen van zomerkades.

9.2.4 Verbeteringen aan SOBEK

Het programma SOBEK is niet altijd even inzichtelijk opgebouwd en vaak zijn er veel muishandelingen nodig om veranderingen aan een bepaald model te doen

Enkele ideeën voor verbeteringen aan SOBEK zijn:

- de mogelijkheid om macro's te schrijven wanneer bepaalde handelingen vaak moeten worden uitgevoerd;
- meer mogelijkheden om dingen zonder de muis in te voeren; bij veel programma's is het mogelijk met toetsencombinaties en sneltoetsen bepaalde dingen te doen, in SOBEK is dit niet mogelijk;
- het makkelijker maken de invoervelden in te vullen, bijvoorbeeld met een "autocomplete" functie
- alle schermen van SOBEK in één venster zetten. Op dit moment staan de verschillende schermen ieder in hun eigen venster. Dit maakt het soms lastig om het juiste scherm "terug te vinden";
- de mogelijkheid om een bestaand model te bekijken eenvoudiger maken. Wanneer je bijvoorbeeld verschillende doorsneden met elkaar wilt vergelijken is dit niet mogelijk zonder veel handelingen te verrichten.

9.2.5 Voor kwantitatieve analyses

Voordat het mogelijk is kwantitatieve analyses te doen, is het noodzakelijk meer onderzoek te doen naar alle zaken die ook al eerder zijn genoemd in hoofdstuk 8.

Er moet echter goed worden overwogen of de behoefte aan kwantitatieve analyses wel zo groot is dat er op dit moment zoveel werk in moet worden gestoken. De onzekerheden zullen immers kleiner worden naarmate de tijd vordert en de problemen als gevolg van klimaatverandering spelen op lange termijn.

9.3 Tot slot

Het is mogelijk om met de instrumenten die er nu zijn kwalitatief iets te zeggen over de effecten van bepaalde maatregelen bij bepaalde klimaatscenario's. Hoewel de conclusies nog met de nodige voorzichtigheid moeten worden betocht zijn er enkele duidelijke trends te onderscheiden in de resultaten van de berekeningen.

Klimaatverandering blijkt invloed te kunnen hebben op de grootte van de effecten op de morfologie bij het toepassen van bepaalde maatregelen. De grootte van de invloed van de meeste maatregelen is echter meestal veel kleiner dan de invloed van de klimaatverandering zelf op de morfologie. Een belangrijke factor daarbij is de afvoer- en sedimentverdeling. Deze wordt beïnvloed door de hydraulische veranderingen als gevolg van klimaatverandering, maar is echter ook te beïnvloeden door maatregelen in de verschillende takken van de rivier of door de lokale geografie van het splitsingspunt te veranderen.

Literatuurverwijzingen

1. Andel, T.H. van (1994), *New views on an old planet : a history of global change*, Cambridge University Press, Cambridge
2. Berger, A.L. (1976), 'Obliquity and precession for the last 5,000,000 years', *Astron. Astrophys.*, 51, p. 127-135
3. Breen, L. van (2002), *De morfologische effecten van grootschalige uiterwaardverlaging - een stochastische benadering*, Delft University of Technology, Delft
4. Buchdahl, J. (1995), *Global Climate Change – Student Guide*, Global Climate Change Information Programme, Manchester Metropolitan University, Manchester
5. Douglas, B.C. e.a. (2001), *Sea Level Rise - History and Consequences*, Academic Press, San Diego
6. Fischer, A.G. (1984), 'The two Phanerozoic supercycles'. In: W.A. Bergren e.a. (eds.), *Catastrophes and Earth History: the new uniformitarianism*, Berggren, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, p.129-150
7. Foukal, P.V. (1990), *The variable Sun*, Scientific American, 262(2), p.34-41
8. Gough, D.O. (1990), 'On possible origins of relatively short-term changes in the solar structure', *Phil. Trans. Royal Soc. London, A*, 330, p.627-640
9. Hays, J.D., Imbrie, J. & Shackleton, N.J. (1976), 'Variations in the Earth' s orbit: Pacemaker of the ice ages', *Science*, 194, p. 1121-1132
10. Holthuijsen, L.H. (1998), *Toegepaste fysische oceanografie*, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Technische Universiteit Delft, Delft
11. Huggett, R.J. (1991), *Climate, Earth Processes and Earth History*, Springer-Verlag, p.281
12. IPCC (1995), Working Group I, *Climate Change 1995 – The Science of Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge
13. IPCC (2000), Working Group III, *Special Report on Emissions Scenarios - Summary for Policymakers*, IPCC, Geneva
14. IPCC (2001), Working Group I, *Climate Change 2001 – The Scientific Basis*, Cambridge University Press, Cambridge
15. Jansen, P. Ph. e.a. (1994), *Principles of River Engineering; the non-tidal alluvial river*, Delftse Uitgeversmaatschappij, Delft
16. Jesse, P. en Kroekenstoel, D.F. (2001), *1-D Morfologisch model Rijntakken. Verslag calibratie en validatie*, Rijkswaterstaat RIZA, RIZA-rapport 2001.040
17. Kelly, P.M. & Sear, C.B. (1984), 'Climatic impact of explosive volcanic eruptions', *Nature*, 311, p. 740-743
18. Kors, A.G. e.a. (2000), *Scenario' s externe krachten voor WB2*, Rijkswaterstaat RIZA
19. Können, G.P. e.a. (1997), *Meteorologie ten behoeve van de 'Vierde Nota Waterhuishouding'*, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt
20. Kroekenstoel, D.F. (2001), *Morfologische berekeningen t.b.v. Spankrachtstudie*, Rijkswaterstaat RIZA
21. Lamb, H.H. (1995), *Climate, history and the modern world*, Routledge, New York
22. Lassen, K en E.Friis-Christensen (1991), 'Length of the solar cycle: An indicator of solar activity closely associated with climate', *Science* 254, p. 698-700
23. Milankovitch, M.M. (1969), *Canon of Insolation and the Ice Age Problem*, Königlich Serbische Academie, Belgrade, 1941. Engelse vertaling door: Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem
24. RIZA (1999), *Screening van Maatregelen*, Rijkswaterstaat RIZA, RvR-rapport 99.04
25. Sear, C.B., Kelly, P.M., Jones, P.D. & Goodess, C.M. (1987), 'Global surface-temperature responses to major volcanic eruptions', *Nature*, 330, p. 365-367

26. Silva e.a., W. (2000), *Ruimte voor Rijntakken – Wat het onderzoek ons heeft geleerd*, Rijkswaterstaat directie Oost-Nederland
27. Sloff, Kees e.a. (1999), *RvR effecten morfologie*, Rijkswaterstaat RIZA
28. Termes, A.P.P. e.a. (1998), *Uitbreiding SOBEK-model Rijntakken*, HKV Lijn in water, PR138
29. Veen, R. van der e.a. (2001), *Bouw en calibratie SOBEK-Rijn, versie 2000.1 t/m 2000.3*, Rijkswaterstaat RIZA, RIZA-rapport 2001.xx (in prep.)
30. Vellinga, P. e.a. (1999), *Broeikaseffect, Klimaatverandering en het Weer*, IVM, Amsterdam
31. Weiss, N.O. (1990), 'Periodicity and aperiodicity in solar magnetic activity', *Phil. Trans. Royal Soc. London, A*, 330, p.617-626
32. Williams, G.E. (1975), 'Possible relation between periodic glaciation and the flexure of the Galaxy', *Earth Planet Sci. Lett.*, 26, p.361-369
33. WLDelft Hydraulics (2001), SOBEK Help Desk, *SOBEK River/Estuary, User Manual*, WLDelft Hydraulics, Delft

Morfologische effecten
door
klimaatverandering
bij de toepassing van
Ruimte voor Rijntakken maatregelen

Bijlagen

Bijlagen bij eindverslag afstudeerproject
Kenji Tollenaar

Bijlagen

- A. Gegevens voor de reconstructie van de geschiedenis van het klimaat
- B. Scenario's
 - 1. Temperatuur
 - 2. Zeespiegel
 - 3. Rivierafvoer – Profielen
 - 4. Rivierafvoer – Afvoerreeksen
- C. Rivierkilometers
- D. Controle – berekeningen
- E. Lijst van maatregelen bij Aanvullende Maatregelen I
- F. Lijst van maatregelen bij Aanvullende Maatregelen II
- G. Referentie – simulaties
- H. Case – simulaties
 - 1. Grootschalige Uiterwaardverlaging, variant 1
 - 2. Grootschalige Uiterwaardverlaging, variant 2
 - 3. Verwijderen hydraulisch knelpunt Lexkesveer
 - 4. Zomerbedverlaging

A Gegevens voor de reconstructie van de geschiedenis van het klimaat

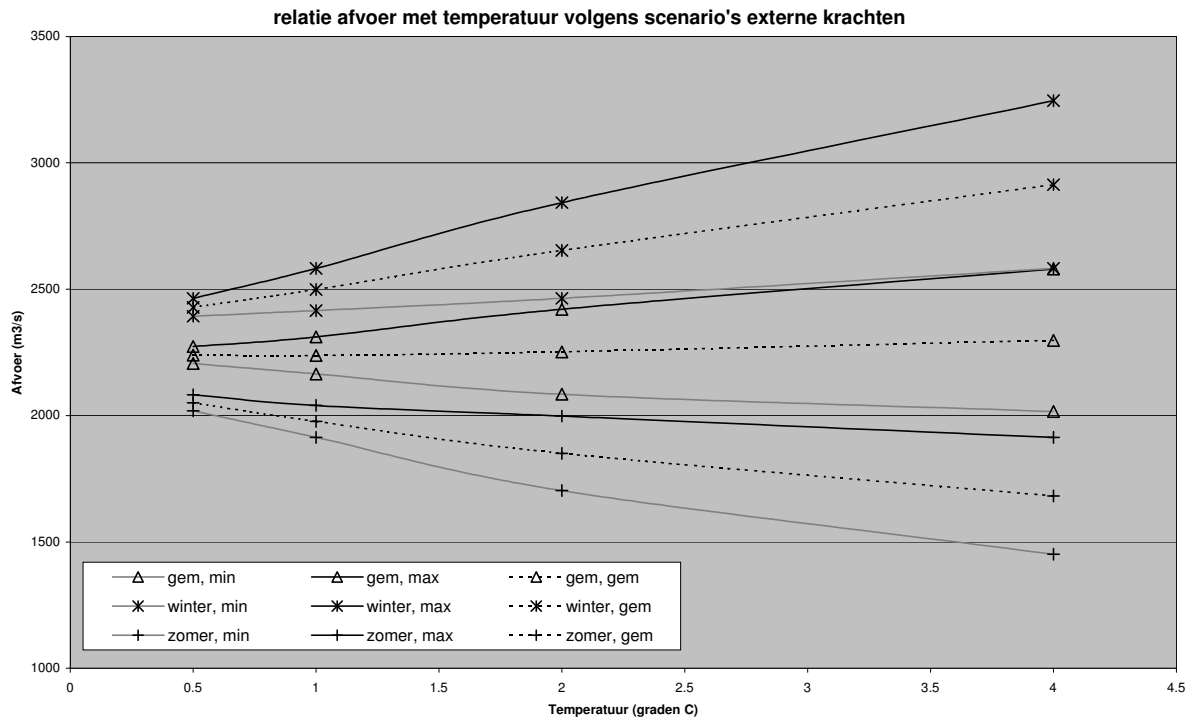
De onderstaande tabel is overgenomen uit Lamb (1995), p. 102-107.

Soort gegevens	betreffende elementen van het klimaat	resolutie van de observaties	vertraging	gegevens sinds	gebied
standaard meteorologische instrumenten: barometer, thermometer, neerslagmeter	luchtdruk, temperatuur, neerslag, wind, enz.	-	-	1650 - 1670 in delen van Europa	uitgebreid tot het grootste deel van Antarctica in 1956
atmosferische instrumenten	temperatuur, luchtvochtigheid, luchtdruk, wind	-	-	jaren ' 30 in delen van Europa en Noord Amerika, eerder al enkele meetstations op bergen in Europa	Noordelijk halfrond vanaf 1949, Zuidelijk halfrond sinds 1957
instrumenten op schepen	watertemperatuur	-	-	rond 1850, eerder fragmenten vanaf 1780	de eerste 50-80 jaar voornamelijk Atlantische Oceaan
beschrijvende weerlogboeken	wind, neerslagfrequenties, enz.	dagelijks	-	eerste voorbeelden van de 14 ^e eeuw tot de 16 ^e eeuw	delen van Europa, verspreide gegevens van vroege expedities o.a. in Noord Amerika
scheepsjournalen	wind, neerslagfrequenties, enz.	dagelijks tot meerdere malen per dag	-	1670 - 1700, en geïsoleerd, enkele reizen vroeger	Europese wateren en enkele langere reizen naar Indië en het Verre Oosten
andere historische documenten als verslagen van landbouw, militaire operaties, enz.	weer, vooral extremen en lange periodes van droogte, vorst, sneeuw, hitte, kou, enz.	verschillend van elk seizoen tot dagelijks	-	vanaf ongeveer 1100, incidenteel veel eerder, rond het begin van de jaartelling	vanaf 1100 is een compleet overzicht van de meest "dramatische" gebeurtenissen in Europa samen te stellen
waterstanden in rivieren	neerslag en verdamping	verschillend van jaarlijks tot dagelijks	enkele uren tot een half jaar	622 n. Chr., incidentele fragmenten vanaf 3100 v. Chr.	de eerste gegevens zijn van de Nijl
waterstanden in meren	neerslag en verdamping	enkele jaren	tot 15 jaar	1650 n. Chr.	de eerste gegevens zijn van Siberische meren

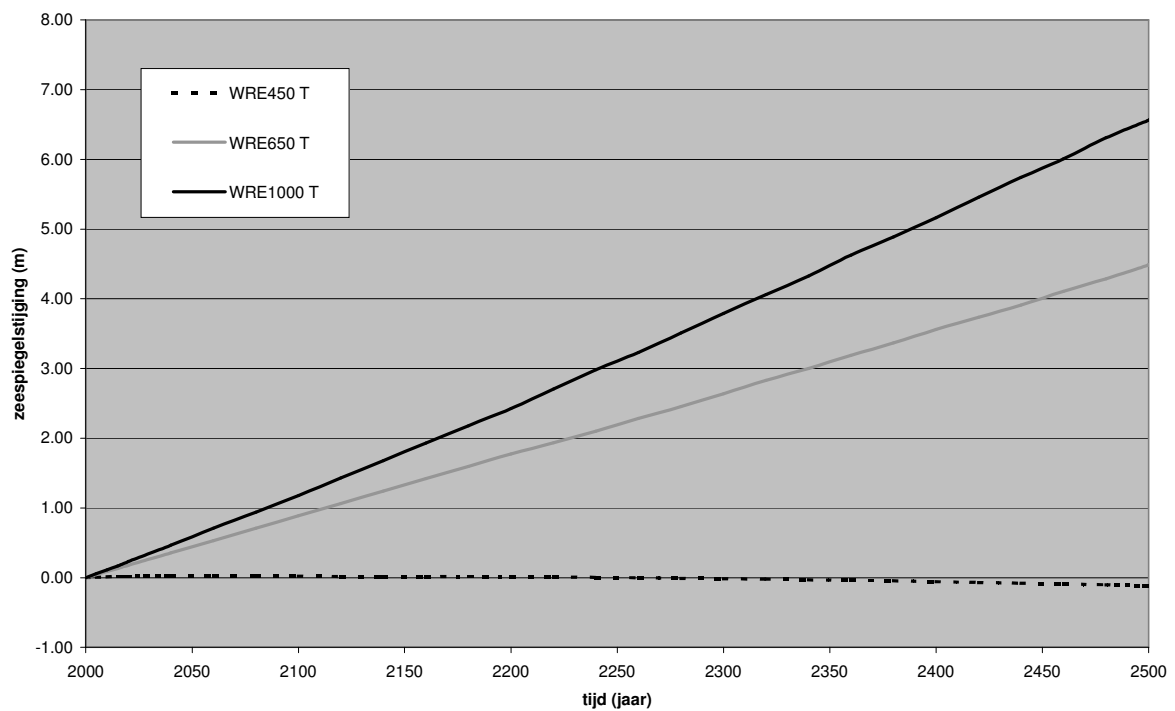
Soort gegevens	betreffende elementen van het klimaat	frequentie van de observaties	vertraging	gegevens sinds	gebied
jaarringen van bomen	temperatuur, neerslag	ringbreedte: 1 jaar, celstructuur: 1 tot 5 weken	de ringbreedte is afhankelijk van het weer tot in de afgelopen 15 maanden	vanaf 4000 tot 6000 v. Chr. in het zuidwesten van de Verenigde Staten	uiteindelijk is het mogelijk een verslag te maken van 10.000 jaar in delen van Europa
varves (jaarlagen in onderwaterbodems)	stroming, neerslag	jaarlijks	dagen of weken	ongeveer 8000 v. Chr. 2200 v. Chr.	Zweden, het noorden van de Verenigde Staten en Japan de Krim (verschillende meren met varves kunnen nog worden ontdekt)
jaarlagen in ijskappen	sneeuwval	1 jaar	-	ongeveer 1000 n. Chr	Noord Groenland, Zuidpool
Gletsjers	temperatuur, duur van het smeltseizoen, zonneschijn en bewolking, sneeuwval	afhankelijk van de gerbuikte techniek	ongeveer 10 tot 20 jaar, afhankelijk van de grootte en vorm van het terrein	de laatste ijstijd, 17.000 tot 20.000 jaar geleden	De meeste bergachtige gebieden en op lagere breedtegraden
metingen van stabiele isotopen, voornamelijk ¹⁸ O					
(a) op ijskappen	temperatuur, sneeuwval	enkele dagen of weken	-	5.000-10.000 jaar geleden	voornamelijk Groenland en Antarctica
(b) op jaarringen van bomen	temperatuur, neerslag	30 jaar in het gunstigste geval	-	200 n. Chr.	Californië, later ook Europa (1350)
(c) op organisch sediment	temperatuur	varierend van 100 jaar tot 2500 jaar	-	onbekend	de oceanen
pollen analyse	temperatuur en neerslag	ongeveer 100 jaar	enkele jaren bij ongunstige omstandigheden tot 5000 jaar na een ijstijd	vanaf 125.000 jaar geleden op 1 of twee locaties een continue serie	gehele wereld
insecten	temperatuur en neerslag	ongeveer 100 jaar	tot tientallen jaren	op z' n minst 300.000 jaar geleden	beperkt tot nu toe
mariene microfauna	water-temperatuur	van 100 tot 2500 jaar	-	500.000 tot 1.000.000 jaar geleden	voorbeelden van alle oceanen

B Scenario's

B.1 Temperatuur

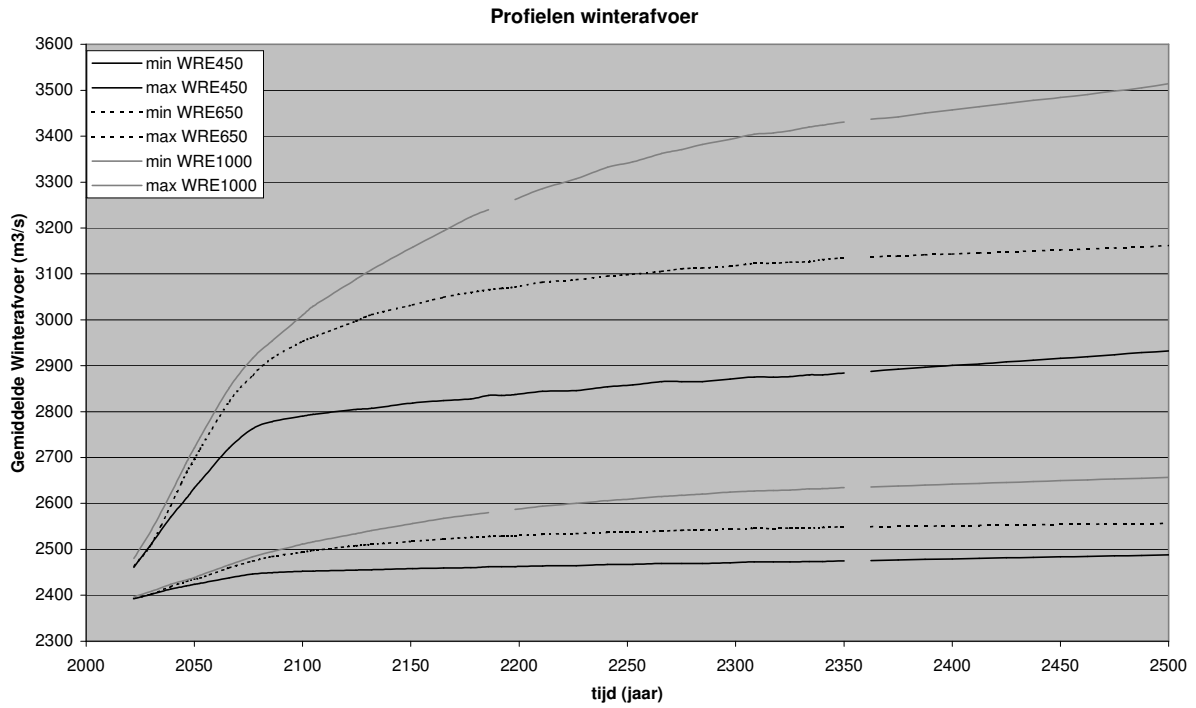


B.2 Zeespiegel

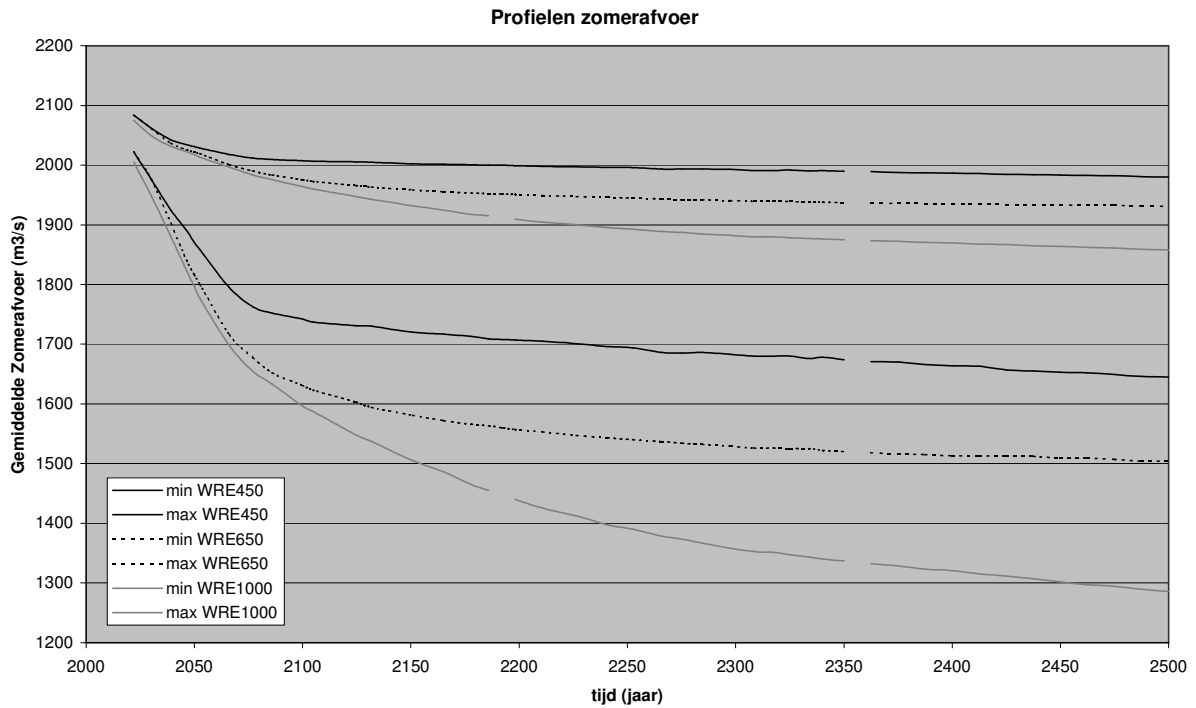


B.3 Rivierafvoeren – Profielen

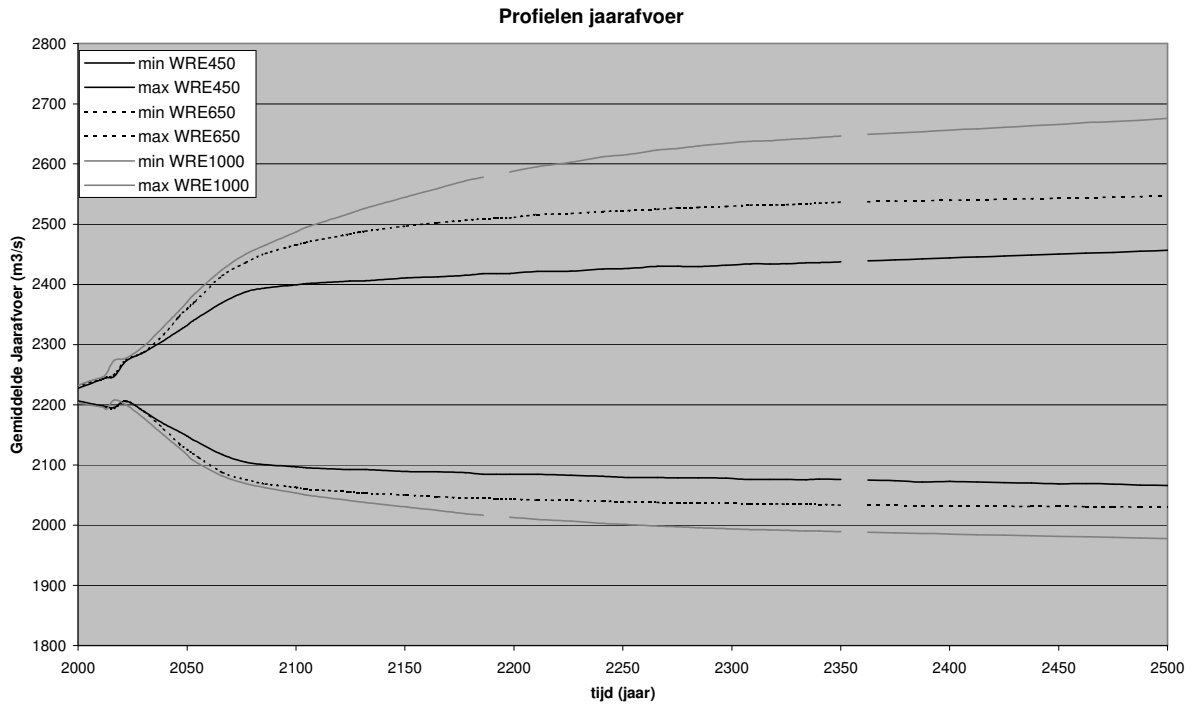
Winterafvoer



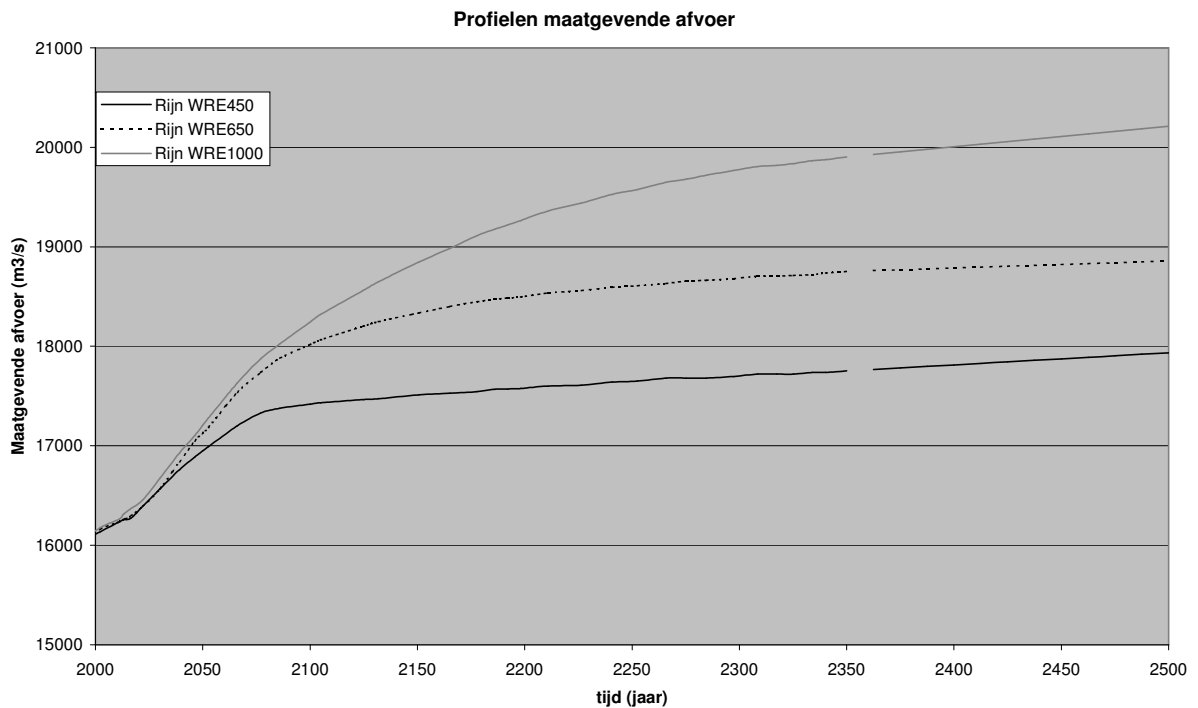
Zomerafvoer



Jaarafvoer

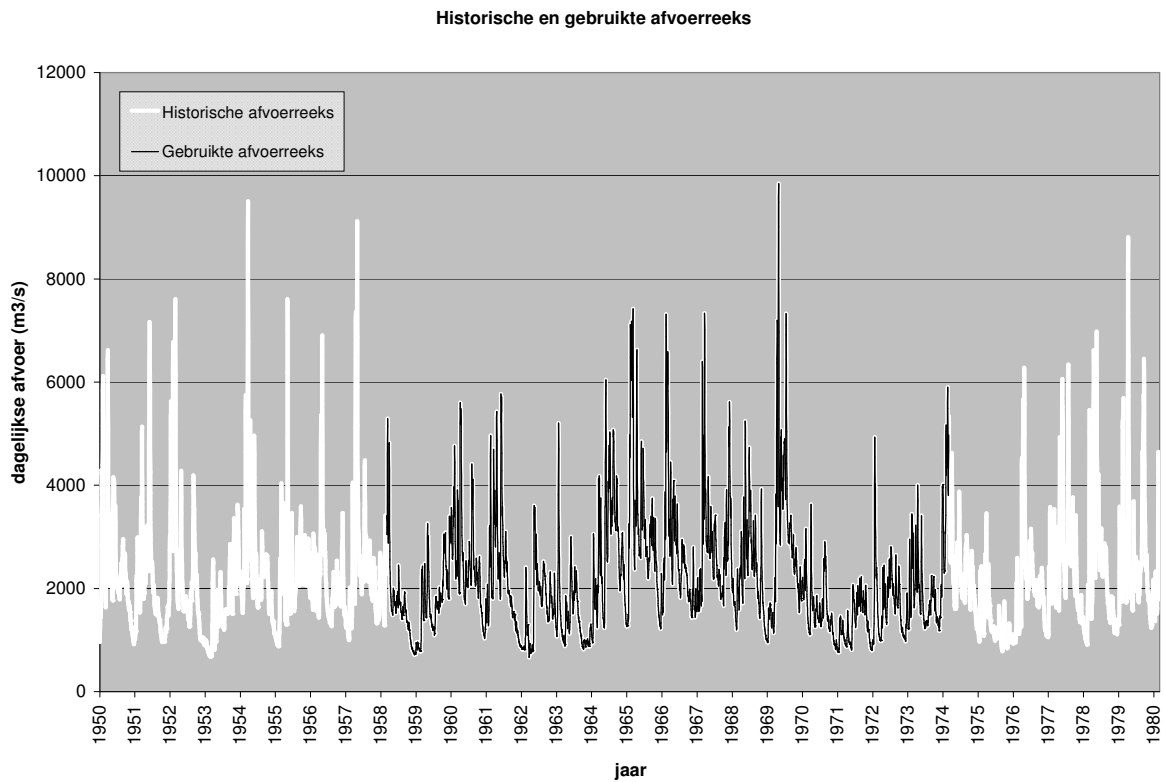


Maatgevende afvoer

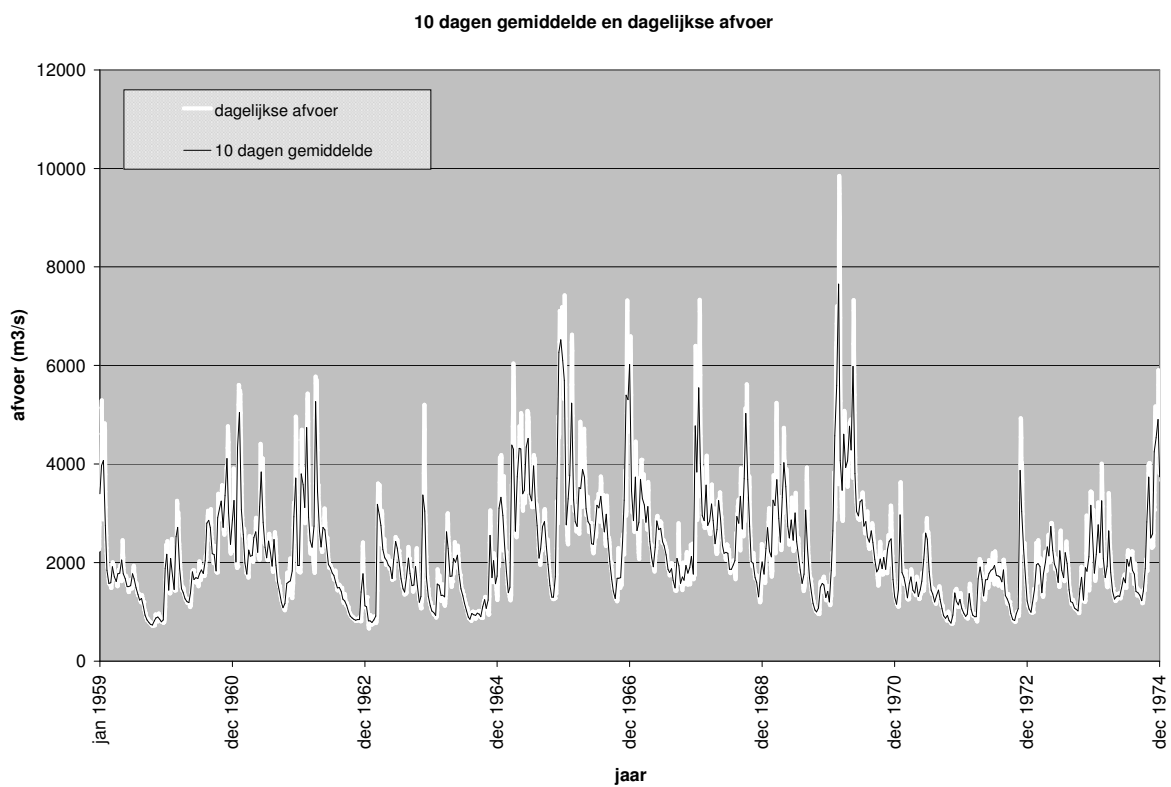


B.4 Afvoerreeksen

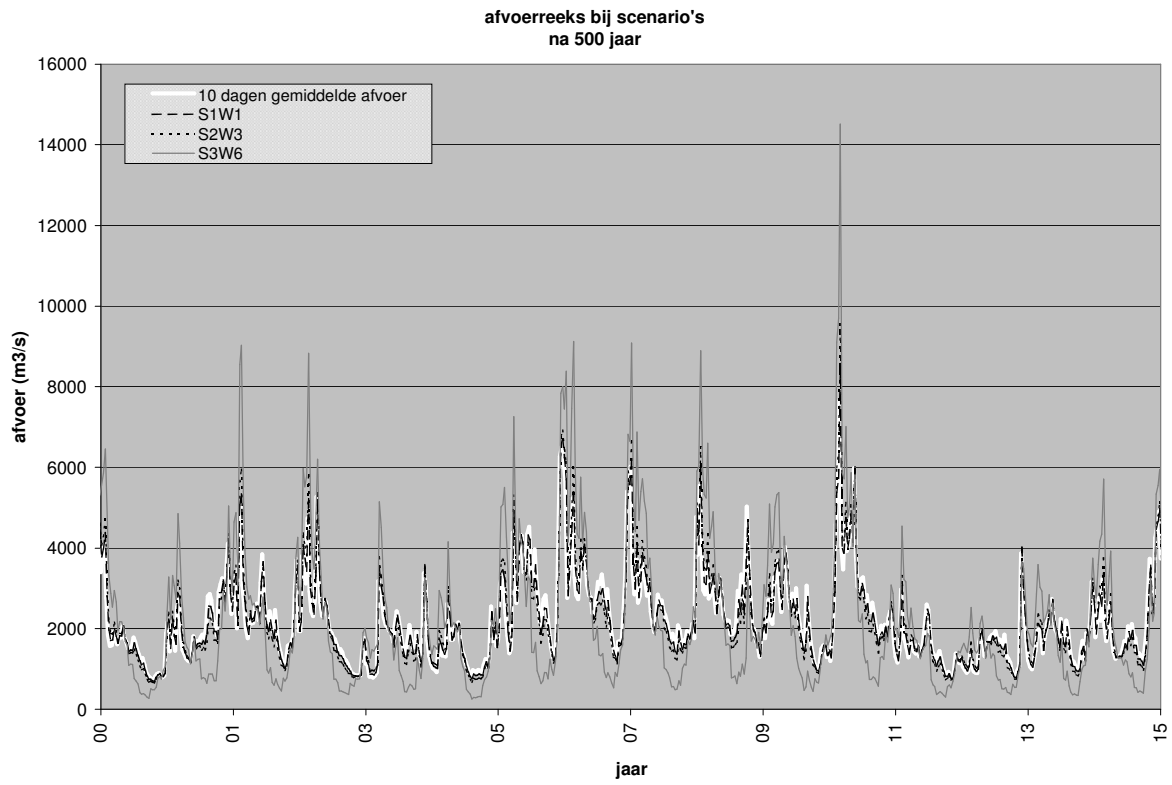
Historische en gebruikte reeks met dagelijkse afvoeren



10 dagen gemiddelde afvoer



Afvoer bij 3 scenario's



C Rivierkilometers



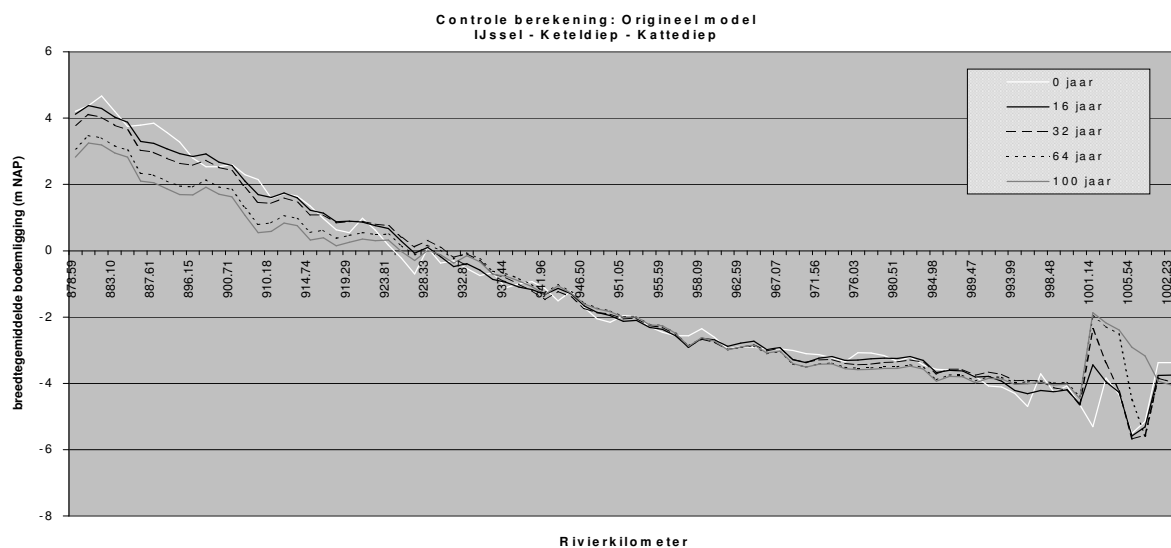
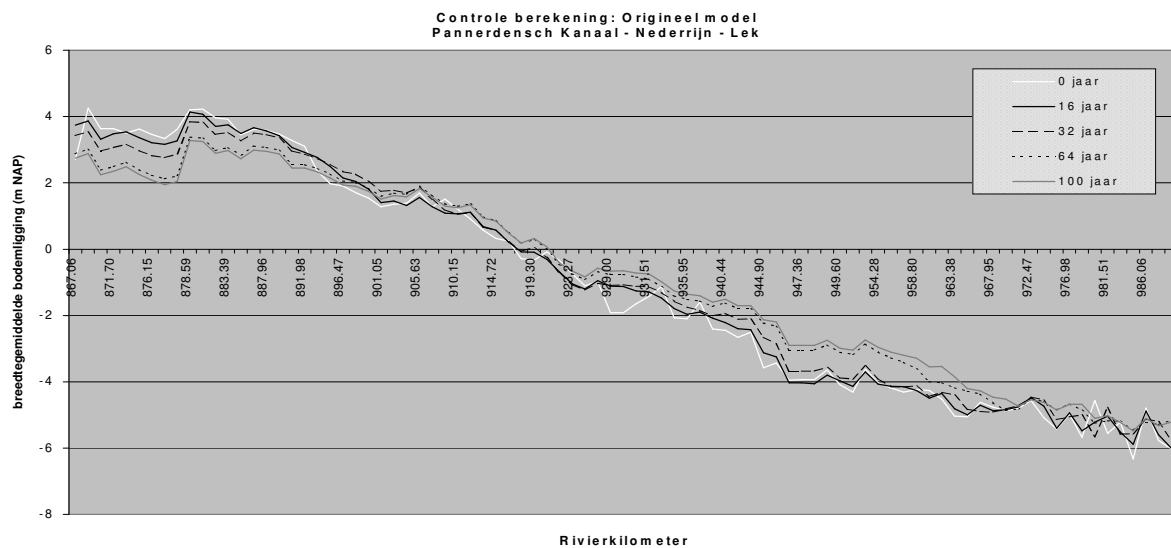
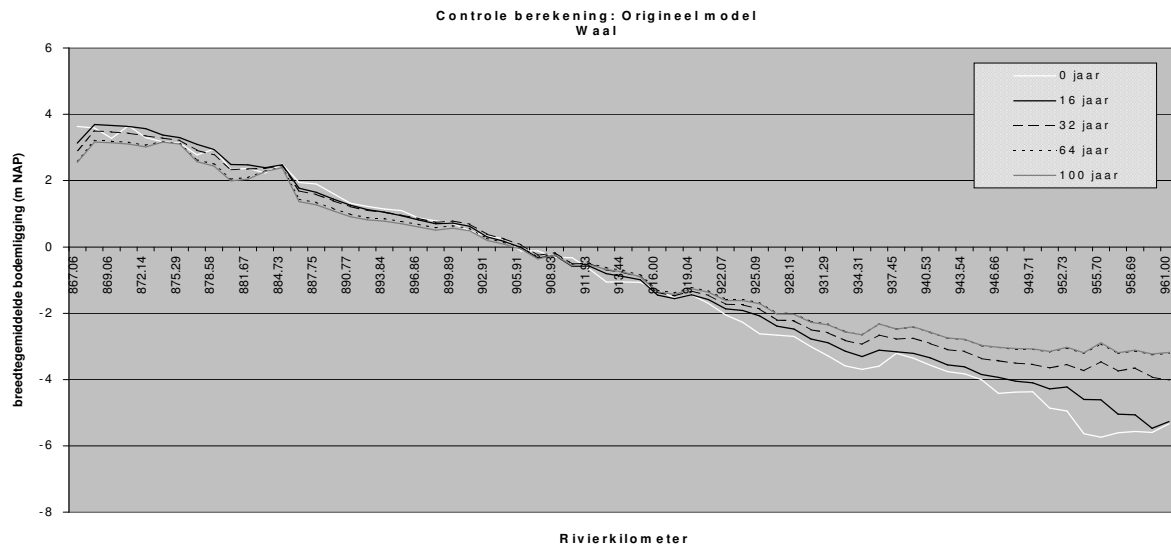
Rivierkilometers langs de Rijntakken in Nederland

Bovenrijn/Waal	km	Nederrijn/Lek	km	IJssel	km
Ruhrort	781,10	IJsselkop	878,60	IJsselkop	878,60
Pannerdensche Kop	867,46	Arnhem	883,00	Arnhem	883,00
Erlecom	875,00	Driel	891,50	Doesburg	900,00
Nijmegen	884,00	Lexkesveer	900,20	Zutphen	920,00
Ochten	906,00	Rhenen	909,90	Deventer	940,00
Tiel	915,25	Amerongen	918,80	Olst	955,00
St. Andries	926,00	Culemborg	935,00	Wijhe	965,00
Zaltbommel	934,30	Hagestein	948,60	Zwolle	978,00
Gorinchem	954,70	Schoonhoven	970,00	Kampen	998,00
Werkendam	961,00	Krimpen a/d Lek	988,60		

Lijst met steden en rivierkilometers (bron: <http://www.shipmate.de>)

D Controle berekeningen

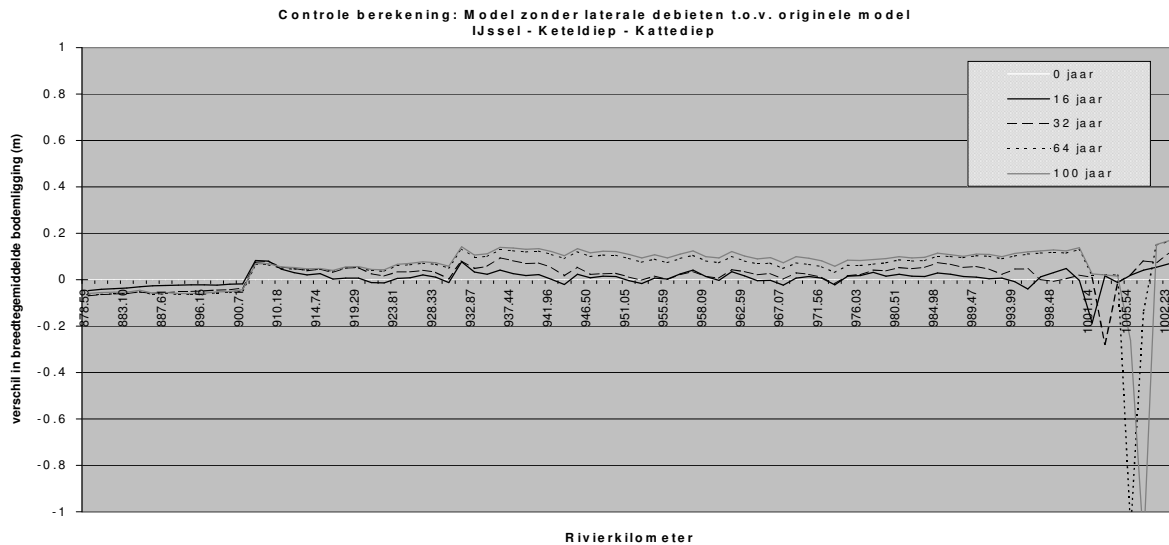
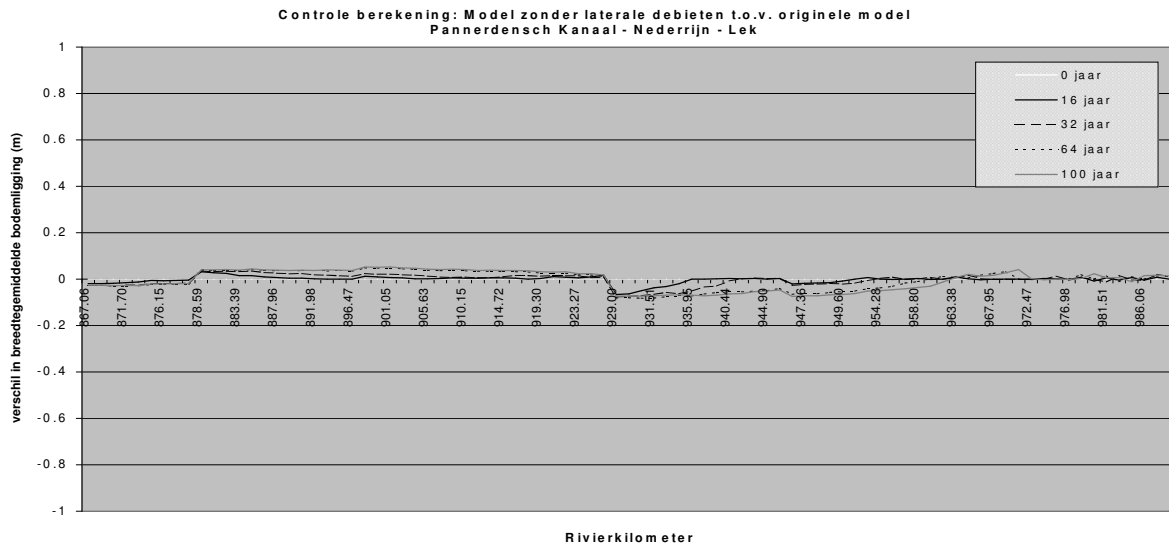
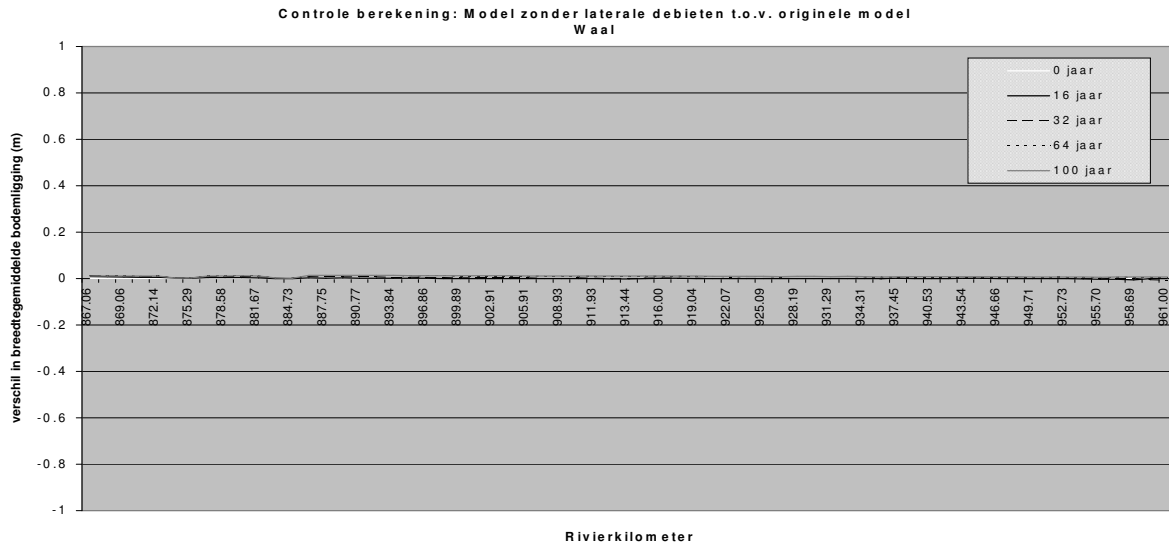
D.1 Origineel model, 100 jaar



De breedtegemiddelde bodemligging in de verschillende takken. Uitvoer van het originele model, zonder aanpassingen.

D.2 Zonder laterale debieten, 100 jaar

- zonder laterale debieten

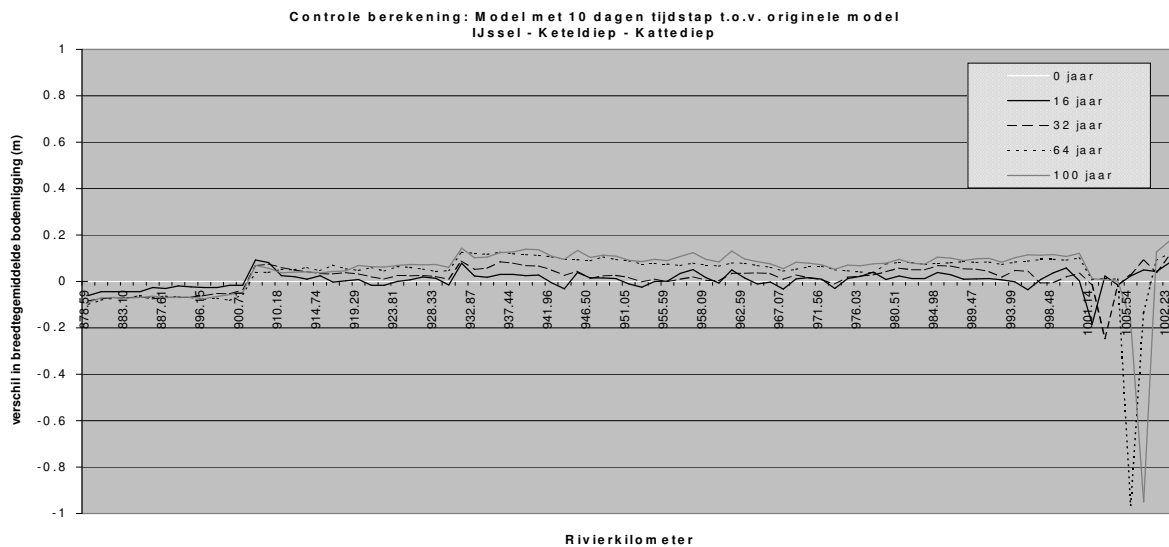
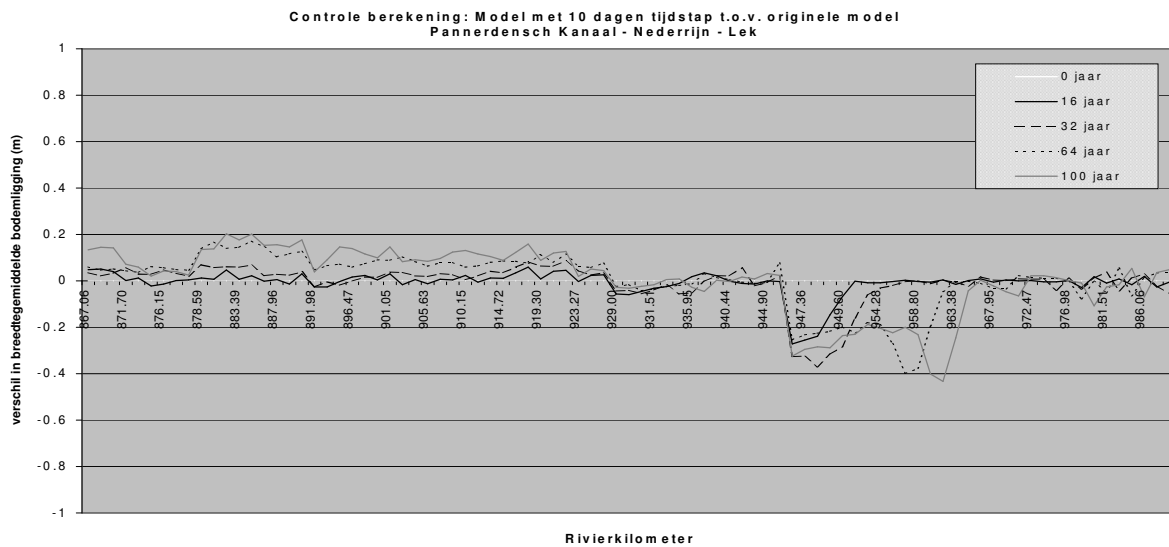
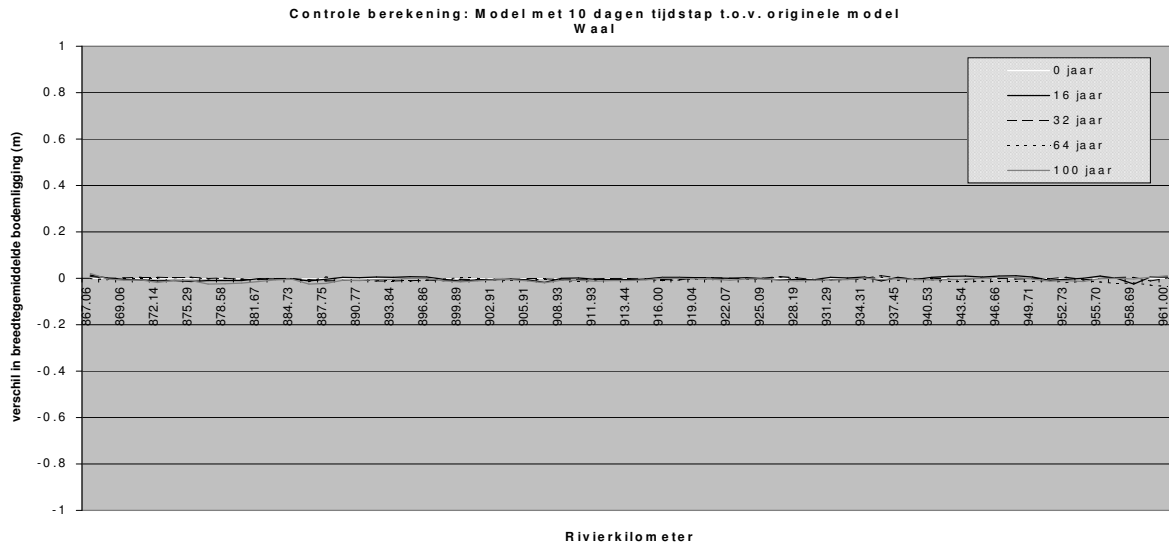


De breedtegemiddelde bodemligging in de verschillende takken na verwijdering van de laterale debieten

D.3 Met 10 dagen tijdstap, 100 jaar

- zonder laterale debieten

- 10 dagen tijdstap



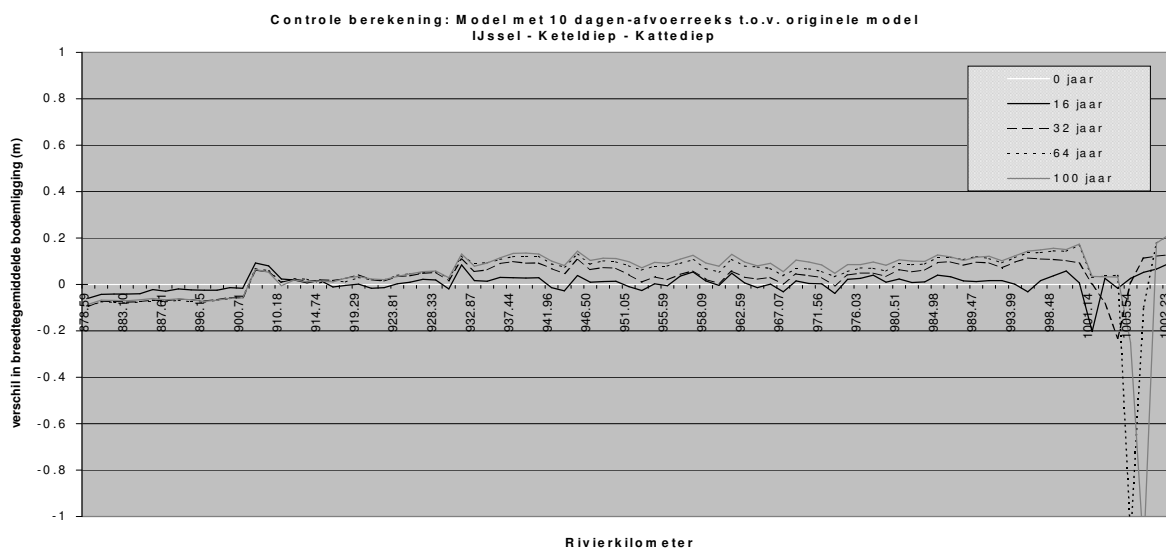
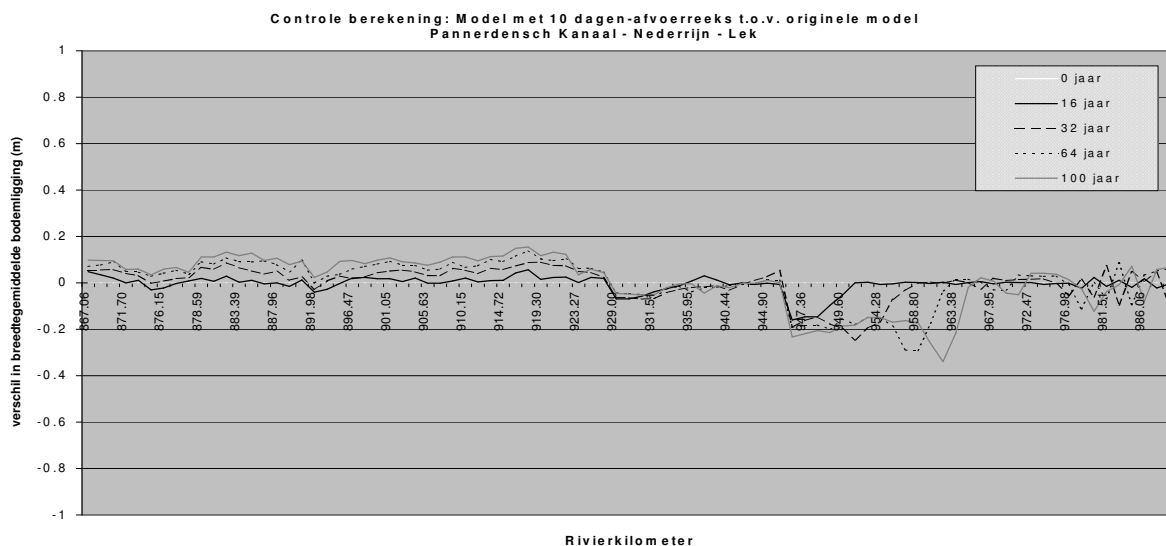
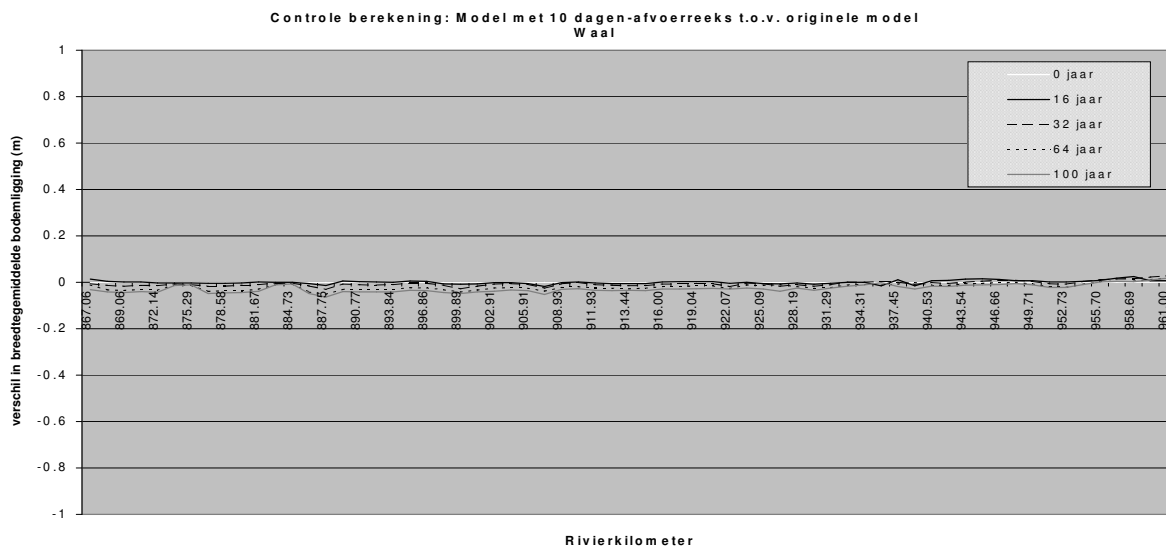
De breedtegemiddelde bodemligging in de verschillende takken na toevoegen van een 10 dagen tijdstap

D.4 Met 10 dagen-afvoerreeks, met 10 dagen tijdstap, 100 jaar

- zonder laterale debieten

- 10 dagen-gemiddelde afvoerreeks

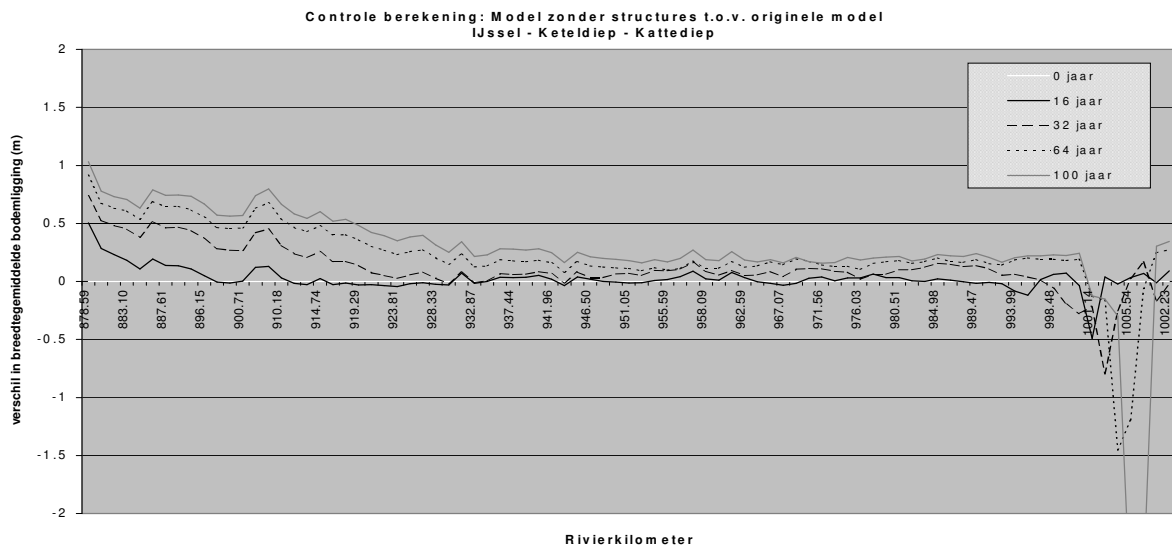
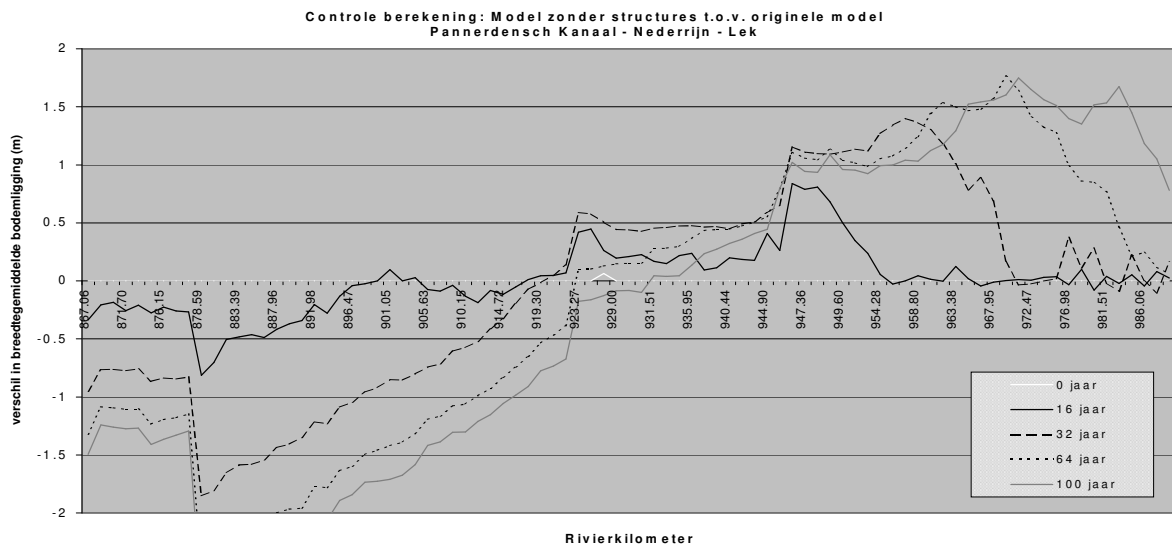
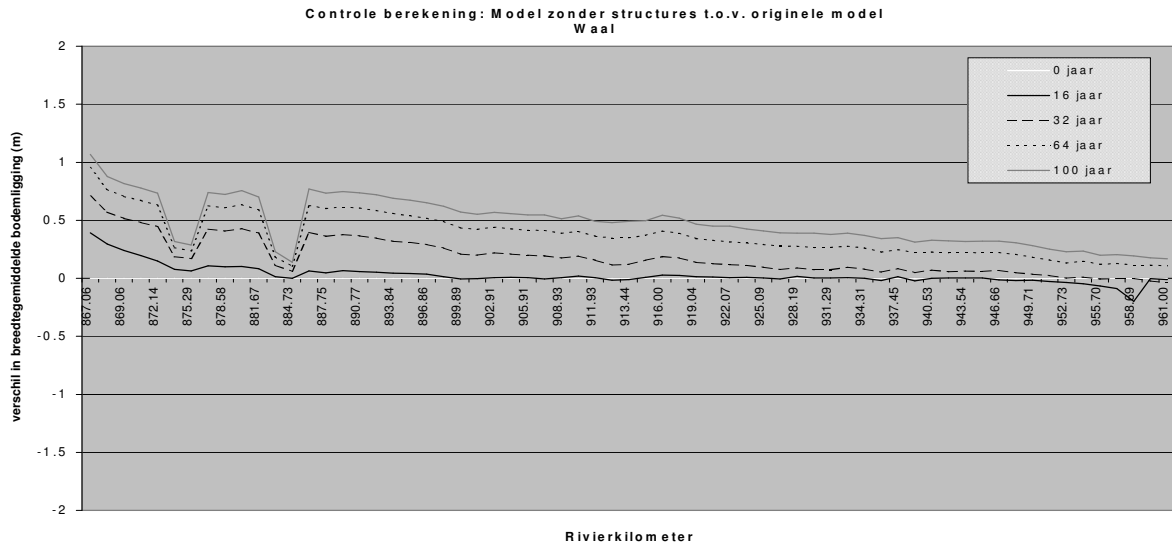
- 10 dagen tijdstap



De breedtegemiddelde bodemligging in de verschillende takken na het toepassen van een 10 dagen afvoerreeks

D.5 Zonder structures, 100 jaar

- zonder laterale debieten
- zonder structures



De breedtegemiddelde bodemligging in de verschillende takken nadat de stuwen zijn verwijderd uit het model

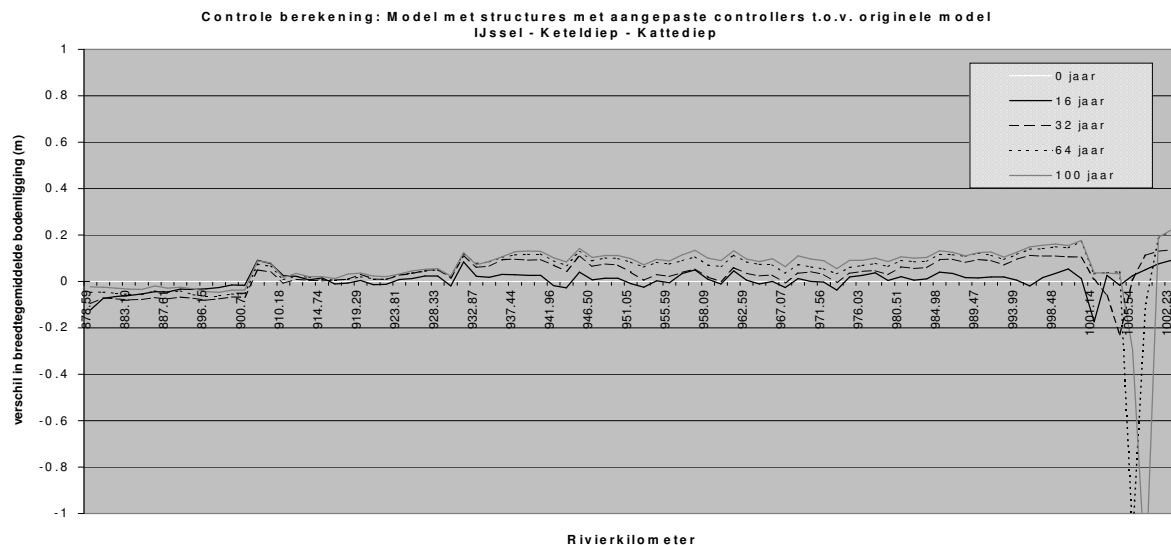
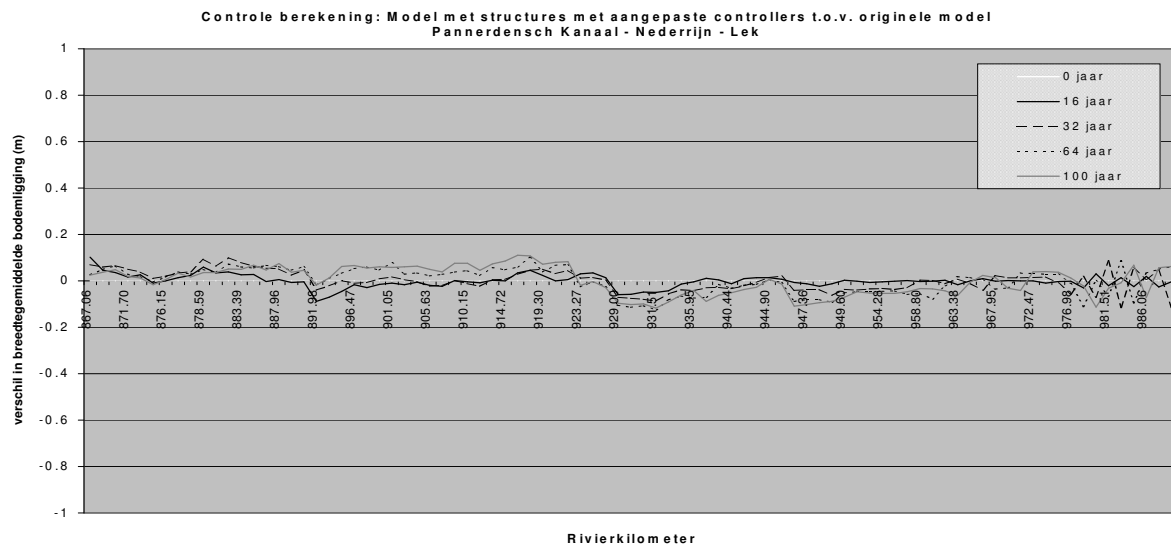
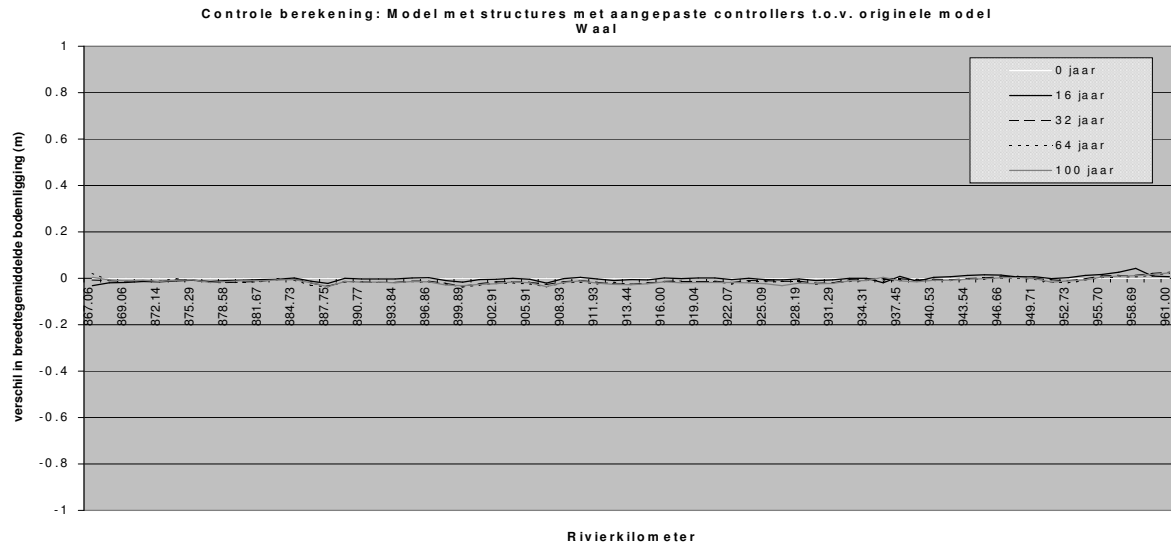
D.6 Met structures, afhankelijk van het debiet op de Bovenrijn, 100 jaar

- 10 dagen tijdstap

- 10 dagen-gemiddelde afvoerreeks

- zonder laterale debieten

- structures, afhankelijk van debiet op de Bovenrijn

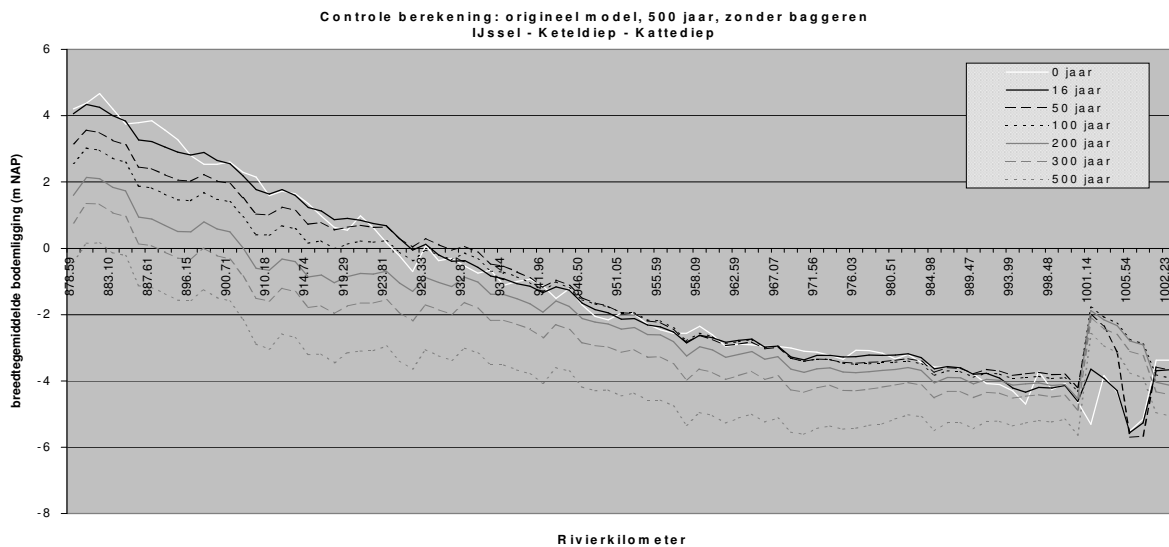
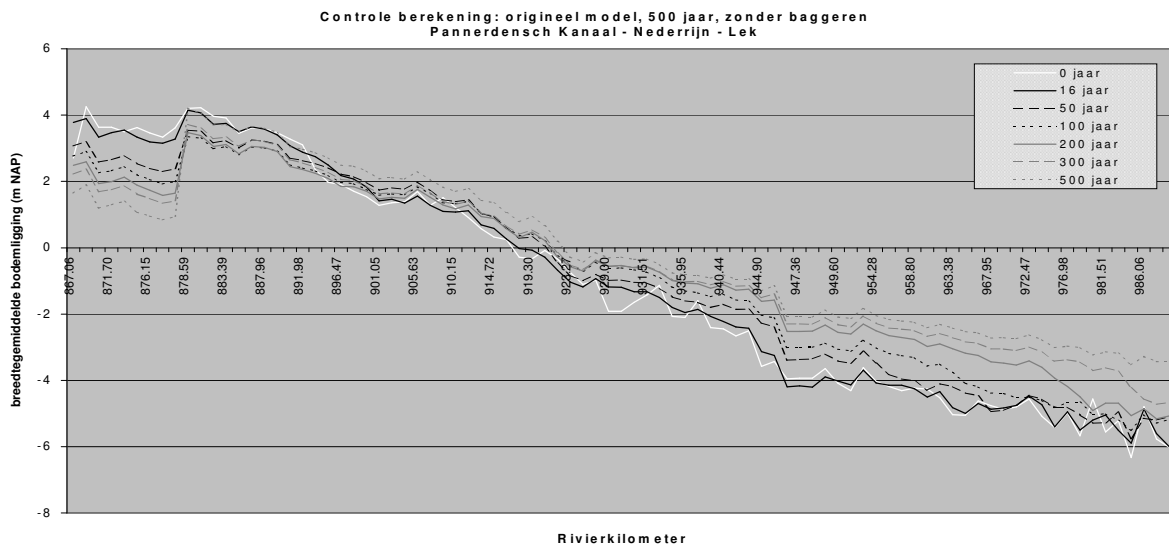
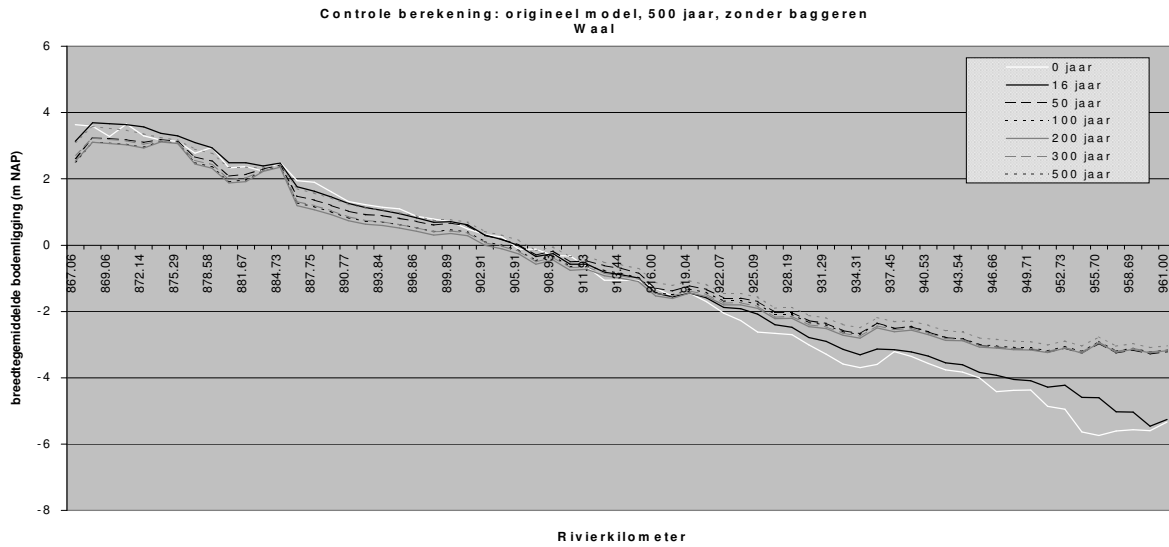


De breedtegemiddelde bodemligging in de verschillende takken na aanpassing van de controllers van de stuwen in het model

D.7 500 jaar

- 10 dagen tijdstap
- zonder laterale debieten

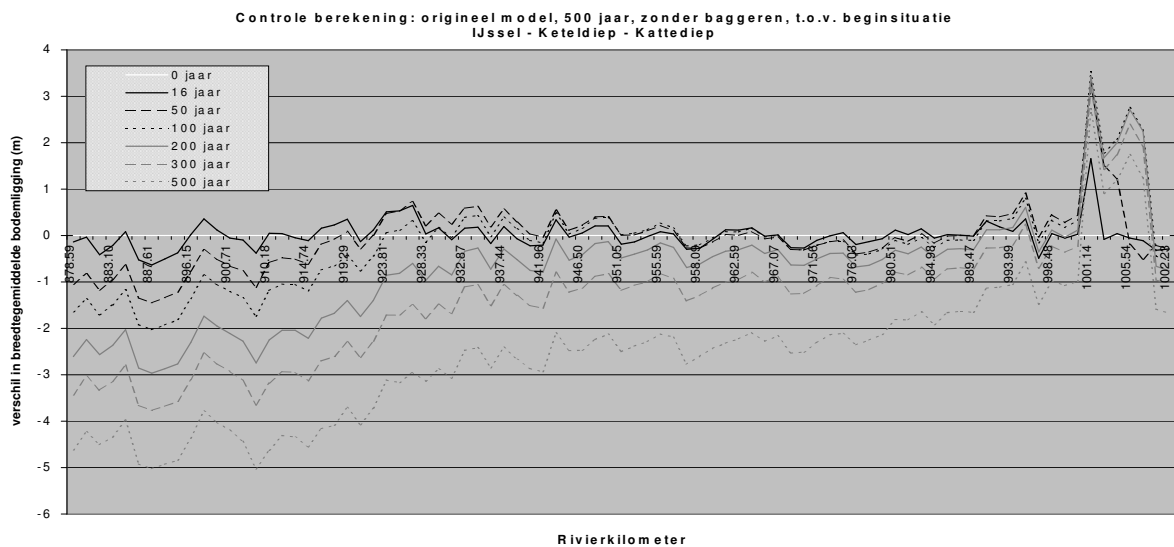
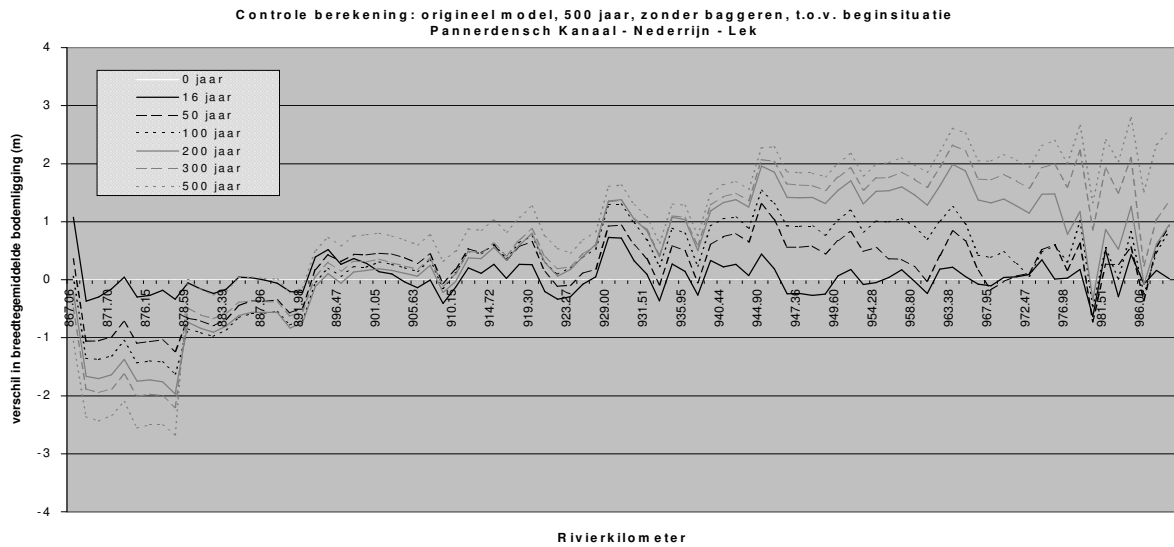
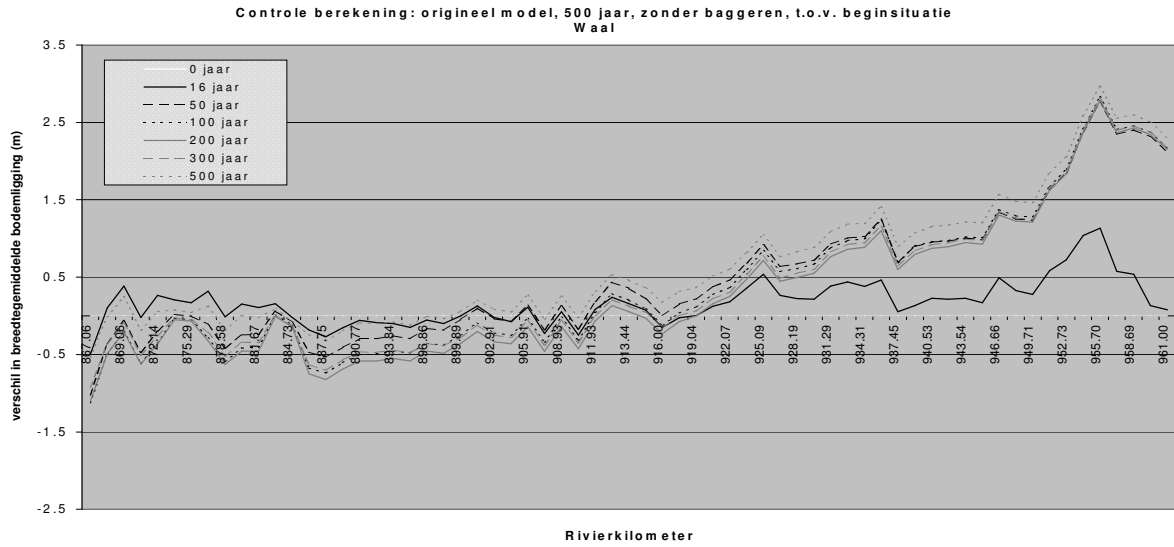
- 10 dagen-gemiddelde afvoerreeks
- geen baggerwerkzaamheden



De breedtegemiddelde bodemligging in de verschillende takken bij een simulatie van 500 jaar, zonder onderhoudsbaggerwerkzaamheden.

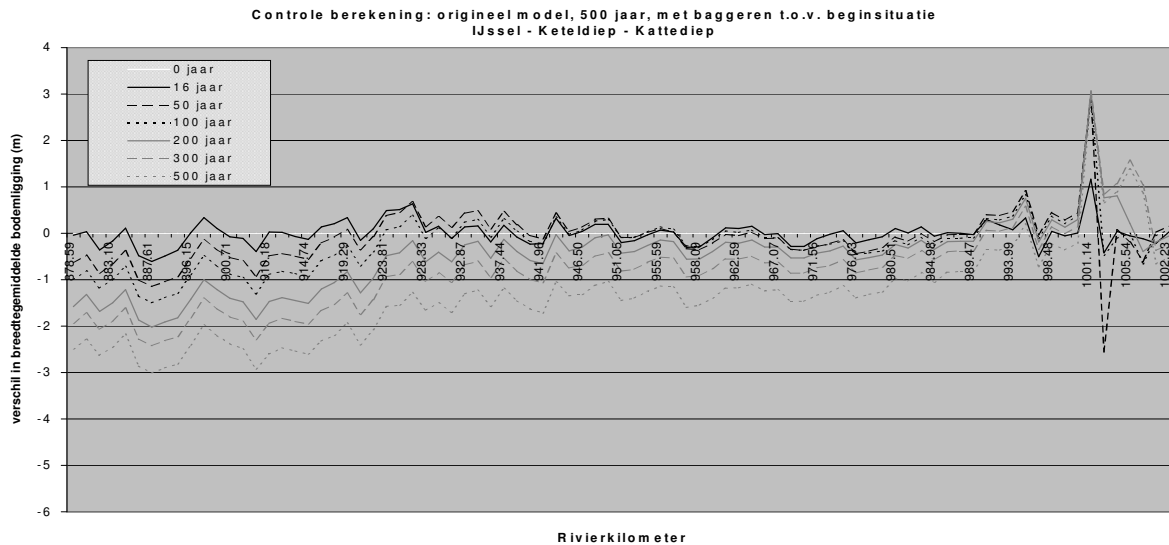
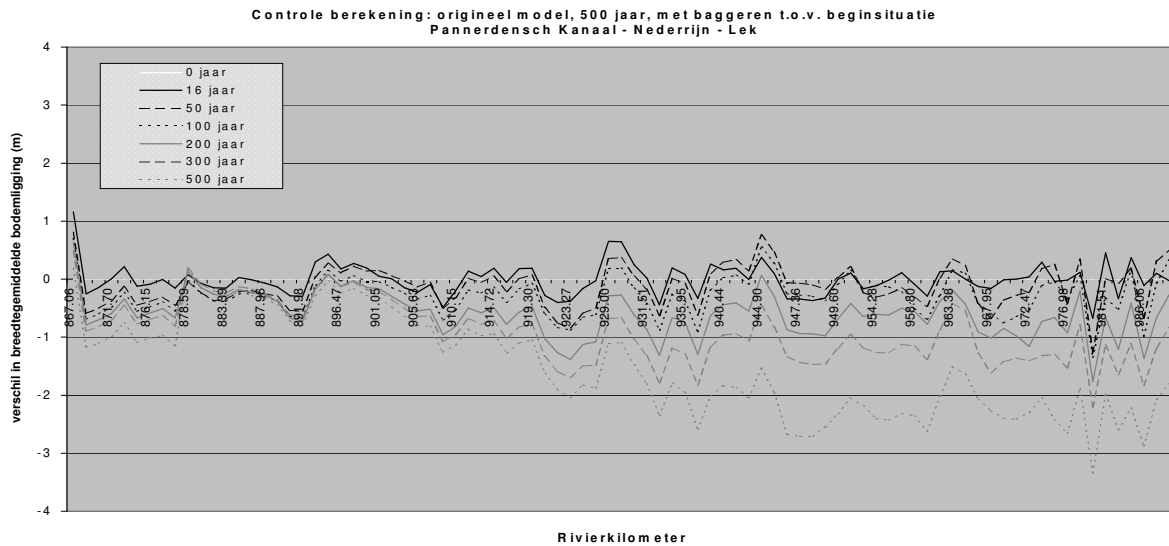
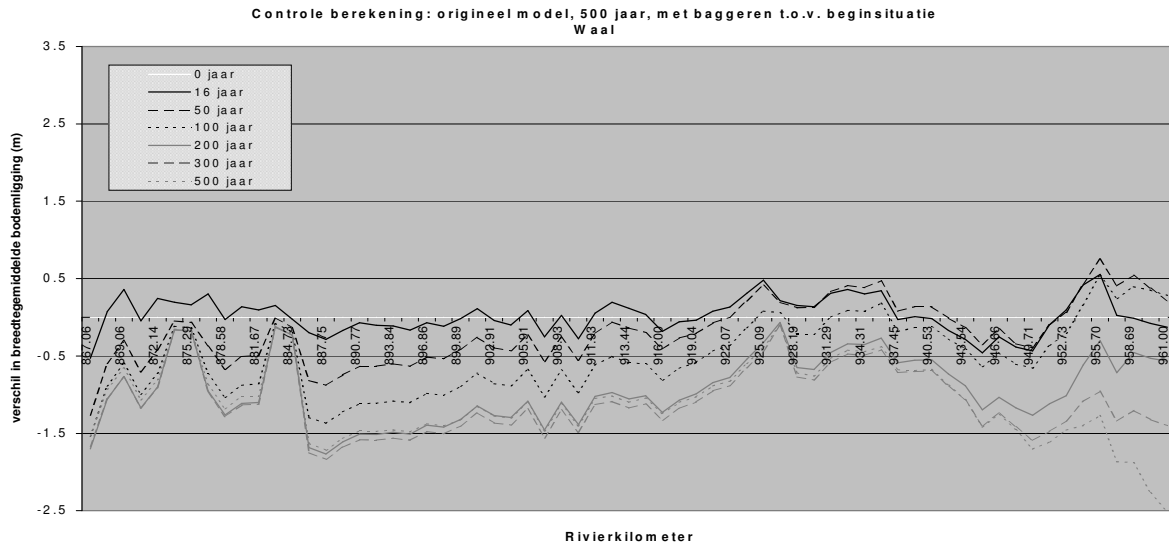
- 10 dagen tijdstep
- zonder laterale debieten

- 10 dagen-gemiddelde afvoerreeks
- geen baggerwerkzaamheden



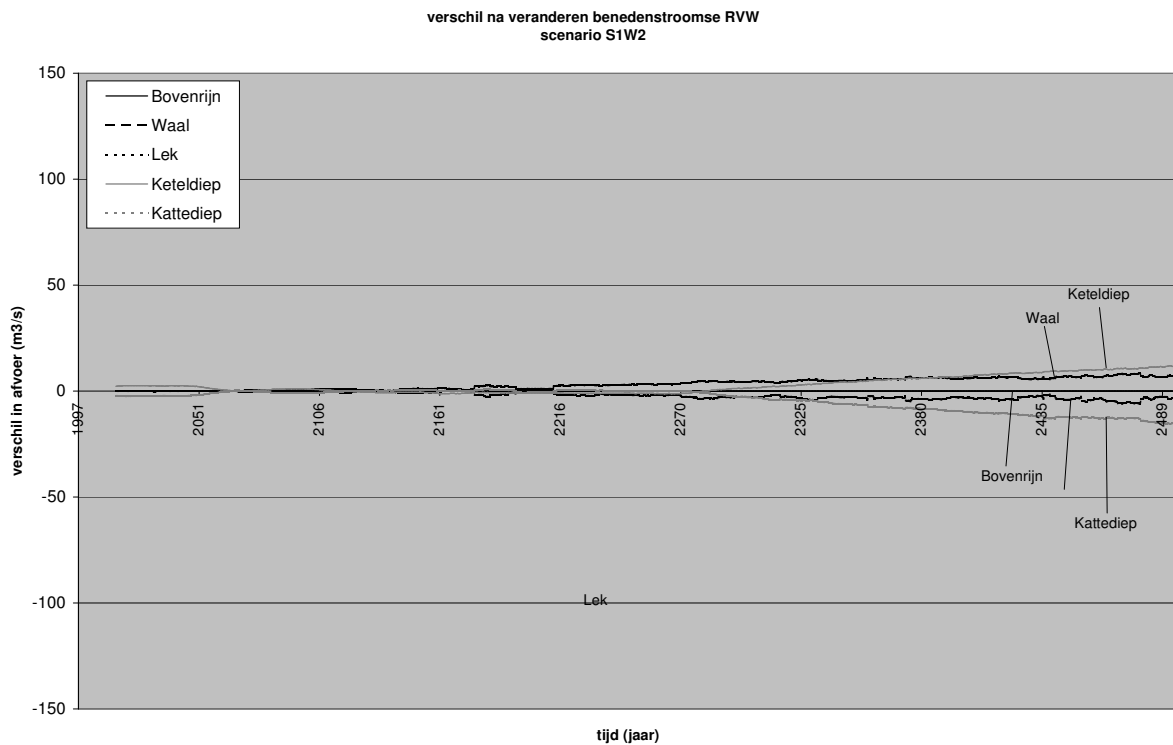
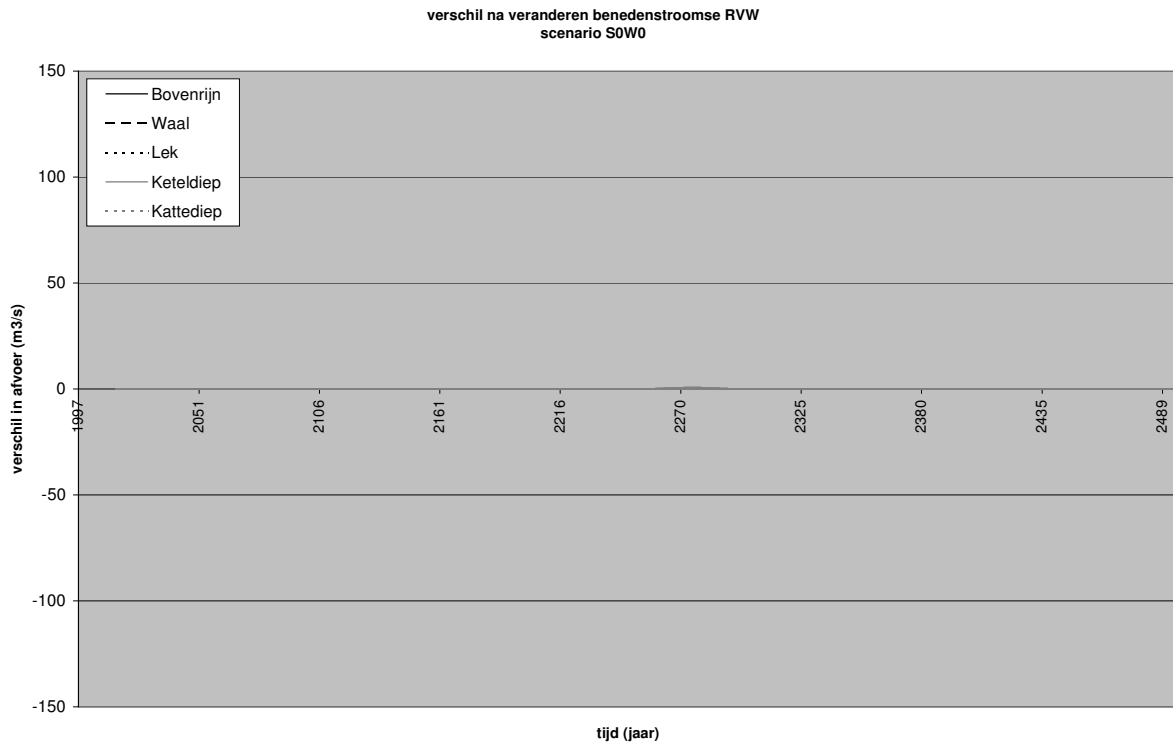
De breedtegemiddelde bodemligging in de verschillende takken bij een simulatie van 500 jaar, zonder onderhoudsbaggerwerkzaamheden, ten opzichte van de beginsituatie.

D.8 Met alle vereenvoudigingen, met baggerwerkzaamheden, 500 jaar

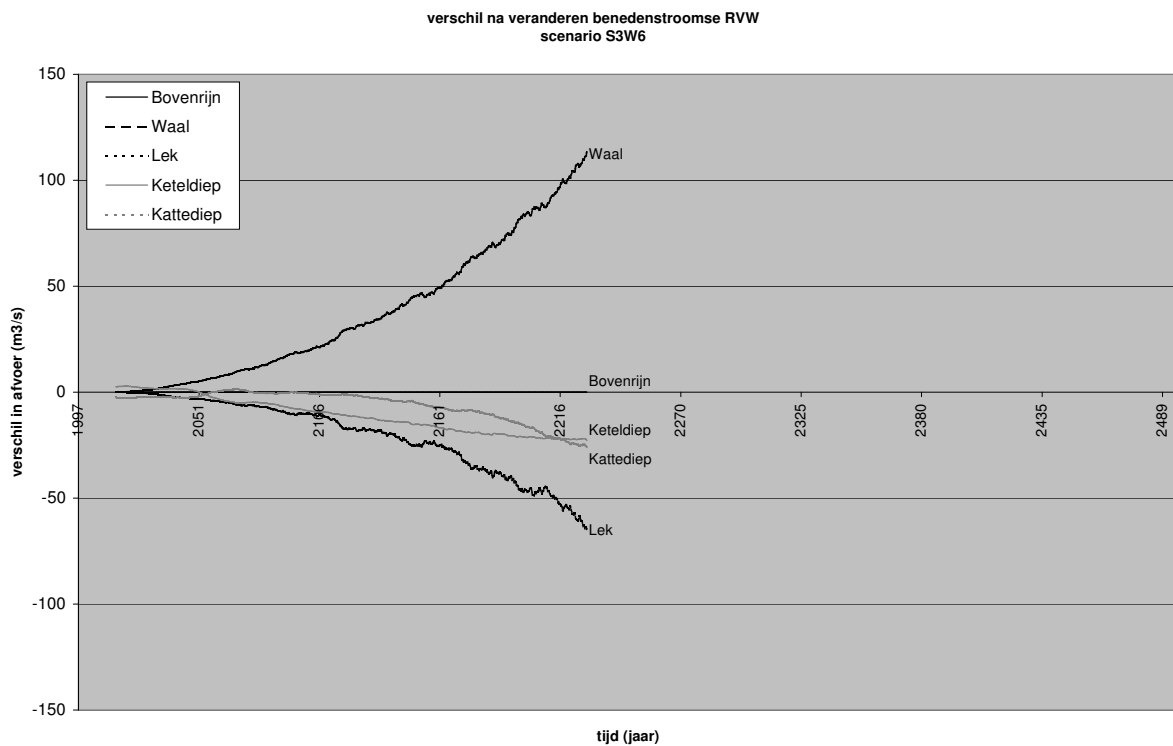
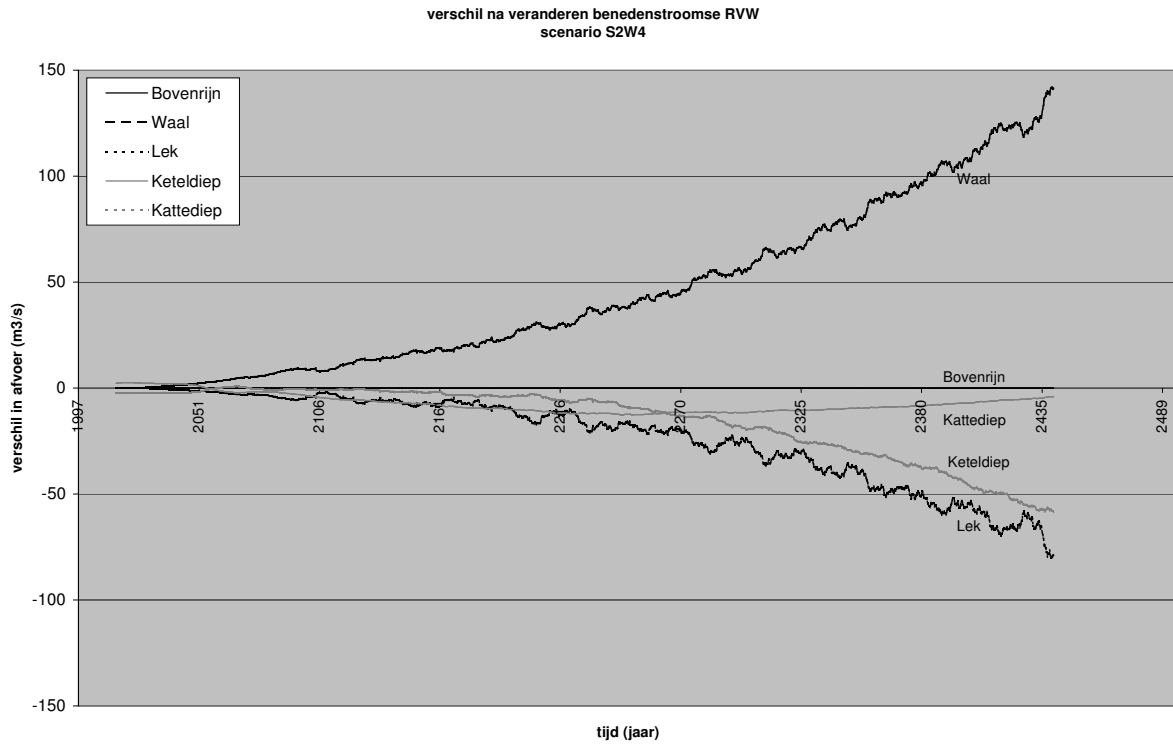


De breedtegemiddelde bodemligging in de verschillende takken bij een simulatie van 500 jaar, met onderhoudsbaggerwerkzaamheden, ten opzichte van de beginsituatie.

D.9 Veranderen benedenstroomse randvoorwaarde



Het verschil aan de benedenstroomse randen van de verschillende takken tussen de gemiddelde vooraf bepaalde afvoer en de gemiddelde gesimuleerde afvoer bij de aanpassing van de benedenstroomse randvoorwaarde resp. bij klimaatscenario's S0W0 en S1W2.



Het verschil aan de benedenstroomse randen van de verschillende takken tussen de gemiddelde vooraf bepaalde afvoer en de gemiddelde gesimuleerde afvoer bij de aanpassing van de benedenstroomse randvoorwaarde resp. bij klimaatscenario's S2W4 en S3W6.

E Lijst van maatregelen bij Aanvullende Maatregelen I

tak	vanaf km	tot km	lengte km	oppervlakte m2	gedeelte	volume m3
Bovenrijn	857.3	861.3	4	326000	100%	1000000
Bovenrijn	862.4	866.3	3.9	2417000	64%	2800000
Bovenrijn	864	866.2	2.2	227000	100%	500000
Bovenrijn	865.5	867.3	1.8	45000	100%	100000
Bovenrijn	866.3	867.3	1	2271000	72%	3500000
Nederrijn / Lek	878.9	881.7	2.8	384000	100%	900000
Nederrijn / Lek	880	886.1	6.1	24000	83%	100000
Nederrijn / Lek	880.6	887.6	7	1194000	61%	1500000
Nederrijn / Lek	886.1	890.3	4.2	1072000	88%	2100000
Nederrijn / Lek	887.6	894.3	6.7	600000	98%	1000000
Nederrijn / Lek	891	894.3	3.3	1143000	93%	2300000
Nederrijn / Lek	894.3	897.2	2.9	1136000	99%	1900000
Nederrijn / Lek	894.3	896.7	2.4	531000	17%	200000
Nederrijn / Lek	896.7	900.1	3.4	268000	57%	300000
Nederrijn / Lek	897.2	900.1	2.9	1493000	100%	1700000
Nederrijn / Lek	900.1	901.9	1.8	318000	100%	400000
Nederrijn / Lek	900.1	903.2	3.1	557000	82%	600000
Nederrijn / Lek	901.9	906	4.1	2233000	99%	2800000
Nederrijn / Lek	903	905.8	2.8	503000	53%	600000
Nederrijn / Lek	906	910.2	4.2	530000	100%	800000
Nederrijn / Lek	908.1	912.2	4.1	235000	88%	400000
Nederrijn / Lek	910.2	914.1	3.9	518000	95%	200000
Nederrijn / Lek	912.8	916.4	3.6	902000	87%	600000
Nederrijn / Lek	914.1	918.6	4.5	1034000	91%	1100000
Nederrijn / Lek	916.4	920.7	4.3	2108000	61%	100000
Nederrijn / Lek	920.7	923.2	2.5	50000	98%	100000
Nederrijn / Lek	923.2	928.8	5.6	756000	100%	1100000
Nederrijn / Lek	923.7	926.1	2.4	984000	99%	2000000
Nederrijn / Lek	923.8	928.8	5	1949000	97%	4000000
Nederrijn / Lek	929.2	931.2	2	266000	100%	400000
Nederrijn / Lek	929.2	932.5	3.3	978000	99%	1800000
Nederrijn / Lek	931.2	936.1	4.9	1715000	79%	1600000
Nederrijn / Lek	932.5	937.5	5	1100000	100%	1000000
Nederrijn / Lek	936.1	938.4	2.3	792000	82%	900000
Nederrijn / Lek	937.5	944	6.5	1009000	100%	700000
Nederrijn / Lek	941	946.5	5.5	1001000	52%	200000
Nederrijn / Lek	944	946.6	2.6	628000	96%	300000
Nederrijn / Lek	946.6	949.4	2.8	161000	100%	300000
Nederrijn / Lek	946.9	950.3	3.4	707000	100%	1000000
Nederrijn / Lek	950.5	951.7	1.2	326000	100%	600000
Nederrijn / Lek	950.7	952.9	2.2	397000	100%	500000
Nederrijn / Lek	951.7	957.6	5.9	2551000	90%	2800000
Nederrijn / Lek	953.3	959.1	5.8	1203000	97%	1300000
Nederrijn / Lek	957.8	962.3	4.5	739000	96%	900000
Nederrijn / Lek	959.2	964.7	5.5	224000	71%	200000
Nederrijn / Lek	962.5	966.8	4.3	314000	48%	200000
Nederrijn / Lek	965.3	969.6	4.3	435000	100%	300000
Pannerdensch Kanaal	869.3	873.3	4	727000	100%	1600000

tak	vanaf km	tot km	lengte km	oppervlakte m2	gedeelte	volume m3
Pannerdensch Kanaal	872.4	876.8	4.4	2430000	100%	4600000
Pannerdensch Kanaal	873.3	878.5	5.2	1369000	99%	2500000
Pannerdensch Kanaal	876.8	878.8	2	2015000	99%	3600000
Waal	867.3	874.7	7.4	4449000	81%	5800000
Waal	867.5	870.4	2.9	2428000	9%	100000
Waal	870.7	878.2	7.5	3079000	81%	3400000
Waal	875.7	897.5	21.8	1024000	100%	1900000
Waal	878.2	883.5	5.3	3108000	85%	4000000
Waal	879.5	883.4	3.9	1669000	58%	1700000
Waal	883.4	887.2	3.8	163000	91%	400000
Waal	883.5	888.5	5	1705000	98%	3400000
Waal	887.2	890.8	3.6	1541000	99%	2800000
Waal	888.5	893.8	5.3	1031000	91%	2000000
Waal	890.8	893.8	3	580000	100%	1400000
Waal	893.8	897	3.2	241000	100%	500000
Waal	893.8	898.3	4.5	1829000	76%	2300000
Waal	897	901.4	4.4	2333000	100%	5400000
Waal	898.3	903.2	4.9	2226000	99%	4100000
Waal	901.4	906.1	4.7	2438000	87%	3200000
Waal	903.2	906.1	2.9	923000	85%	1000000
Waal	906.1	908	1.9	702000	100%	1700000
Waal	906.1	910.2	4.1	2181000	99%	4900000
Waal	908	913.3	5.3	3587000	100%	5800000
Waal	910.2	914.8	4.6	1394000	100%	1900000
Waal	913.5	915.1	1.6	213000	100%	400000
Waal	914.8	920.8	6	2479000	93%	4300000
Waal	915.3	917.3	2	352000	99%	800000
Waal	917.3	922.9	5.6	1768000	94%	3300000
Waal	917.3	926	8.7	1158000	89%	2200000
Waal	922.9	927.1	4.2	719000	99%	1400000
Waal	926	928.6	2.6	47000	98%	100000
Waal	927.1	930.5	3.4	1421000	82%	1700000
Waal	928.6	932.9	4.3	1785000	78%	2800000
Waal	931	933.6	2.6	1330000	55%	900000
Waal	933.6	937	3.4	992000	94%	1600000
Waal	935.5	939	3.5	513000	100%	1100000
Waal	937.3	940.3	3	1694000	86%	1900000
Waal	939.4	942.6	3.2	904000	66%	1000000
Waal	941.2	943.5	2.3	302000	90%	500000
Waal	942.6	946	3.4	457000	100%	700000
Waal	943.5	948	4.5	356000	80%	300000
Waal	946	952.5	6.5	1252000	13%	200000
Waal	950	954.6	4.6	222000	100%	400000
Waal	951	952	1	63000	100%	100000
IJssel	878.6	880.4	1.8	75000	100%	200000
IJssel	880.4	883	2.6	267000	100%	600000
IJssel	883	886.2	3.2	1013000	94%	1800000
IJssel	884.2	887.5	3.3	530000	95%	800000
IJssel	886.2	890.8	4.6	108000	100%	200000

tak	vanaf km	tot km	lengte km	oppervlakte m2	gedeelte	volume m3
IJssel	889.2	897.2	8	1375000	81%	2700000
IJssel	890.8	902.9	12.1	6109000	92%	9300000
IJssel	897.2	901.7	4.5	61000	100%	100000
IJssel	901.7	903.1	1.4	80000	100%	200000
IJssel	902.9	910.8	7.9	841000	89%	1500000
IJssel	903.2	904.7	1.5	481000	100%	900000
IJssel	904.5	913.7	9.2	987000	97%	1600000
IJssel	911.4	918.7	7.3	3116000	97%	4300000
IJssel	913.7	916.6	2.9	643000	100%	900000
IJssel	916.6	921.8	5.2	1547000	100%	2100000
IJssel	918.7	925.2	6.5	2267000	62%	1900000
IJssel	921.8	927.1	5.3	298000	56%	300000
IJssel	925.2	928.1	2.9	1161000	100%	1500000
IJssel	927.1	931.1	4	369000	100%	700000
IJssel	928.1	930.6	2.5	85000	100%	100000
IJssel	930.6	935.3	4.7	1224000	92%	1400000
IJssel	931.3	934.1	2.8	191000	100%	200000
IJssel	934.1	938.7	4.6	1721000	41%	1000000
IJssel	935.3	942	6.7	5441000	99%	8900000
IJssel	936.5	943.1	6.6	1768000	82%	2000000
IJssel	938.7	941.6	2.9	248000	98%	400000
IJssel	941.6	948.2	6.6	564000	97%	7000000
IJssel	942	944	2	1305000	100%	1800000
IJssel	943.1	946.8	3.7	714000	88%	1000000
IJssel	946.8	951.4	4.6	756000	99%	1200000
IJssel	948.2	952.8	4.6	1995000	71%	2300000
IJssel	951.4	955.8	4.4	1261000	69%	1500000
IJssel	952.8	957.9	5.1	989000	83%	1100000
IJssel	955.8	961.7	5.9	1161000	74%	1200000
IJssel	957.9	965	7.1	2410000	42%	2200000
IJssel	961.7	967.1	5.4	621000	85%	600000
IJssel	965	968.4	3.4	714000	34%	300000
IJssel	967.1	972.5	5.4	930000	99%	1300000
IJssel	968.4	971.7	3.3	424000	100%	300000
IJssel	971.7	974.7	3	745000	54%	400000
IJssel	972.5	977.7	5.2	3338000	75%	2900000
IJssel	974.7	975.3	0.6	135000	100%	200000
IJssel	975.3	979.8	4.5	884000	95%	700000
IJssel	977.7	979.8	2.1	518000	100%	400000
IJssel	979.8	984	4.2	926000	72%	400000
IJssel	980.8	985.3	4.5	849000	82%	700000
IJssel	984	990.2	6.2	1771000	68%	1600000
IJssel	985.3	992.6	7.3	1647000	61%	1300000
IJssel	990.2	993.7	3.5	476000	99%	500000
IJssel	992.6	995.3	2.7	255000	71%	200000
IJssel	994.3	998.9	4.6	38000	71%	100000
IJssel	995.6	1001.1	5.5	615000	93%	200000

F Lijst van maatregelen bij Aanvullende Maatregelen II

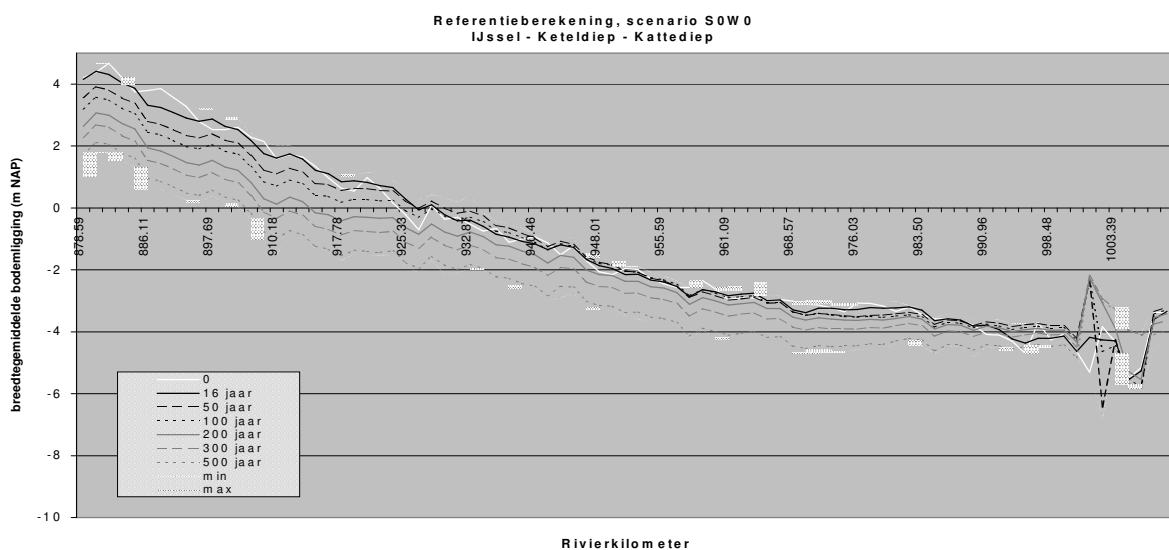
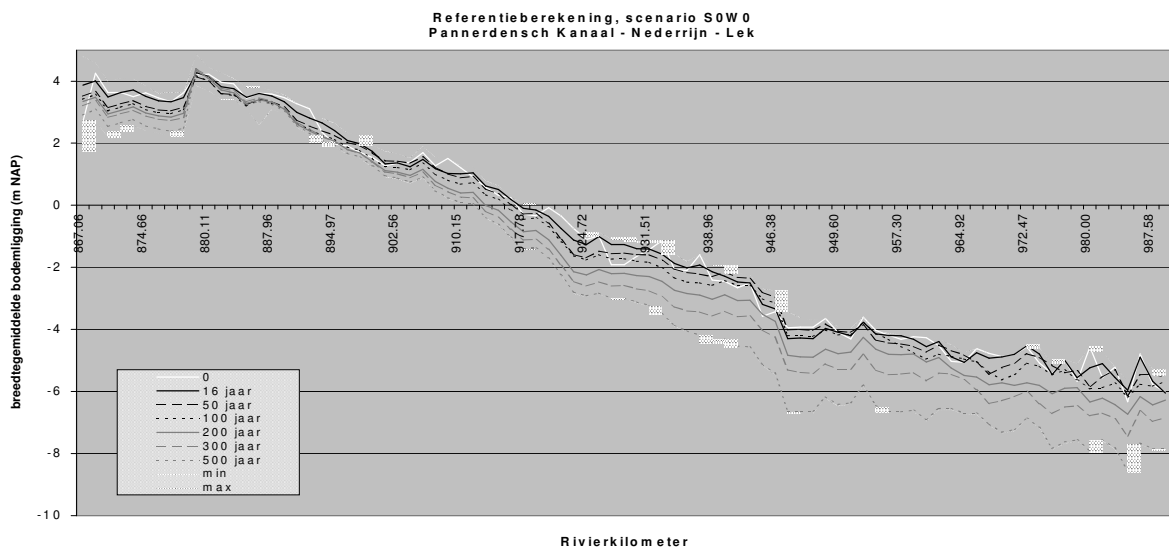
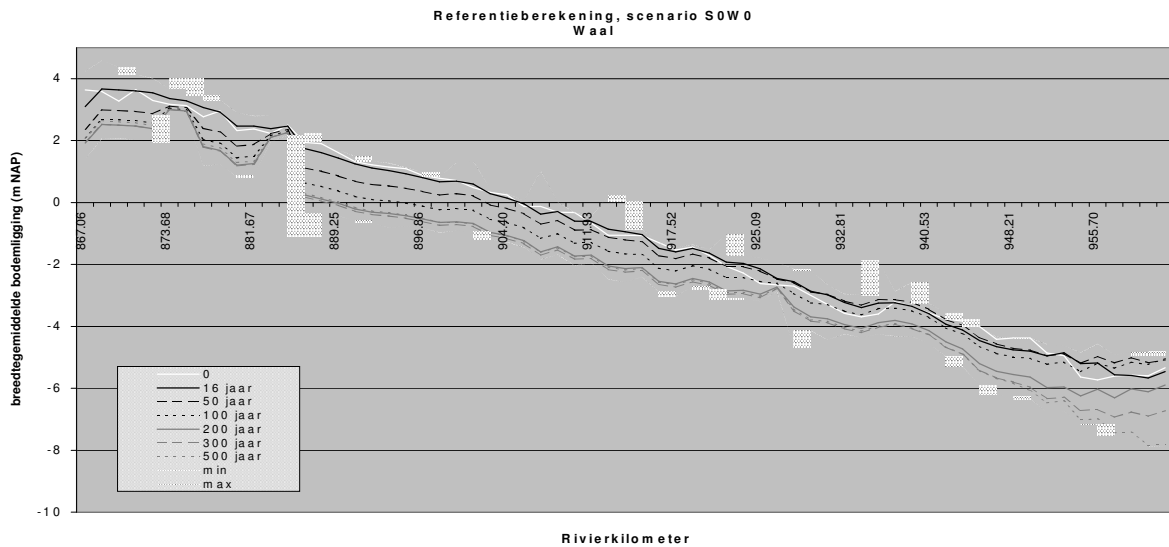
tak	vanaf tot		lengte oppervlakte		volume	
	km	km	km	m2	gedeelte	m3
Bovenrijn	857.3	861.3	4	326000	100%	1300000
Bovenrijn	862.4	866.3	3.9	2417000	64%	4100000
Bovenrijn	864	866.2	2.2	227000	100%	800000
Bovenrijn	865.5	867.3	1.8	45000	100%	200000
Bovenrijn	866.3	867.3	1	2271000	72%	5200000
Nederrijn / Lek	878.9	881.7	2.8	384000	100%	1300000
Nederrijn / Lek	880	886.1	6.1	24000	83%	100000
Nederrijn / Lek	880.6	887.6	7	1194000	61%	2000000
Nederrijn / Lek	886.1	890.3	4.2	1072000	88%	2700000
Nederrijn / Lek	887.6	894.3	6.7	600000	98%	1300000
Nederrijn / Lek	891	894.3	3.3	1196000	92%	3200000
Nederrijn / Lek	894.3	897.2	2.9	1136000	99%	2600000
Nederrijn / Lek	894.3	896.7	2.4	531000	17%	300000
Nederrijn / Lek	896.7	900.1	3.4	268000	57%	400000
Nederrijn / Lek	897.2	900.1	2.9	1493000	100%	2800000
Nederrijn / Lek	900.1	901.9	1.8	318000	100%	600000
Nederrijn / Lek	900.1	903.2	3.1	1019000	90%	1800000
Nederrijn / Lek	901.9	906	4.1	2233000	99%	4200000
Nederrijn / Lek	903.2	908.1	4.9	1678000	72%	2500000
Nederrijn / Lek	906	910.2	4.2	530000	100%	1000000
Nederrijn / Lek	908.1	912.2	4.1	442000	93%	1000000
Nederrijn / Lek	910.2	914.1	3.9	518000	95%	600000
Nederrijn / Lek	912.8	916.4	3.6	902000	87%	1100000
Nederrijn / Lek	914.1	918.6	4.5	1034000	91%	1500000
Nederrijn / Lek	916.4	920.7	4.3	2108000	61%	900000
Nederrijn / Lek	918.6	923.8	5.2	2206000	41%	100000
Nederrijn / Lek	920.7	923.2	2.5	50000	98%	100000
Nederrijn / Lek	923.2	928.8	5.6	756000	100%	1700000
Nederrijn / Lek	923.7	926.1	2.4	984000	99%	2300000
Nederrijn / Lek	923.8	928.8	5	1949000	97%	5100000
Nederrijn / Lek	929.2	931.2	2	266000	100%	600000
Nederrijn / Lek	929.2	932.5	3.3	978000	99%	2400000
Nederrijn / Lek	931.2	936.1	4.9	1715000	79%	2600000
Nederrijn / Lek	932.5	937.5	5	1100000	100%	1800000
Nederrijn / Lek	936.1	938.4	2.3	792000	82%	1200000
Nederrijn / Lek	937.5	944	6.5	1009000	100%	1500000
Nederrijn / Lek	941	946.5	5.5	1001000	52%	600000
Nederrijn / Lek	944	946.6	2.6	628000	96%	700000
Nederrijn / Lek	946.6	949.4	2.8	161000	100%	400000
Nederrijn / Lek	946.9	950.3	3.4	707000	100%	1500000
Nederrijn / Lek	949.7	950.2	0.5	16000	100%	100000
Nederrijn / Lek	950.5	951.7	1.2	326000	100%	800000
Nederrijn / Lek	950.7	952.9	2.2	397000	100%	800000
Nederrijn / Lek	951.7	957.6	5.9	2551000	90%	4400000
Nederrijn / Lek	953.3	959.1	5.8	1203000	97%	2100000
Nederrijn / Lek	957.8	962.3	4.5	739000	96%	1500000
Nederrijn / Lek	959.2	964.7	5.5	224000	71%	300000
Nederrijn / Lek	962.5	966.8	4.3	314000	48%	300000

tak	vanaf km	tot km	lengte km	oppervlakte m2	volumegedeelte m3	volumegedeelte m3
Nederrijn / Lek	965.3	969.6	4.3	435000	100%	700000
Pannerdensch Kanaal	869.3	873.3	4	727000	100%	2400000
Pannerdensch Kanaal	872.4	876.8	4.4	2430000	100%	7100000
Pannerdensch Kanaal	873.3	878.5	5.2	1369000	99%	3500000
Pannerdensch Kanaal	876.8	878.8	2	2015000	99%	5500000
Waal	867.3	874.7	7.4	4449000	81%	9000000
Waal	867.5	870.4	2.9	248000	86%	100000
Waal	870.7	878.2	7.5	3079000	81%	6100000
Waal	875.7	897.5	21.8	1024000	100%	2600000
Waal	878.2	883.5	5.3	3108000	85%	6600000
Waal	879.5	883.4	3.9	1669000	58%	3000000
Waal	883.4	887.2	3.8	163000	91%	400000
Waal	883.5	888.5	5	1705000	98%	5200000
Waal	887.2	890.8	3.6	1541000	99%	4100000
Waal	888.5	893.8	5.3	1031000	91%	3100000
Waal	890.8	893.8	3	580000	100%	2000000
Waal	893.8	897	3.2	241000	100%	800000
Waal	893.8	898.3	4.5	1829000	76%	4200000
Waal	897	901.4	4.4	2333000	100%	7300000
Waal	898.3	903.2	4.9	2226000	99%	6000000
Waal	901.4	906.1	4.7	2438000	87%	5700000
Waal	903.2	906.1	2.9	923000	85%	2000000
Waal	906.1	908	1.9	702000	100%	1900000
Waal	906.1	910.2	4.1	2181000	99%	6500000
Waal	908	913.3	5.3	3587000	100%	9800000
Waal	910.2	914.8	4.6	1394000	100%	3700000
Waal	913.5	915.1	1.6	213000	100%	600000
Waal	914.8	920.8	6	2479000	93%	6100000
Waal	915.3	917.3	2	352000	99%	1000000
Waal	917.3	922.9	5.6	1768000	94%	4700000
Waal	917.3	926	8.7	1158000	89%	3200000
Waal	922.9	927.1	4.2	719000	99%	1800000
Waal	926	928.6	2.6	47000	98%	200000
Waal	927.1	930.5	3.4	1421000	82%	2800000
Waal	928.6	932.9	4.3	1785000	78%	3800000
Waal	931	933.6	2.6	1330000	55%	1700000
Waal	933.1	935.5	2.4	40000	100%	100000
Waal	933.6	937	3.4	992000	94%	2100000
Waal	935.5	939	3.5	513000	100%	1200000
Waal	937.3	940.3	3	1694000	86%	2200000
Waal	939.4	942.6	3.2	904000	66%	1100000
Waal	941.2	943.5	2.3	302000	90%	700000
Waal	942.6	946	3.4	653000	100%	1200000
Waal	943.5	948	4.5	356000	80%	500000
Waal	946	952.5	6.5	1364000	20%	600000
Waal	950	953	3	222000	100%	500000
Waal	951	952	1	262000	90%	400000
IJssel	878.6	880.4	1.8	75000	100%	300000
IJssel	880.4	883	2.6	267000	100%	900000
IJssel	883	886.2	3.2	1013000	94%	2900000

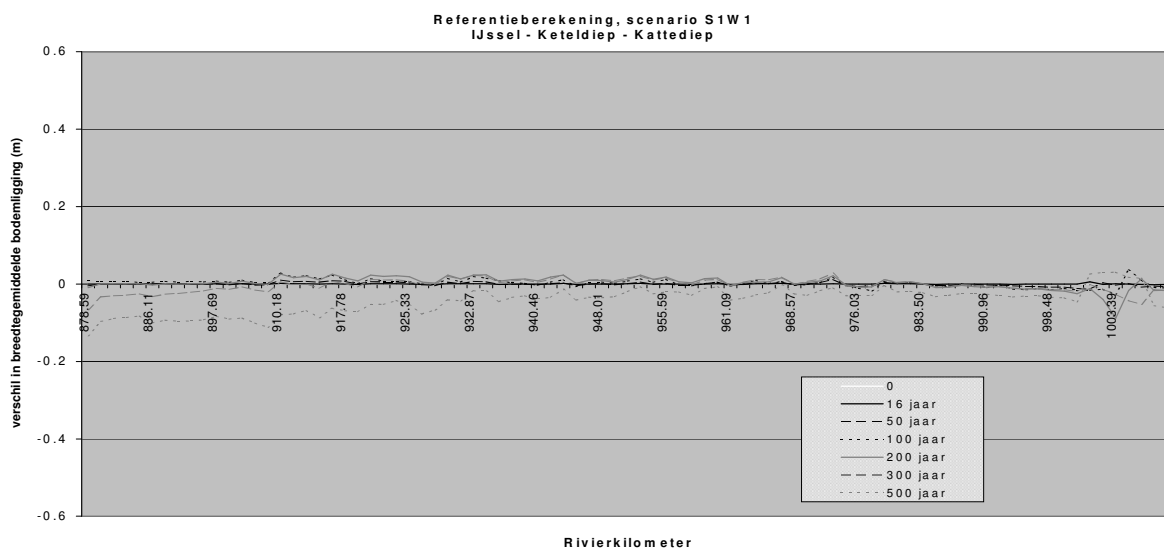
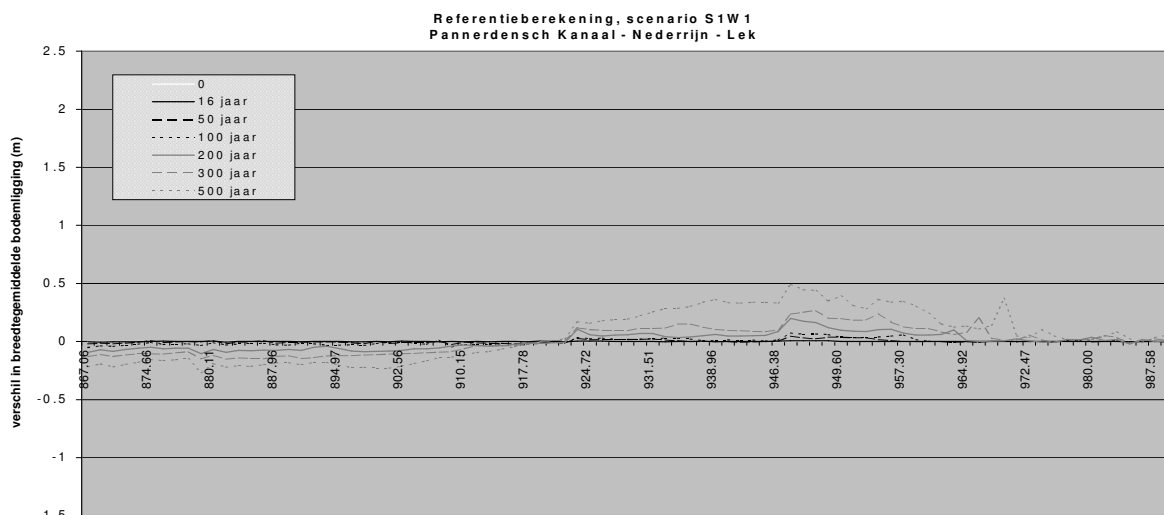
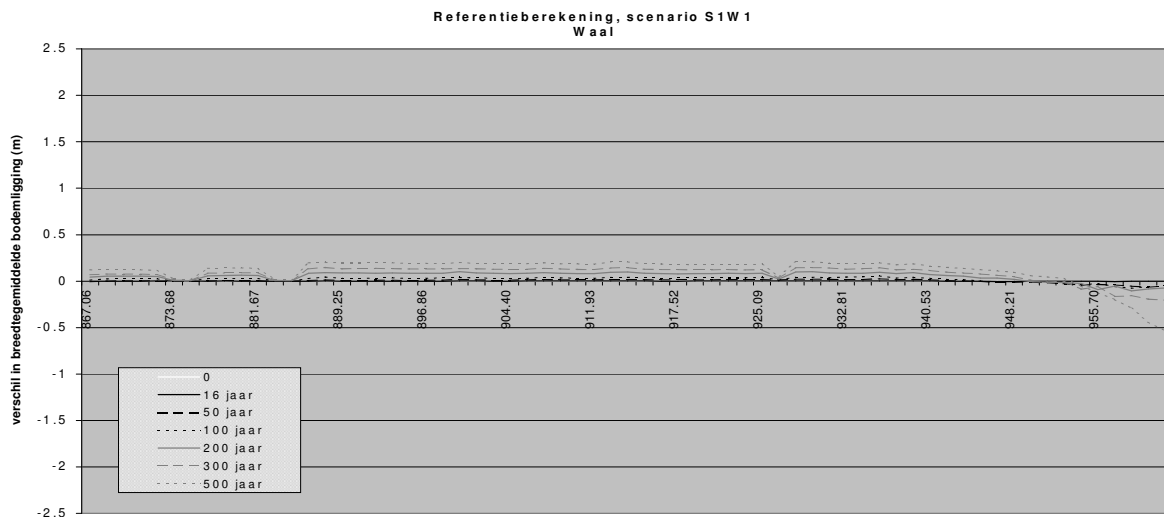
tak	vanaf tot		lengte oppervlakte		volume	
	km	km	km	m2	gedeelte	m3
IJssel	884.2	887.5	3.3	530000	95%	300000
IJssel	886.2	890.8	4.6	108000	100%	300000
IJssel	889.2	897.2	8	1375000	81%	3300000
IJssel	890.8	902.9	12.1	6188000	92%	15300000
IJssel	897.2	901.7	4.5	61000	100%	200000
IJssel	901.7	903.1	1.4	80000	100%	200000
IJssel	902.9	910.8	7.9	948000	90%	2600000
IJssel	903.2	904.7	1.5	481000	100%	1400000
IJssel	904.5	913.7	9.2	987000	97%	2300000
IJssel	911.4	918.7	7.3	3116000	97%	7600000
IJssel	913.7	916.6	2.9	643000	100%	1700000
IJssel	916.6	921.8	5.2	1547000	100%	3800000
IJssel	918.7	925.2	6.5	2267000	62%	3400000
IJssel	921.8	927.1	5.3	298000	56%	400000
IJssel	925.2	928.1	2.9	1161000	100%	2800000
IJssel	927.1	931.1	4	369000	100%	900000
IJssel	928.1	930.6	2.5	85000	100%	200000
IJssel	930.6	935.3	4.7	1224000	92%	2300000
IJssel	931.3	934.1	2.8	191000	100%	400000
IJssel	934.1	938.7	4.6	1721000	41%	1700000
IJssel	935.3	942	6.7	5441000	99%	14700000
IJssel	936.5	943.1	6.6	1768000	82%	3200000
IJssel	938.7	941.6	2.9	248000	98%	600000
IJssel	941.6	948.2	6.6	564000	97%	900000
IJssel	942	944	2	1305000	100%	3300000
IJssel	943.1	946.8	3.7	714000	88%	1400000
IJssel	946.8	951.4	4.6	756000	99%	1700000
IJssel	948.2	952.8	4.6	1995000	71%	3300000
IJssel	951.4	955.8	4.4	1261000	69%	2100000
IJssel	952.8	957.9	5.1	989000	83%	1700000
IJssel	955.8	961.7	5.9	1161000	74%	1800000
IJssel	957.9	965	7.1	2410000	42%	2900000
IJssel	961.7	967.1	5.4	621000	85%	1100000
IJssel	965	968.4	3.4	714000	34%	400000
IJssel	967.1	972.5	5.4	930000	99%	1900000
IJssel	968.4	971.7	3.3	424000	100%	600000
IJssel	971.7	974.7	3	745000	54%	700000
IJssel	972.5	977.7	5.2	3338000	75%	4700000
IJssel	974.7	975.3	0.6	135000	100%	300000
IJssel	975.3	979.8	4.5	884000	95%	1200000
IJssel	977.7	979.8	2.1	518000	100%	700000
IJssel	979.8	984	4.2	926000	72%	900000
IJssel	980.8	985.3	4.5	849000	82%	1200000
IJssel	984	990.2	6.2	1771000	68%	2100000
IJssel	985.3	992.6	7.3	1647000	61%	2000000
IJssel	990.2	993.7	3.5	476000	99%	700000
IJssel	992.6	995.3	2.7	255000	71%	200000
IJssel	994.3	998.9	4.6	38000	71%	100000
IJssel	995.6	1001	5.4	615000	93%	500000

G Referentie – simulaties

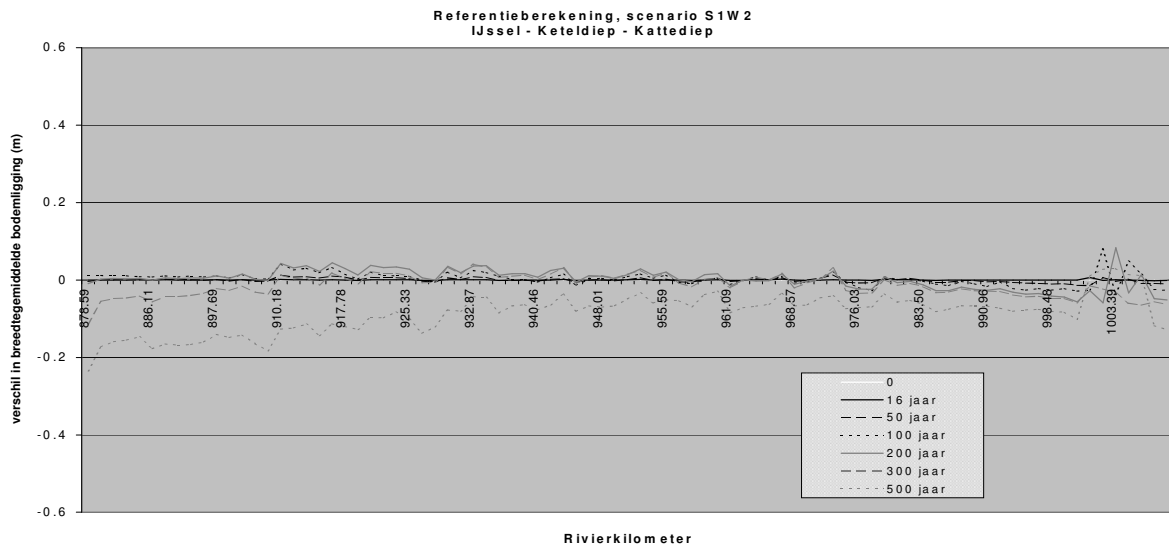
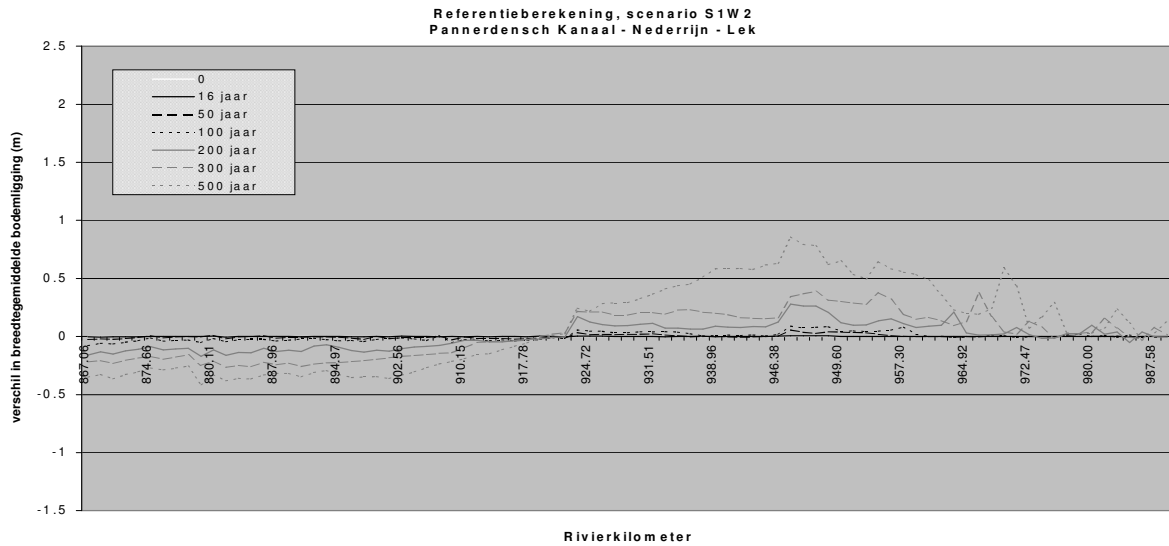
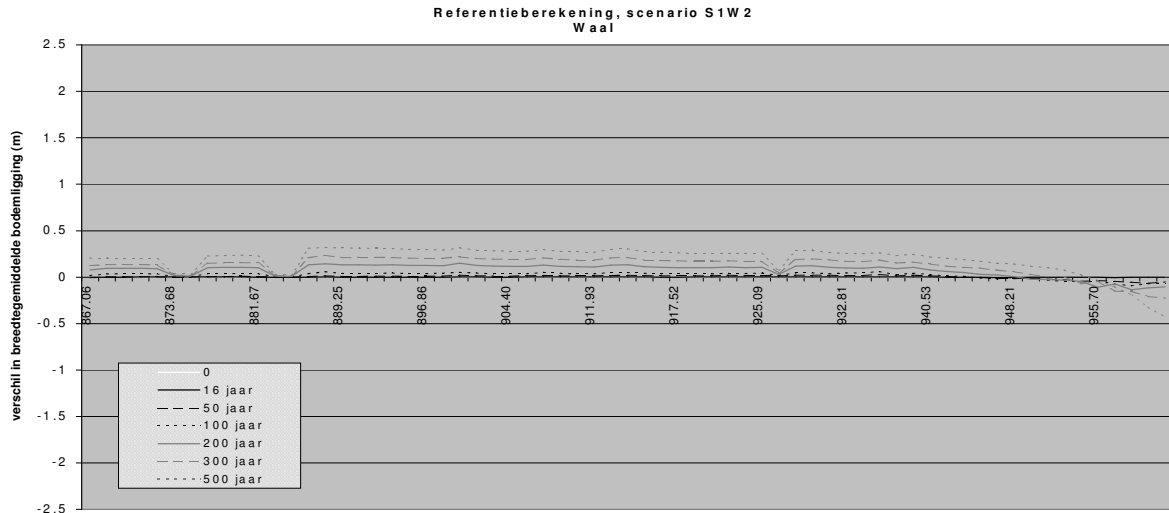
G.1 Bodemniveau



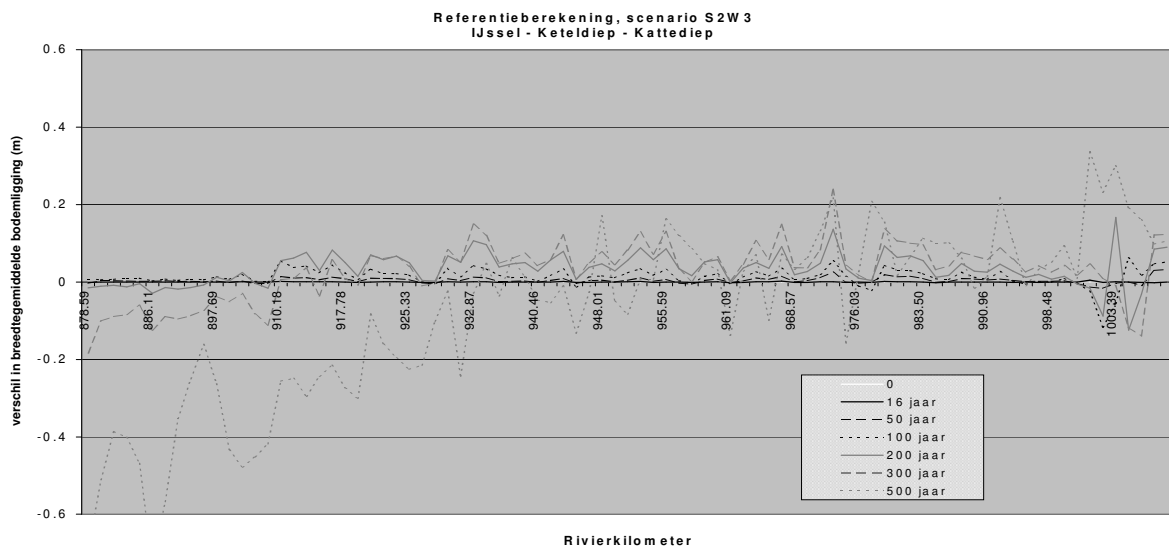
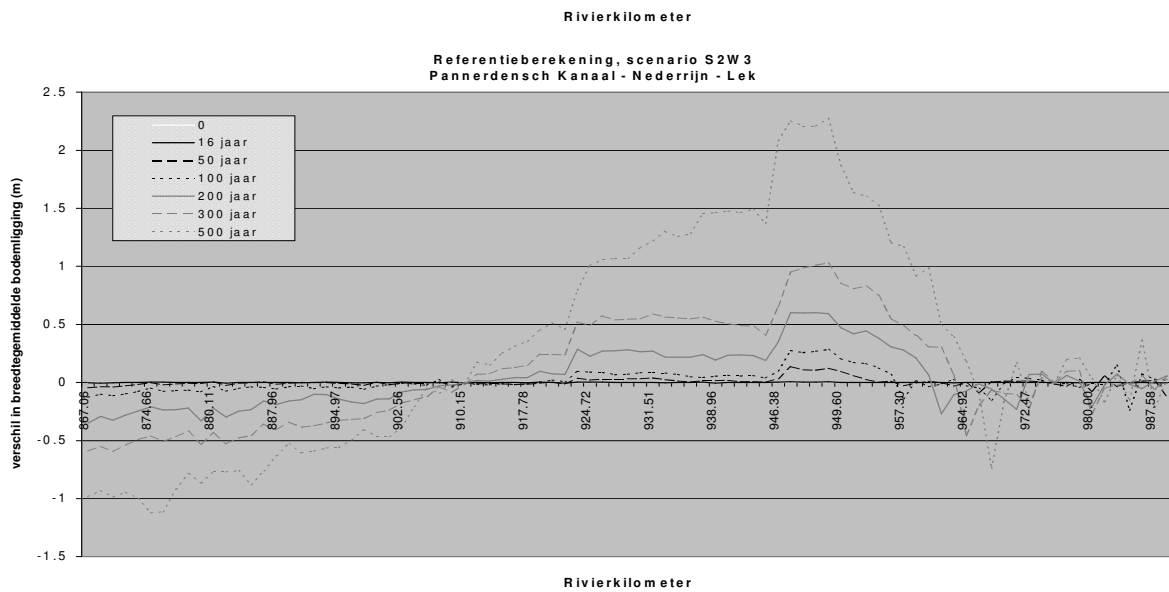
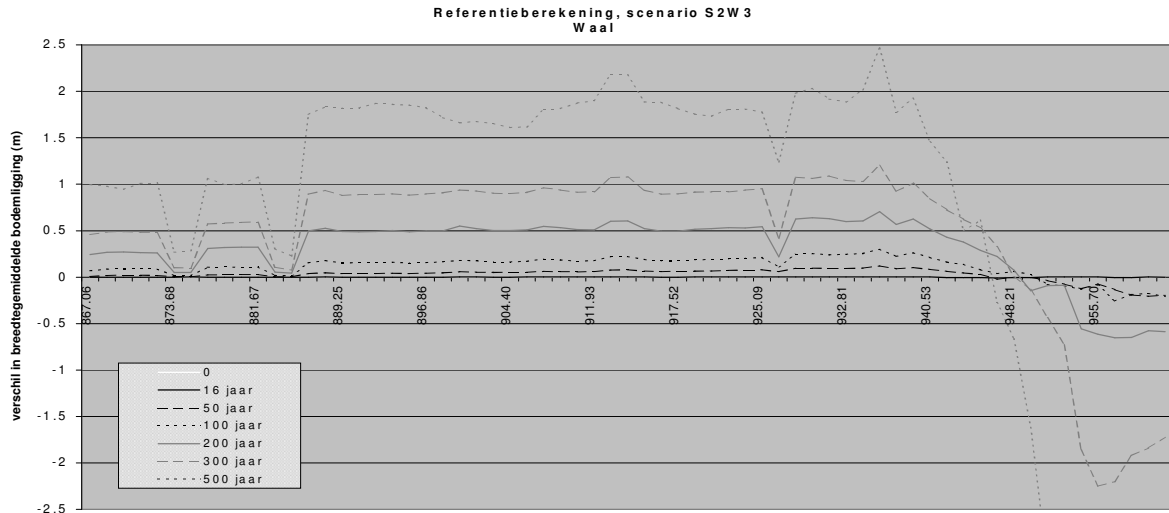
Verloop van de bodemligging in de verschillende takken bij klimaatscenario S0W0 zonder maatregelen. (REFS0W0)



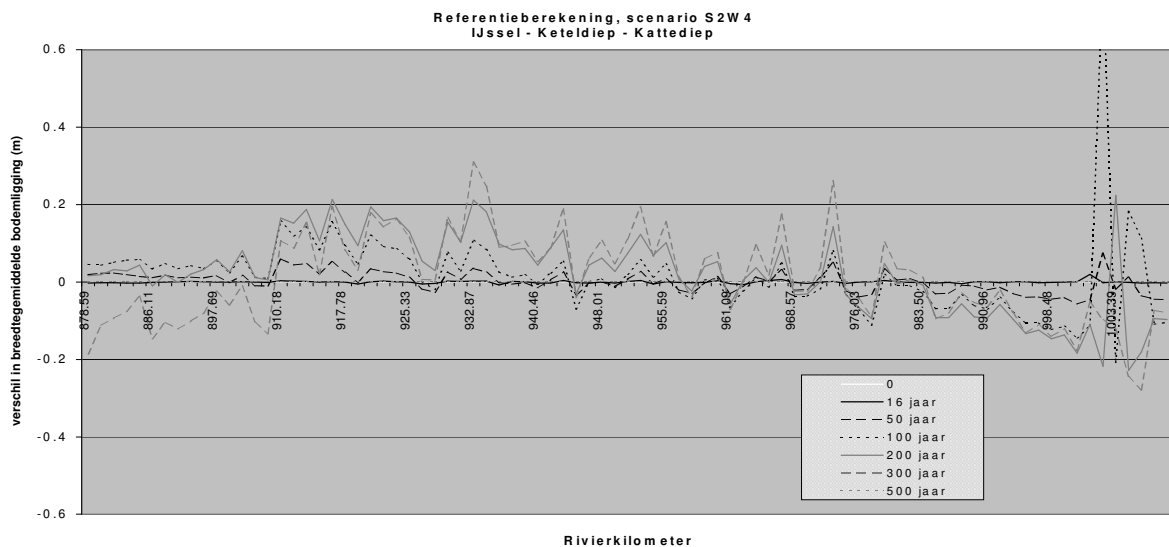
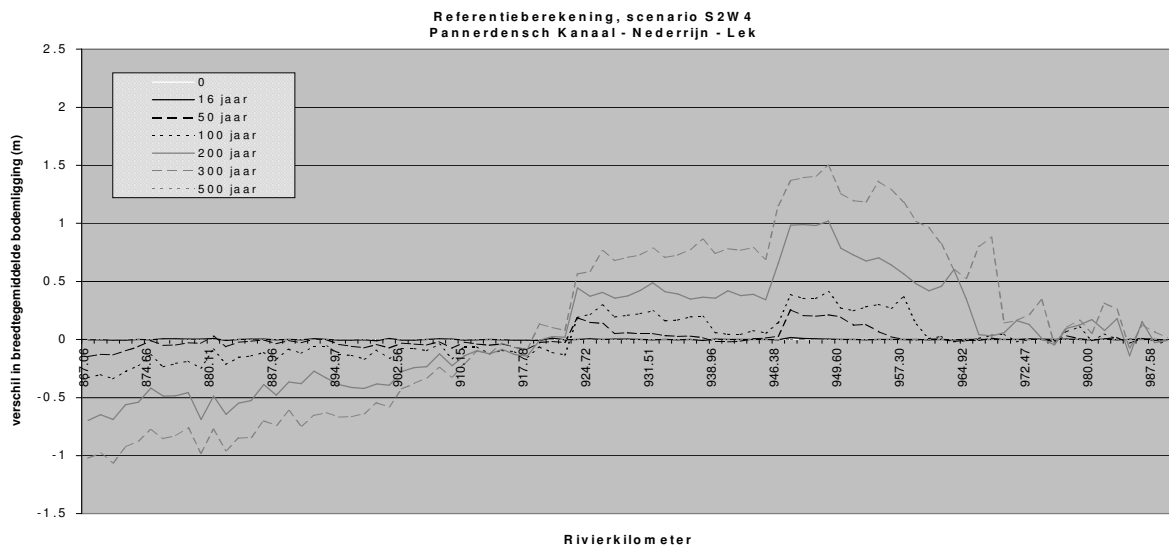
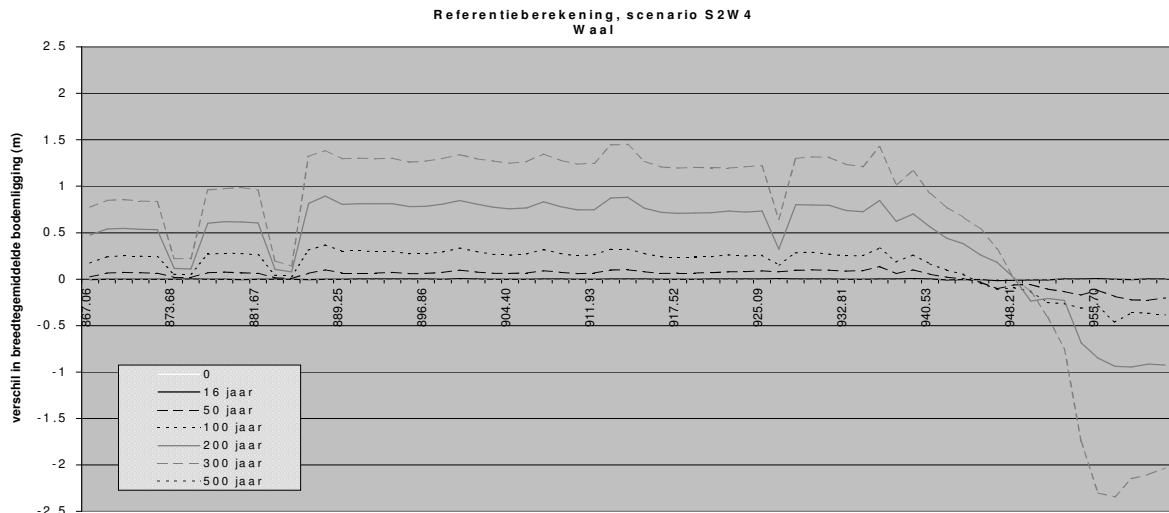
Vershil in bodemligging in de verschillende takken bij klimaatscenario S1W1 zonder maatregelen, ten opzichte van de simulatie met klimaatscenario S0W0. (REFS1W1 t.o.v. REFS0W0)



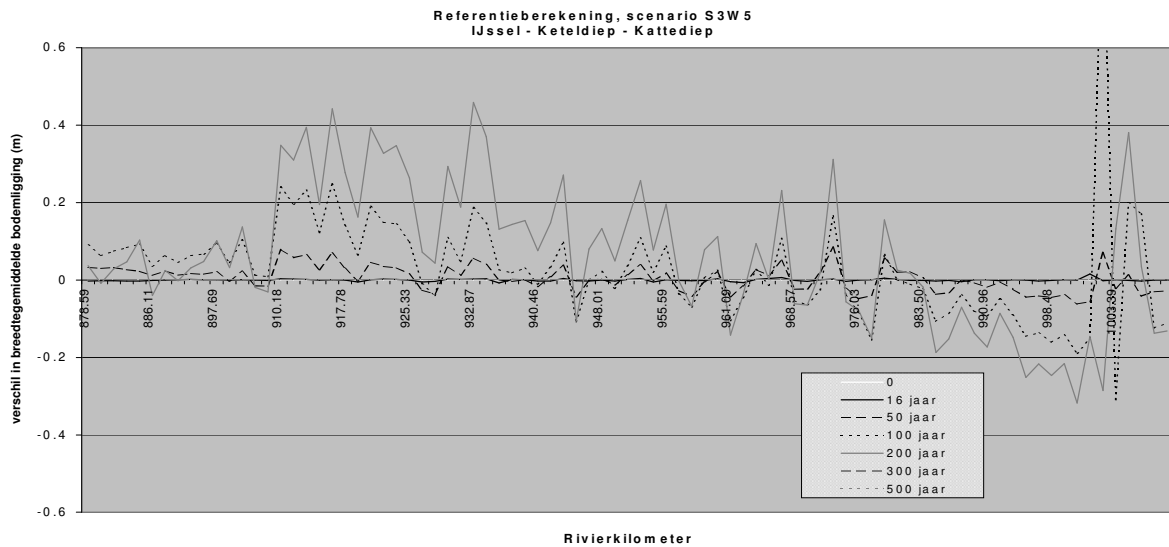
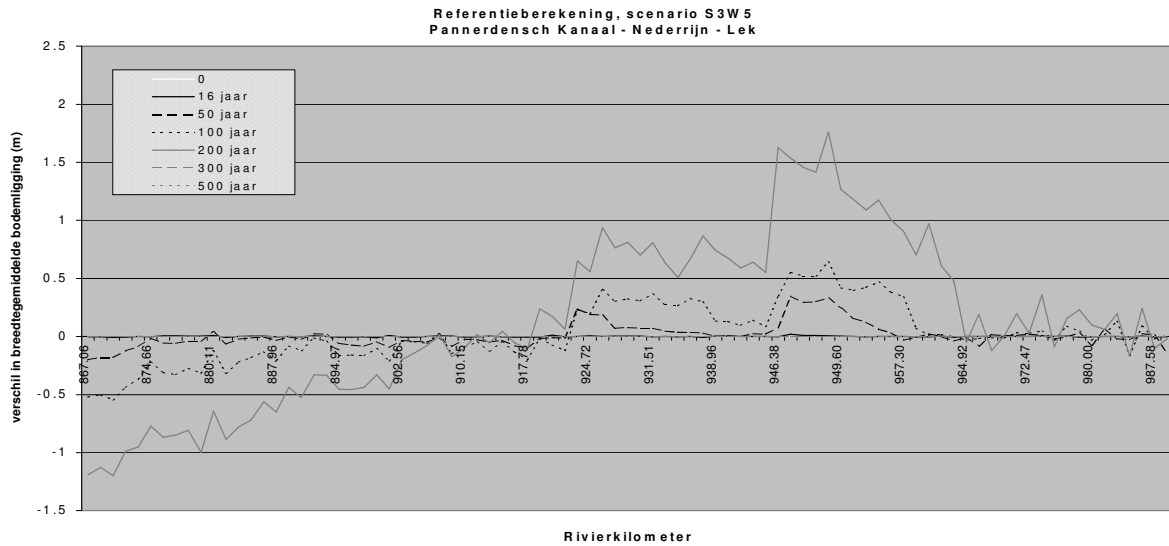
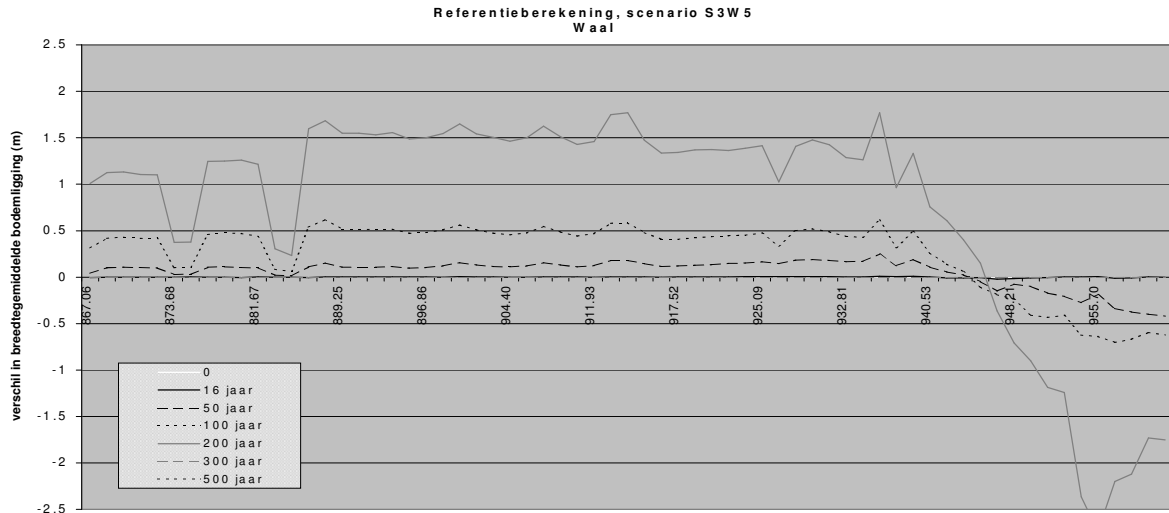
Vershil in bodemligging in de verschillende takken bij klimaatscenario S1W2 zonder maatregelen, ten opzichte van de simulatie met klimaatscenario S0W0. (REFS1W2 t.o.v. REFS0W0)



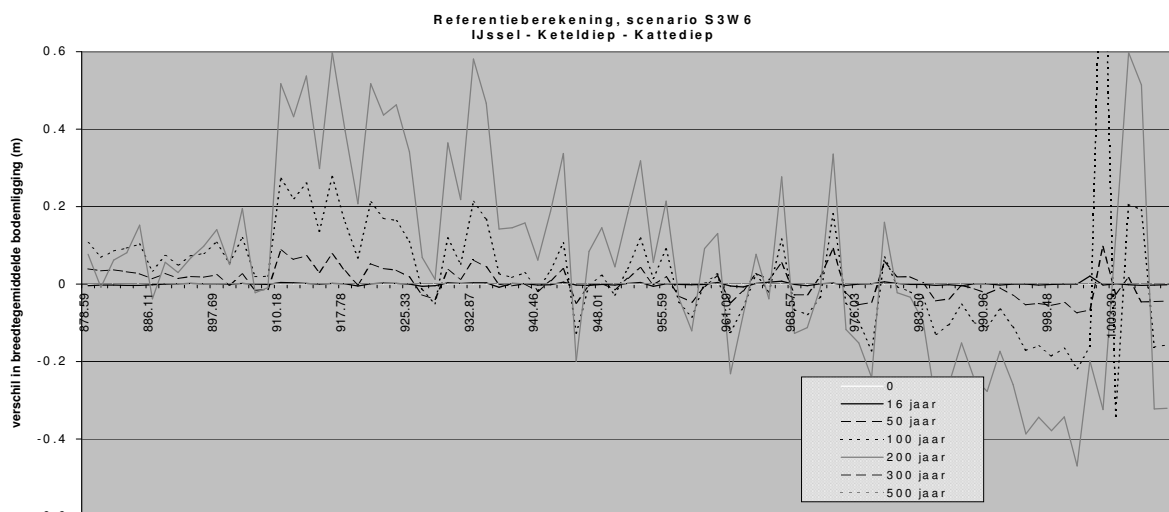
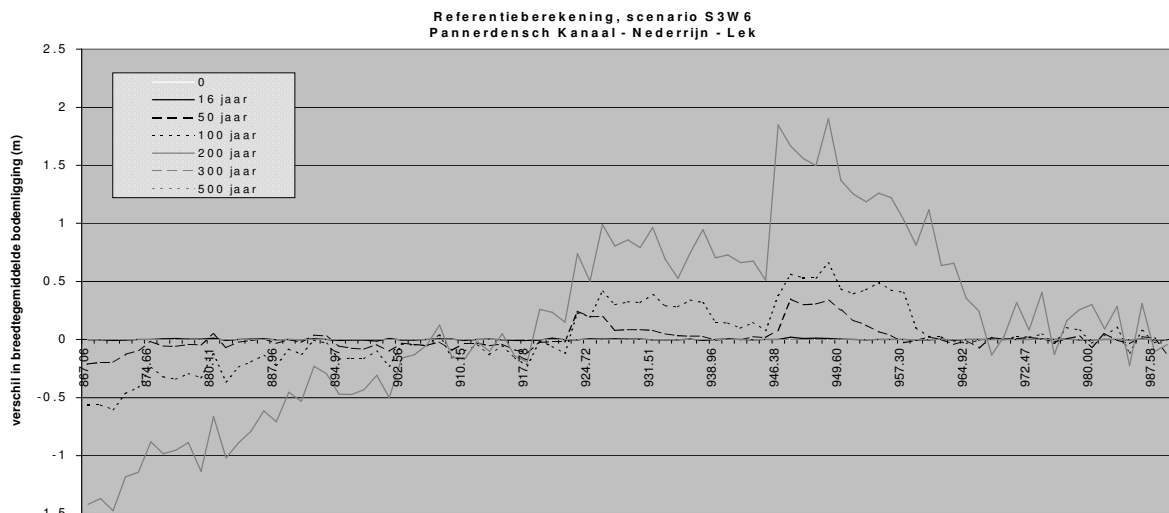
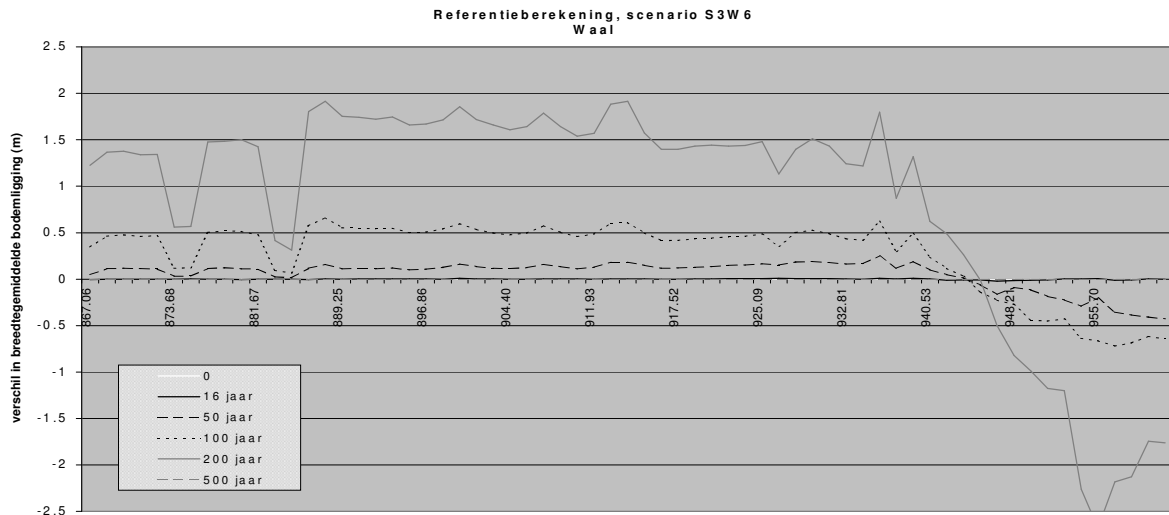
Vershil in bodemligging in de verschillende takken bij klimaatscenario S2W3 zonder maatregelen, ten opzichte van de simulatie met klimaatscenario S0W0. (REFS2W3 t.o.v. REFS0W0)



Vershil in bodemligging in de verschillende takken bij klimaatscenario S2W4 zonder maatregelen, ten opzichte van de simulatie met klimaatscenario S0W0. (REFS2W4 t.o.v. REFS0W0)

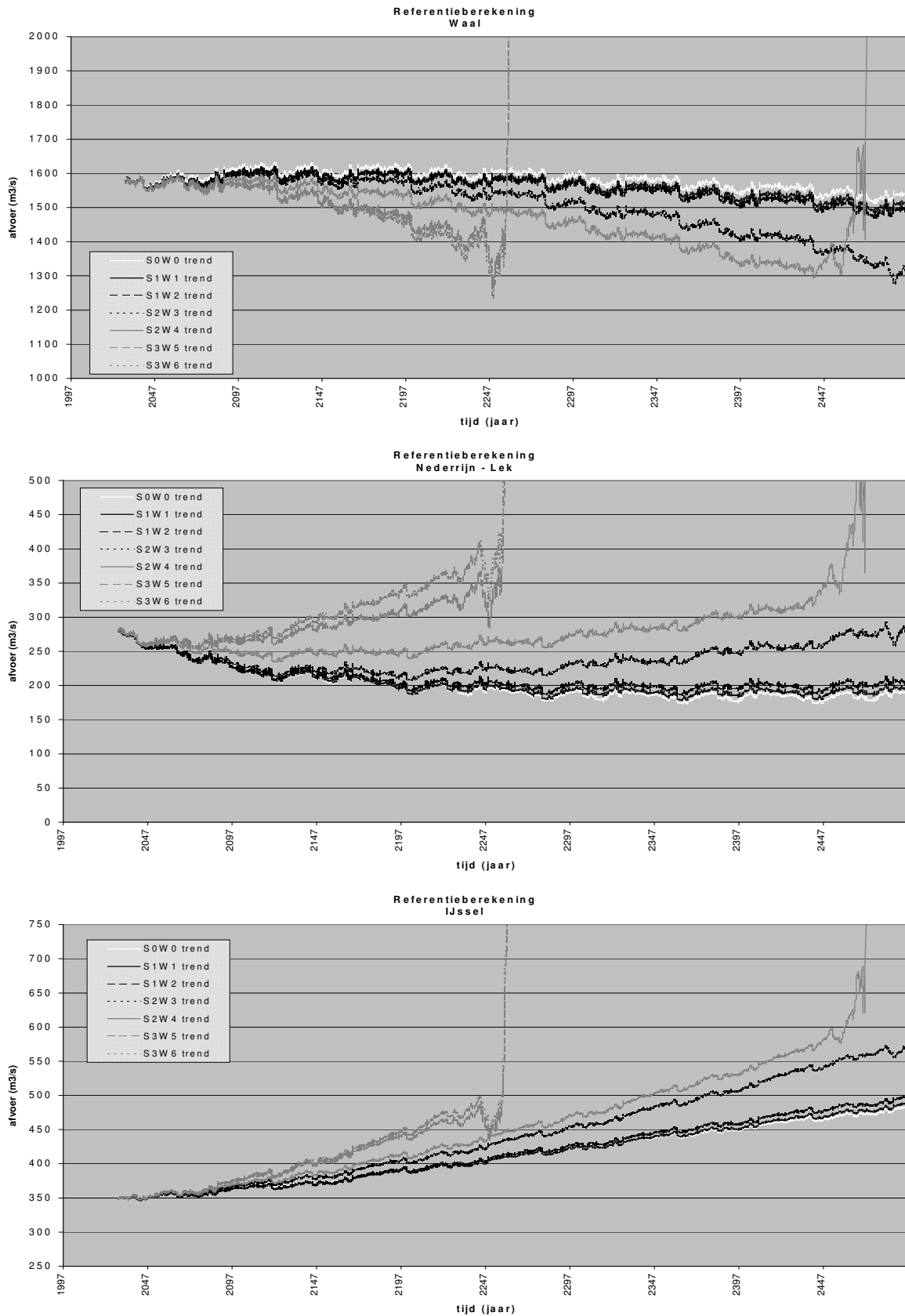


Vershil in bodemligging in de verschillende takken bij klimaatscenario S3W5 zonder maatregelen, ten opzichte van de simulatie met klimaatscenario S0W0. (REFS3W5 t.o.v. REFS0W0)



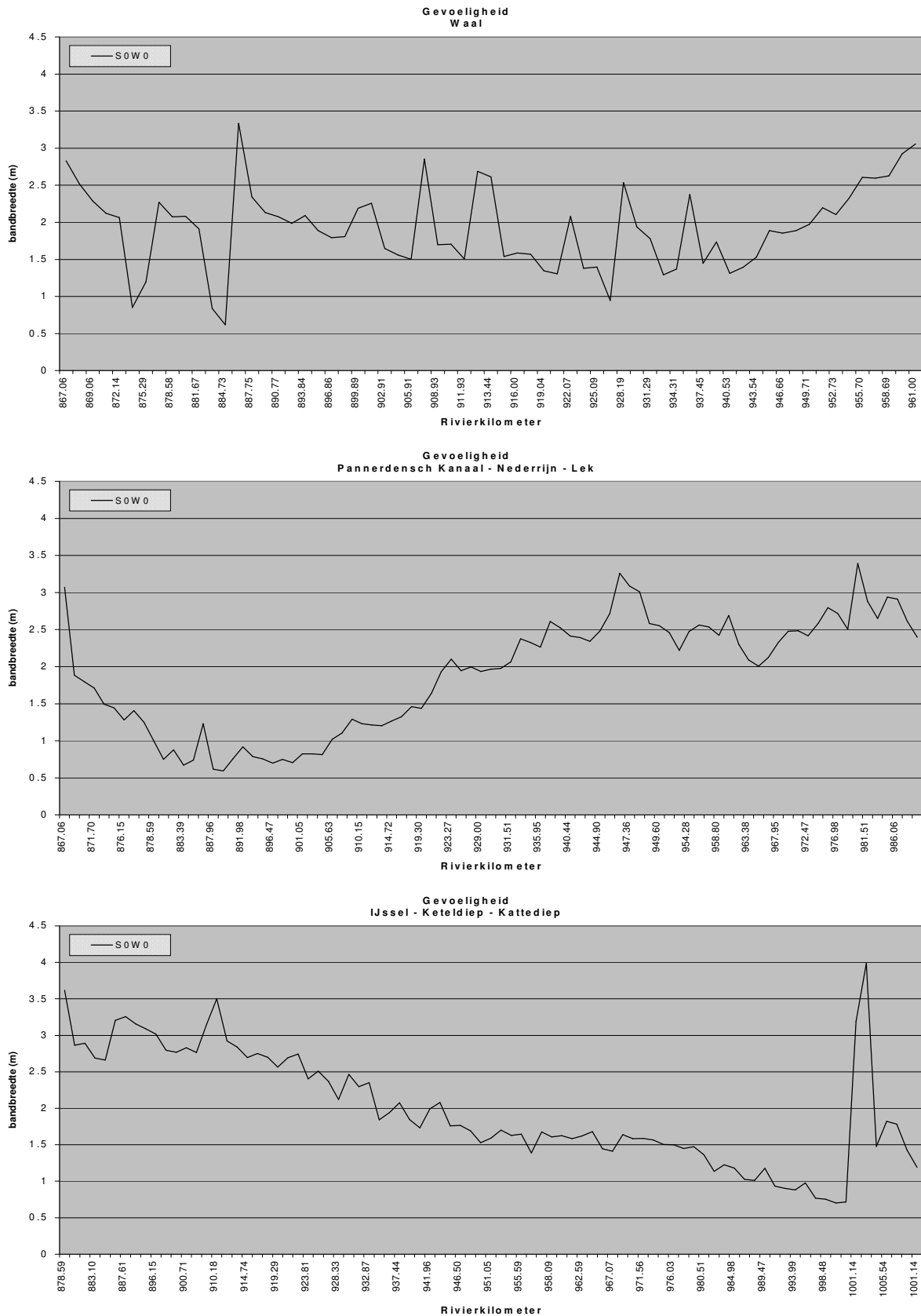
Vershil in bodemligging in de verschillende takken bij klimaatscenario S3W6 zonder maatregelen, ten opzichte van de simulatie met klimaatscenario S0W0. (REFS3W6 t.o.v. REFS0W0)

G.2 Afvoer per tak

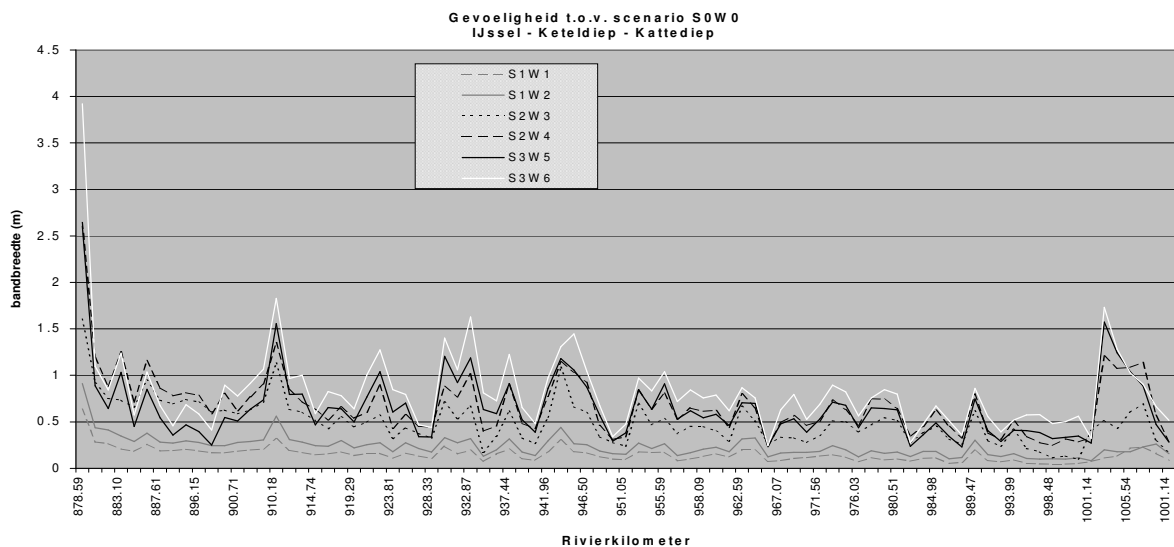
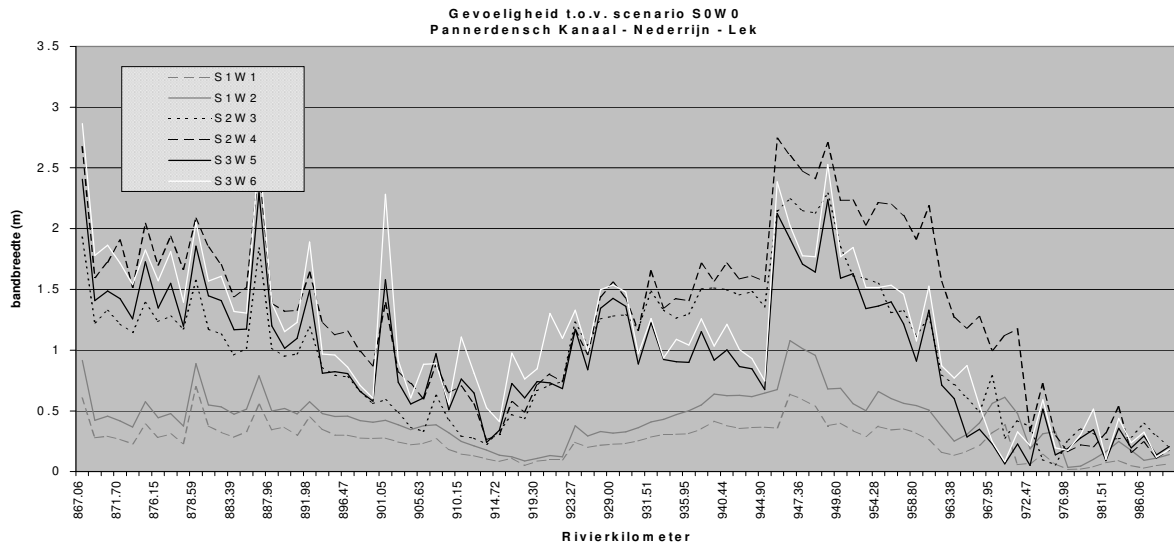
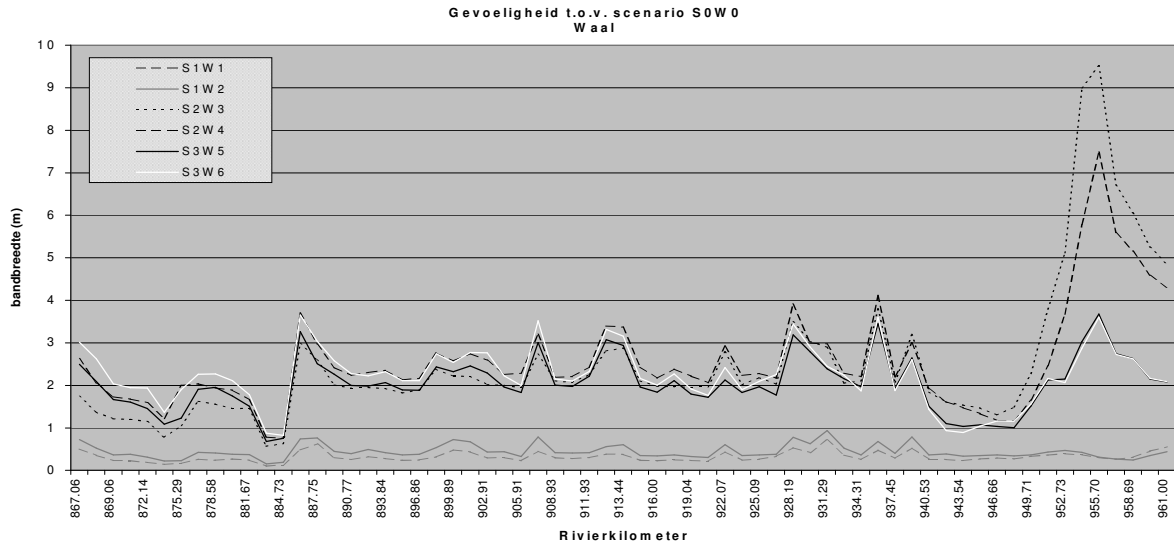


Verandering in gemiddelde afvoer bij de referentieberekeningen bij de verschillende klimaatscenario's.

G.3 Gevoeligheid



Gevoeligheid van de verschillende takken bij de referentieberekening zonder klimaatverandering. De bandbreedte is bepaald door per lokatie de minimale waarde van de maximale waarde af te trekken.



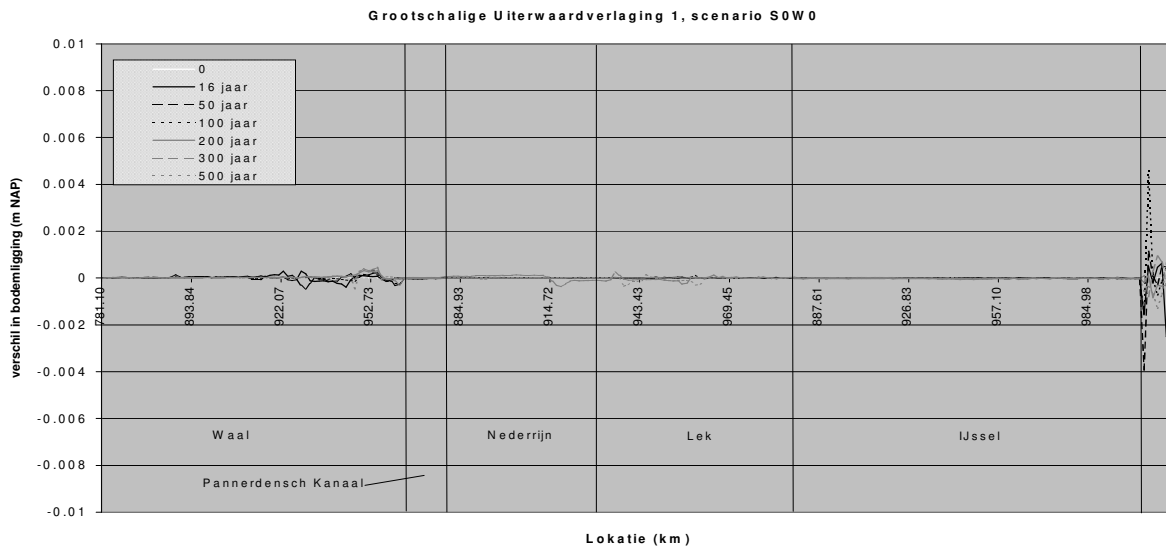
Gevoeligheid van de verschillende takken door klimaatverandering. De bandbreedte is bepaald door per lokatie de minimale afwijking ten opzichte van de simulatie zonder klimaatverandering van de maximale afwijking af te trekken.

H Case-simulaties

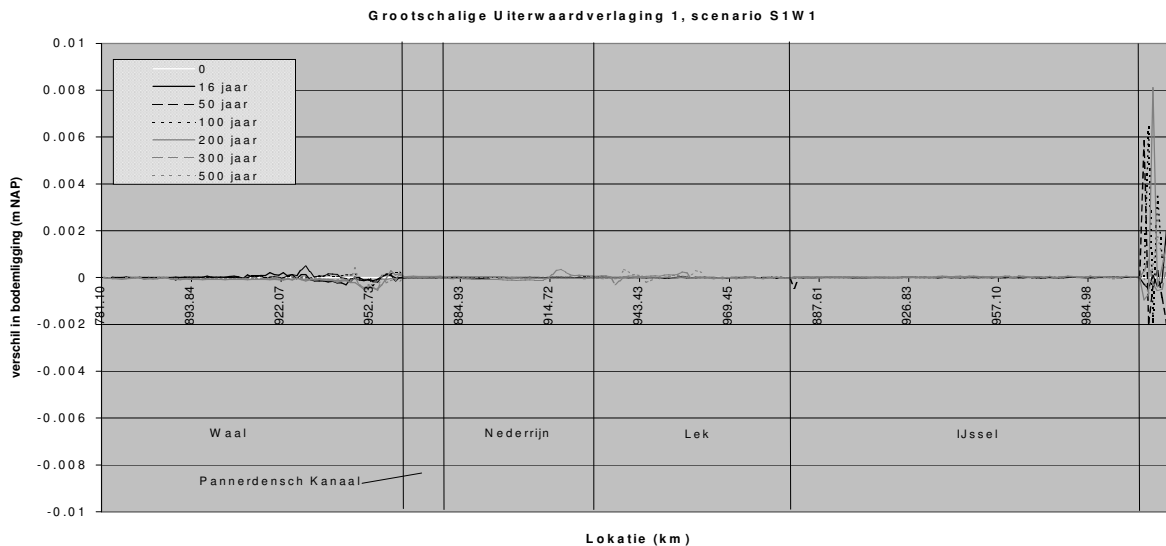
De resultaten van de simulaties met maatregelen maar zonder klimaatverandering, met scenario S0W0, zijn uitgezet ten opzichte van de referentieberekening zonder klimaatverandering (REFS0W0). De resultaten van alle overige simulaties met maatregelen zijn uitgezet ten opzichte van de resultaten van de simulatie met maatregel, zonder klimaatverandering.

De waarden in de grafiek "Grootschalige Uiterwaardverlaging, variant 1, scenario S1W1" zijn dus het verschil tussen die simulatie en de simulatie "Grootschalige Uiterwaardverlaging, variant 1, scenario S0W0". De waarden in de grafiek "Grootschalige Uiterwaardverlaging, variant 1, scenario S0W0" zijn het verschil tussen die simulatie en de simulatie "Referentieberekening, scenario S0W0".

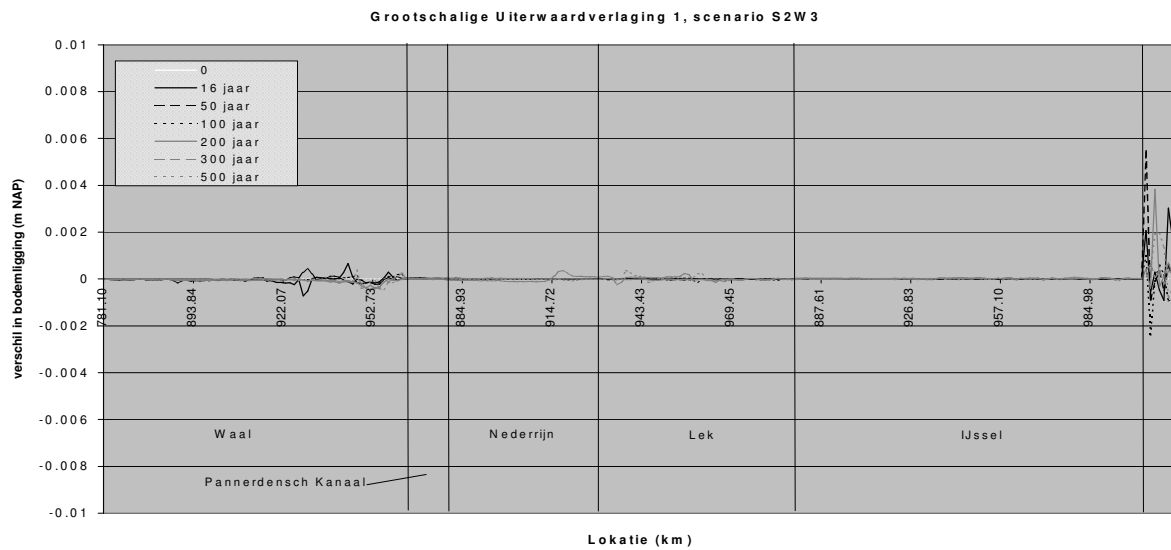
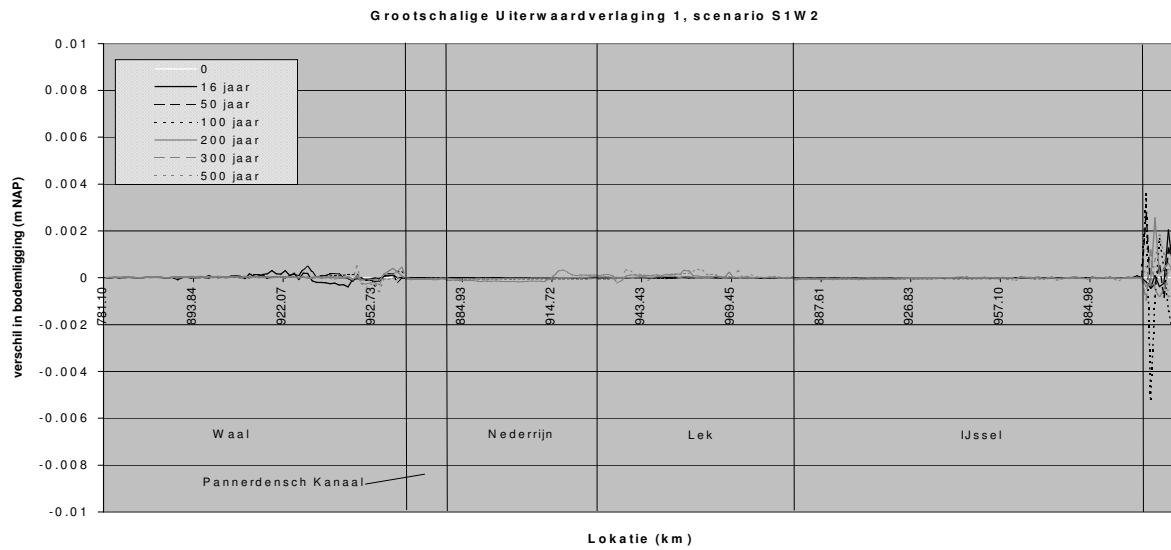
H.1 Grootschalige Uiterwaardverlaging, variant 1



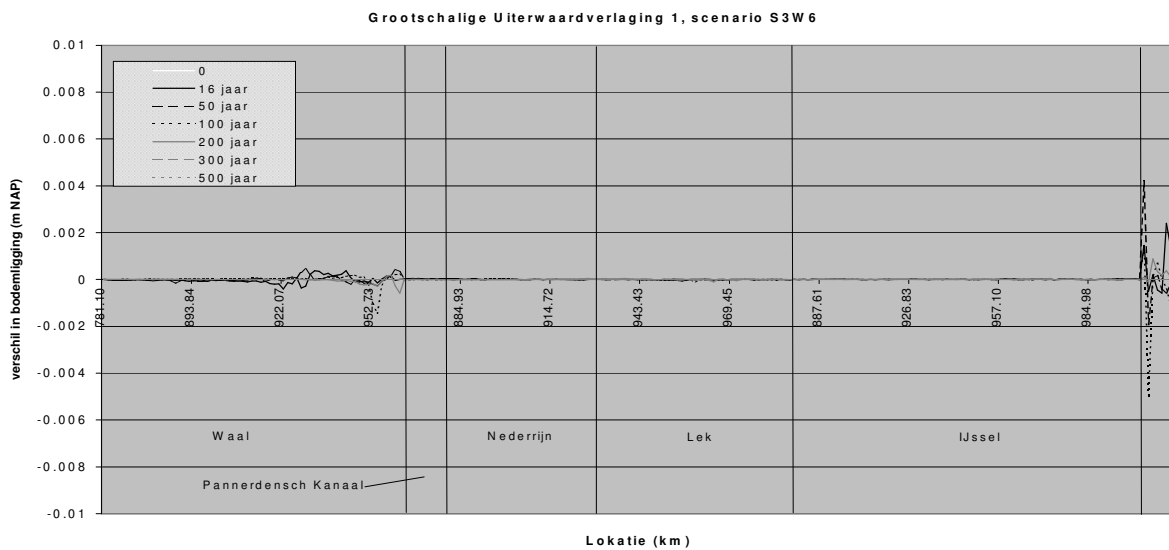
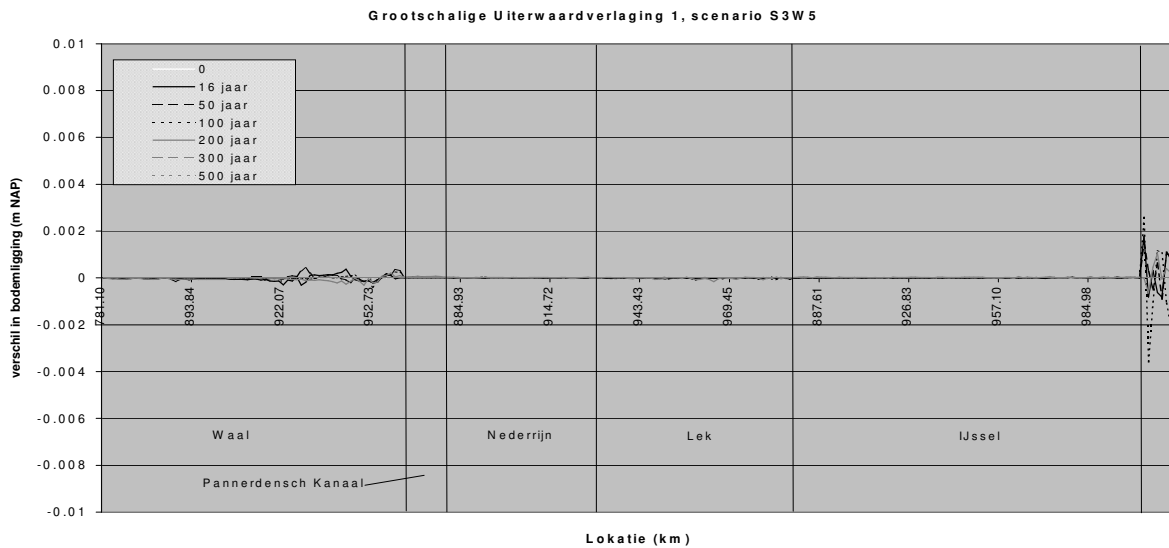
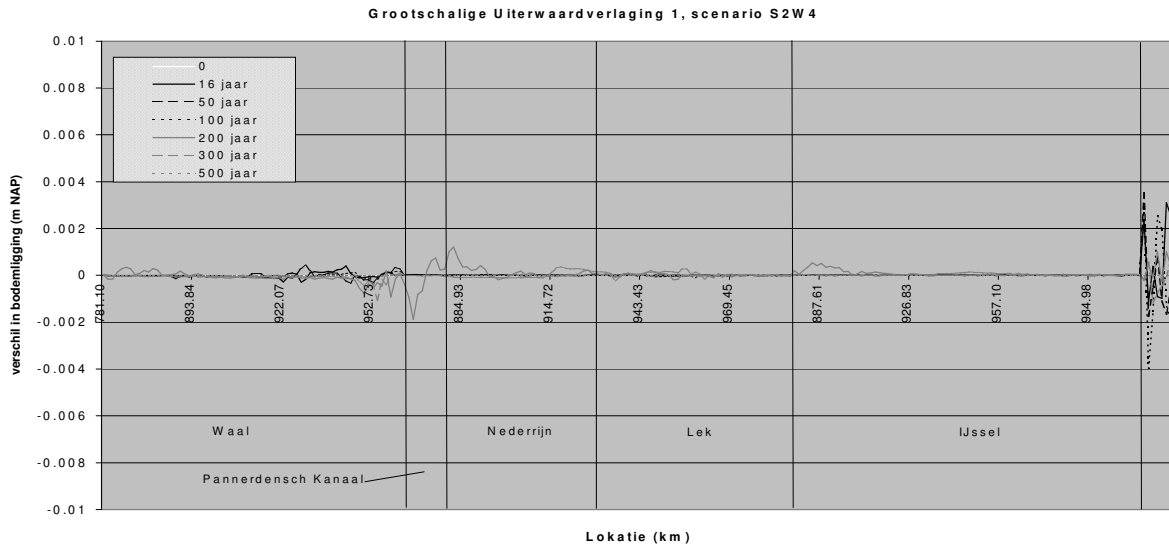
Vershil in bodemligging bij klimaatscenario S0W0 bij variant 1 van de grootschalige uiterwaardverlaging, ten opzichte van de simulatie zonder maatregelen. (UVIS0W0 t.o.v. REFS0W0)



Vershil in bodemligging bij klimaatscenario S1W1 bij variant 1 van de grootschalige uiterwaardverlaging, ten opzichte van de simulatie met klimaatscenario S0W0. (UVIS1W1 t.o.v. UVIS0W0)

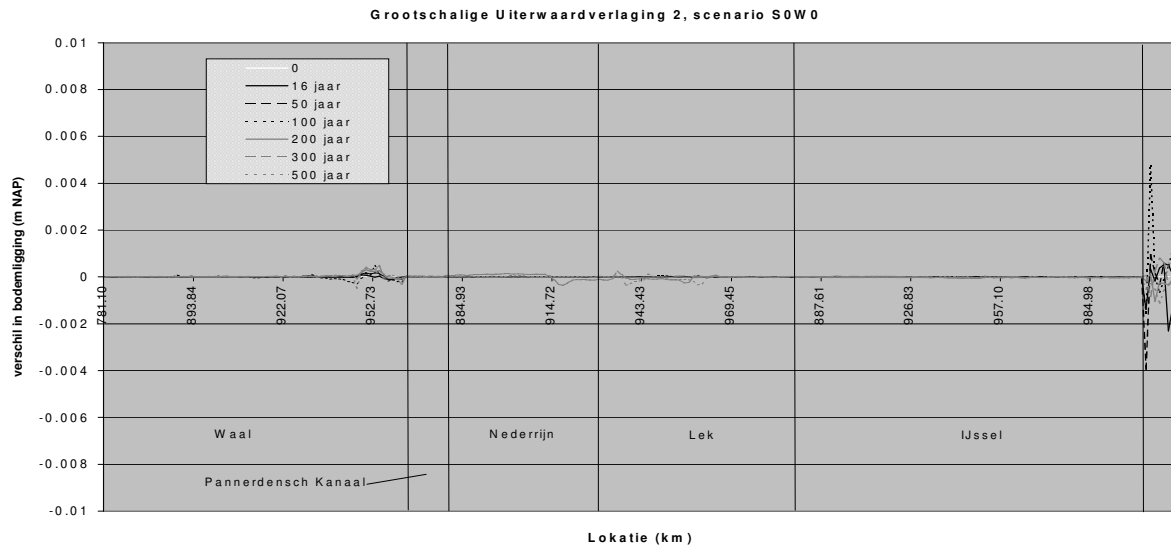


Verskil in bodemligging bij klimaatscenario' s S1W2 en S2W3 bij variant 1 van de grootschalige uiterwaardverlaging, ten opzichte van de simulatie met klimaatscenario S0W0. (UV1S1W2 en UV1S2W3 t.o.v. UV1S0W0)

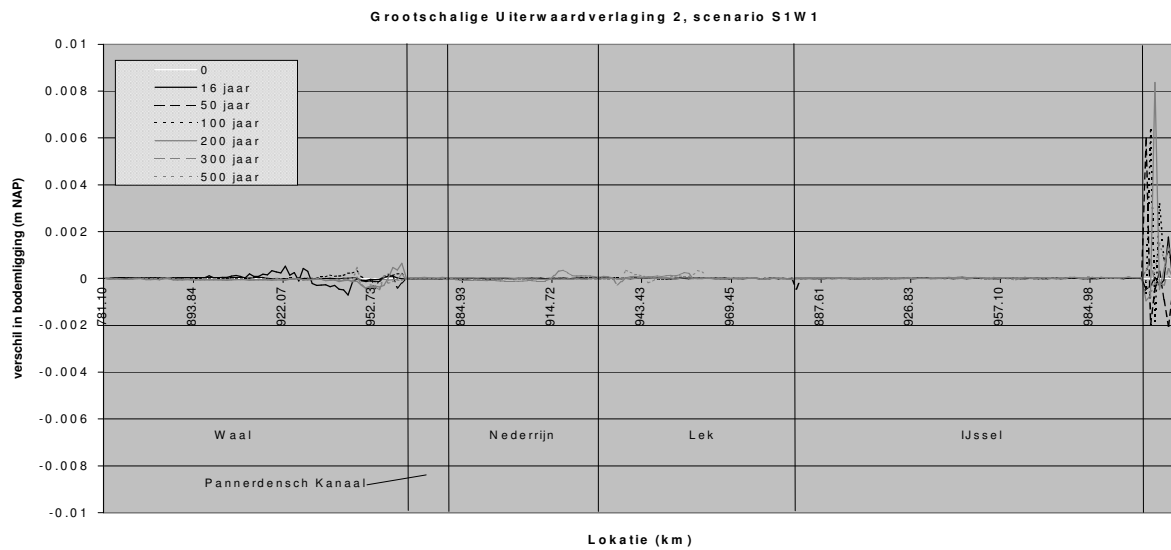


Vershil in bodemligging bij klimaatscenario' s S2W4, S3W5 en S3W6 bij variant 1 van de grootschalige uiterwaardverlaging, ten opzichte van de simulatie met klimaatscenario S0W0. (UV1S2W4, UV1S3W5 en UV1S3W6 t.o.v. UV1S0W0)

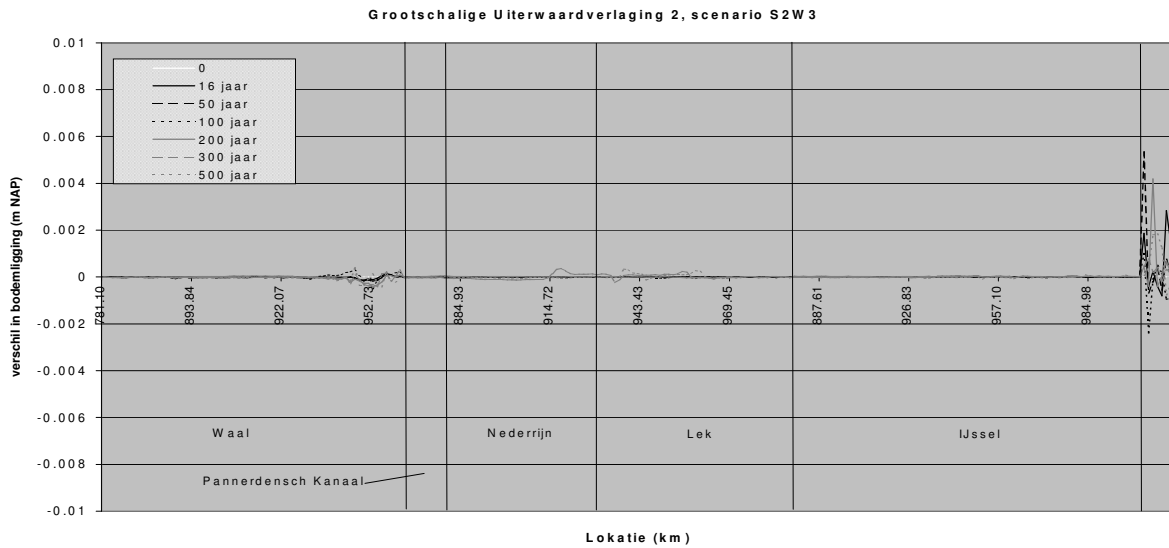
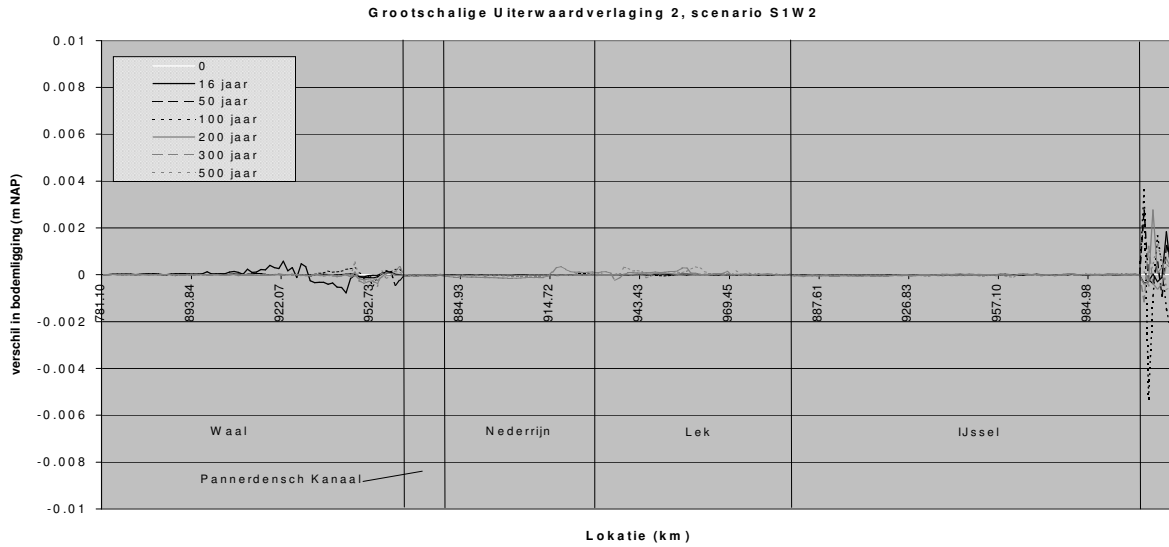
H.2 Grootschalige Uiterwaardverlaging, variant 2



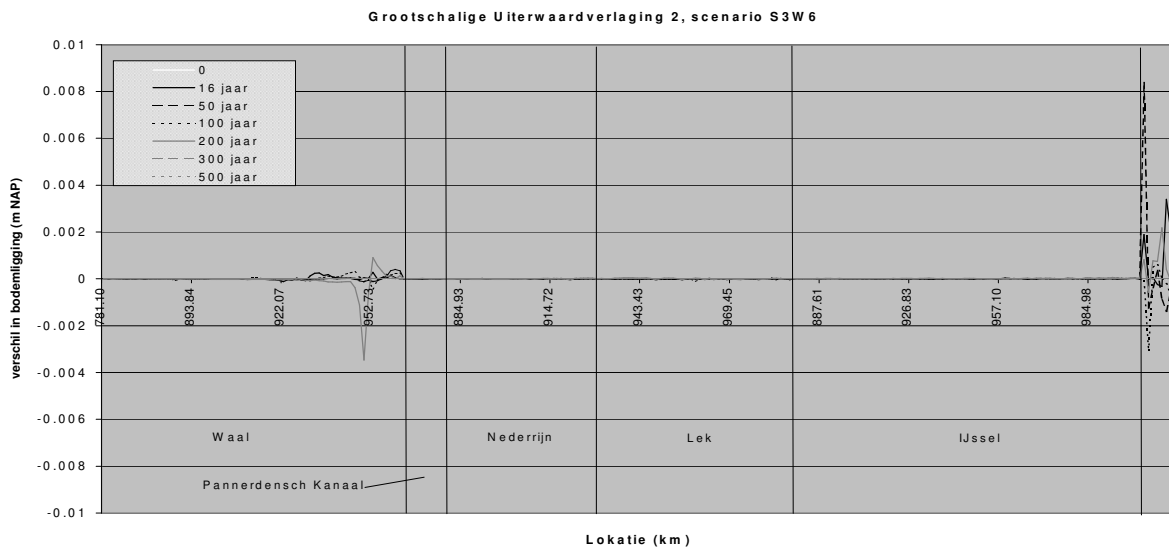
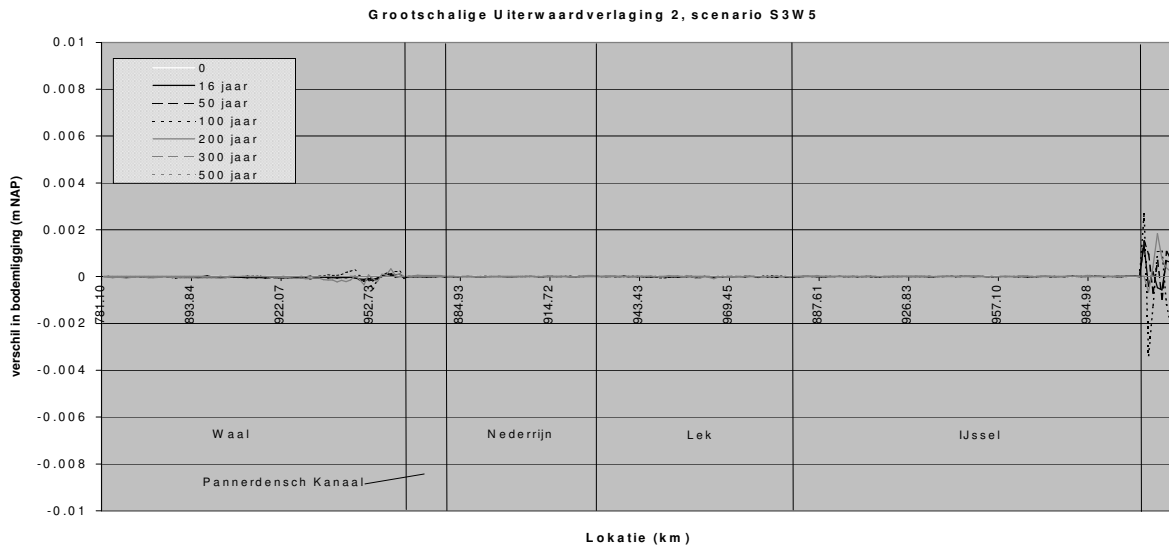
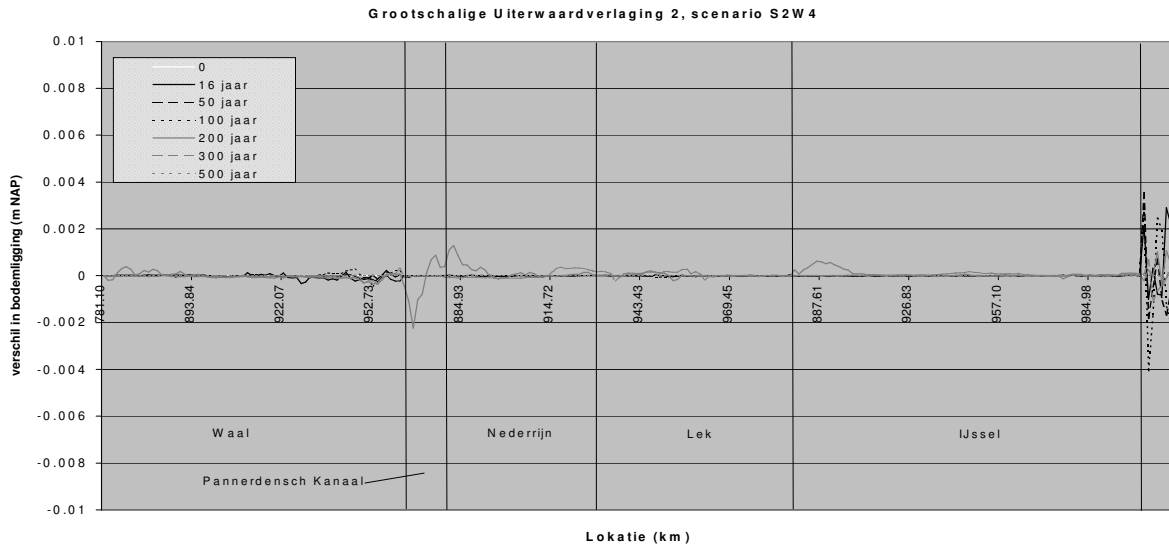
Vershil in bodemligging bij klimaatscenario S0W0 bij variant 2 van de grootschalige uiterwaardverlaging, ten opzichte van de simulatie zonder maatregelen. (UV2S0W0 t.o.v. REFS0W0)



Vershil in bodemligging bij klimaatscenario S1W1 bij variant 2 van de grootschalige uiterwaardverlaging, ten opzichte van de simulatie met klimaatscenario S0W0. (UV2S1W1 t.o.v. UV2S0W0)

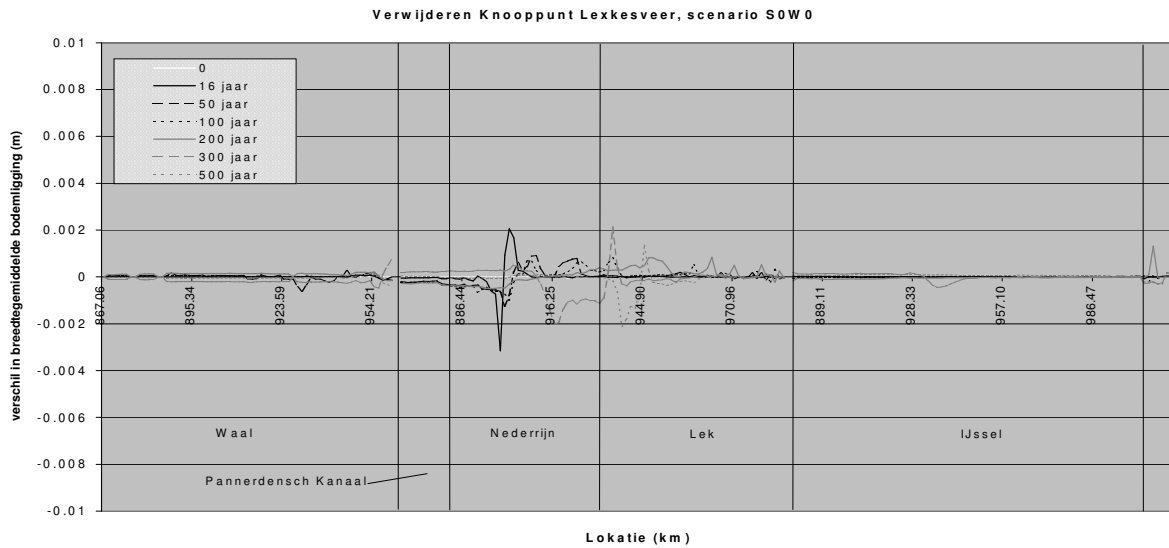


Verskil in bodemligging bij klimaatscenario' s S1W2 en S2W3 bij variant 2 van de grootschalige uiterwaardverlaging, ten opzichte van de simulatie met klimaatscenario S0W0. (UV2S1W2 en UV2S2W3 t.o.v. UV2S0W0)

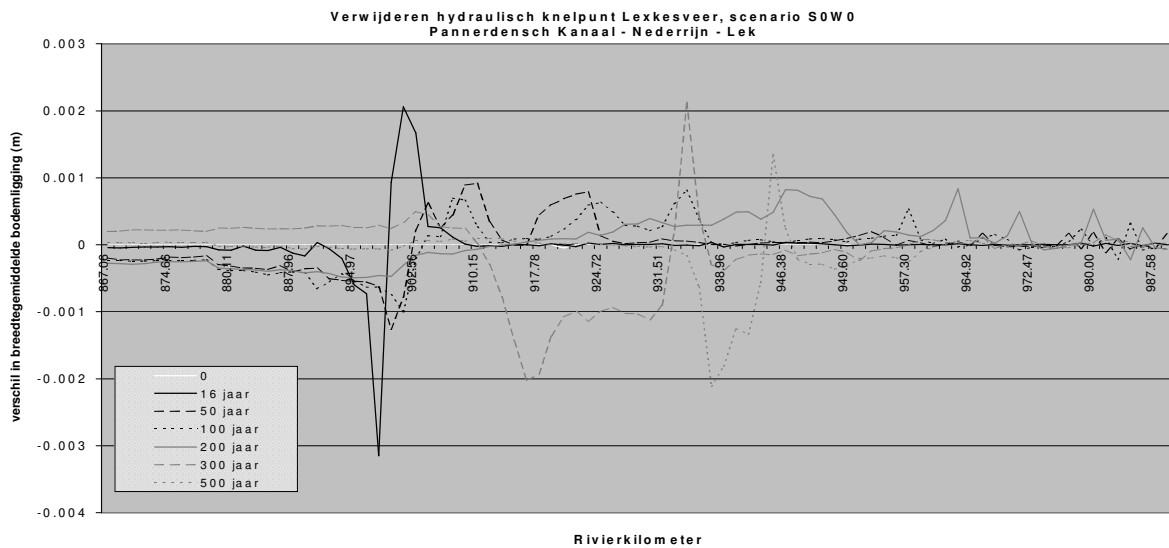


Verskil in bodemligging bij klimaatscenario's S2W4, S3W5 en S3W6 bij variant 2 van de grootschalige uiterwaardverlaging, ten opzichte van de simulatie met klimaatscenario S0W0. (UV2S2W4, UV2S3W5 en UV2S3W6 t.o.v. UV2S0W0)

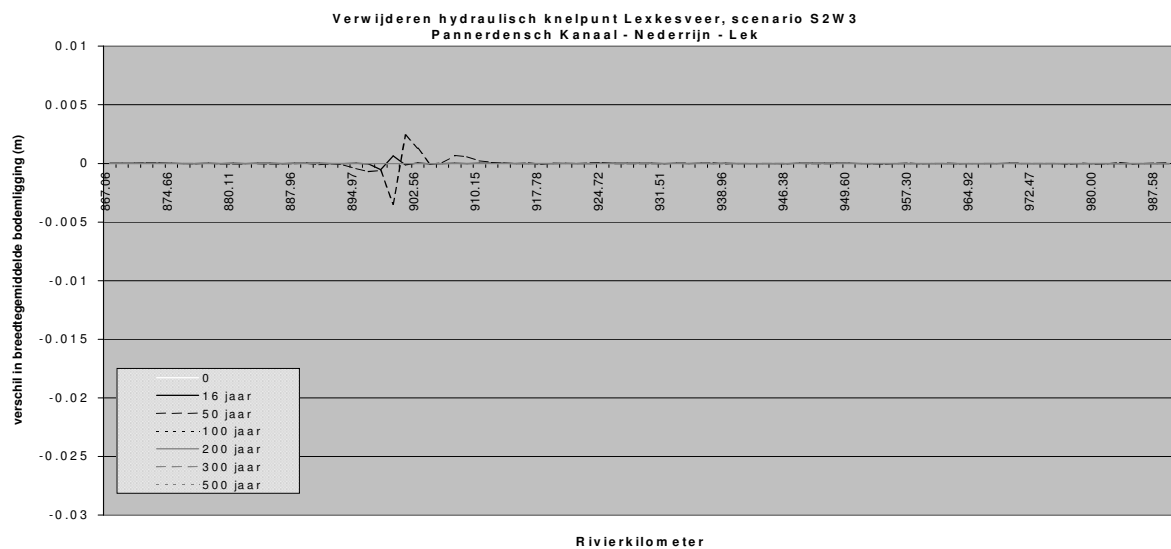
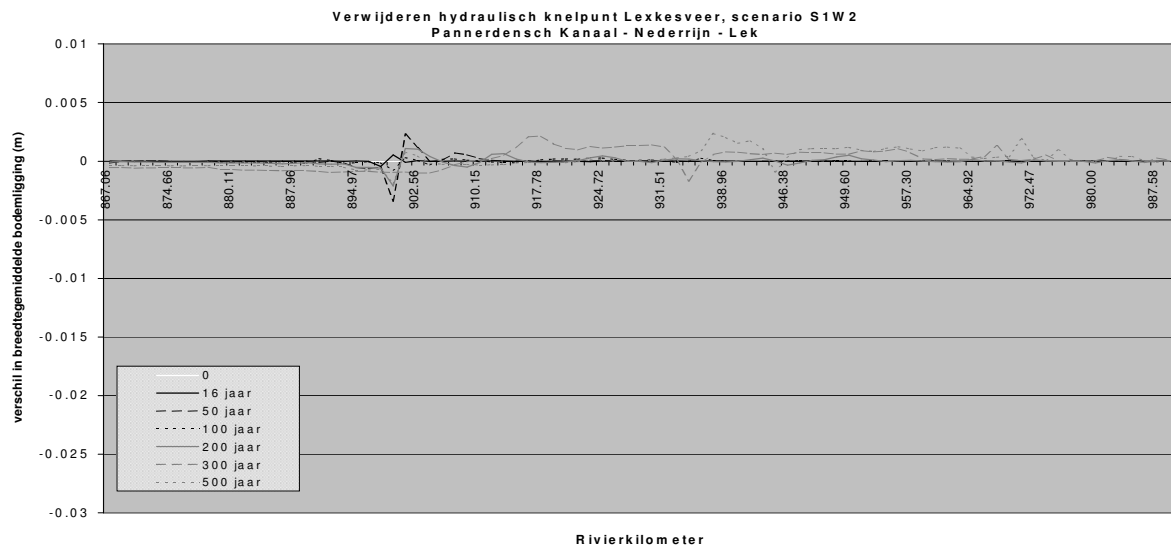
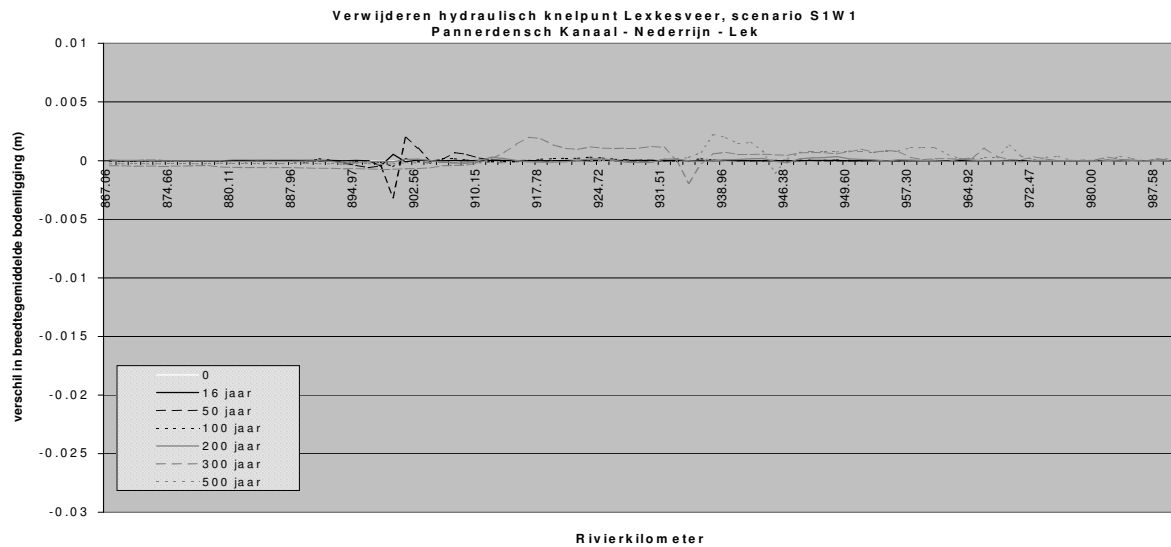
H.3 Verwijderen hydraulisch knelpunt Lexkesveer



Vershil in bodemligging bij klimaatscenario S0W0 bij het verwijderen van het hydraulisch knelpunt Lexkesveer, ten opzichte van de simulatie zonder maatregelen. (HYDS0W0 t.o.v. REFS0W0)

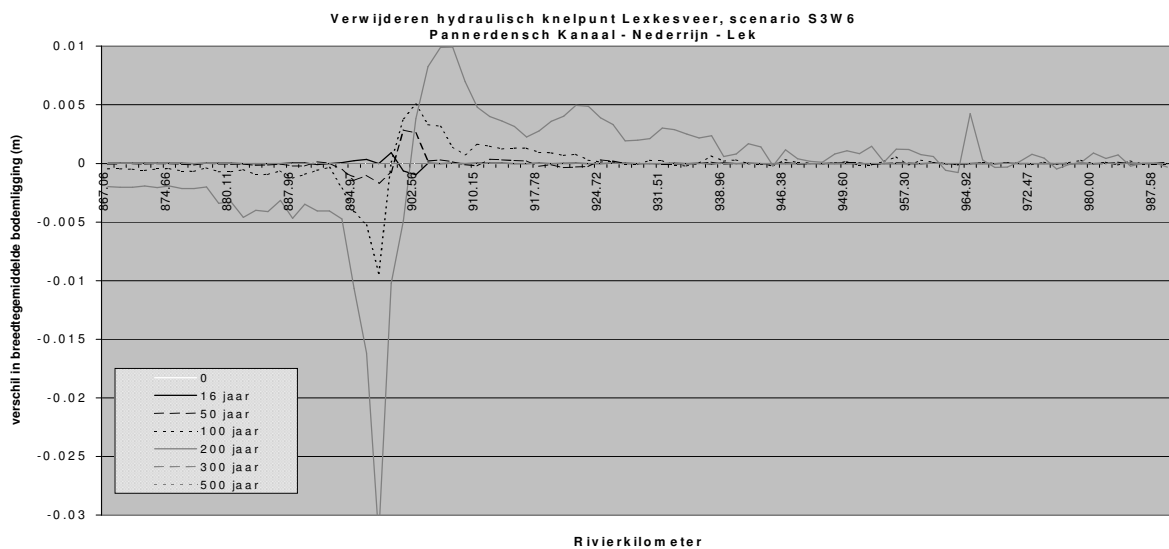
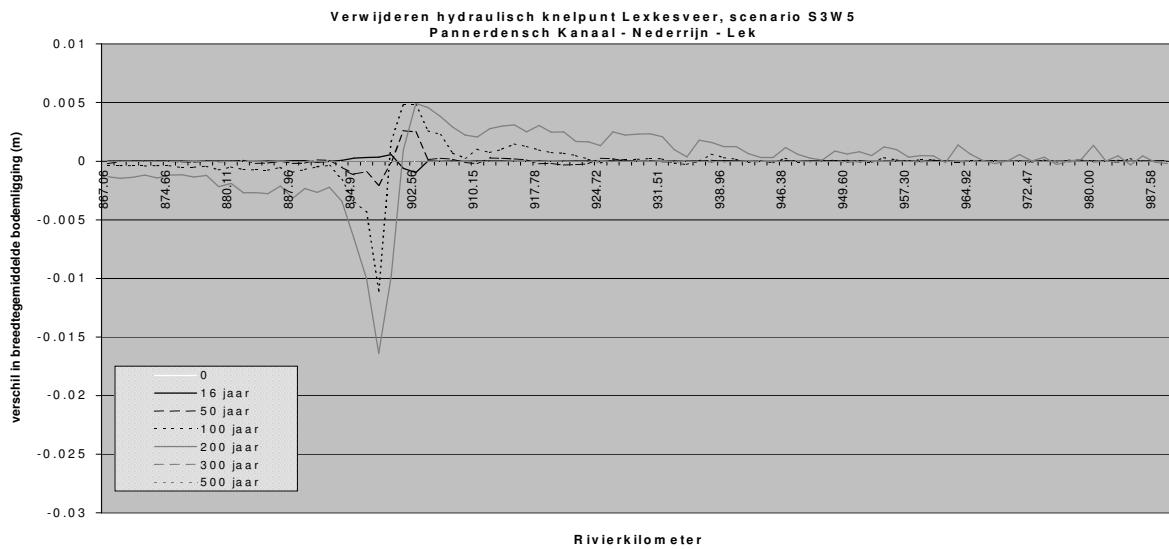
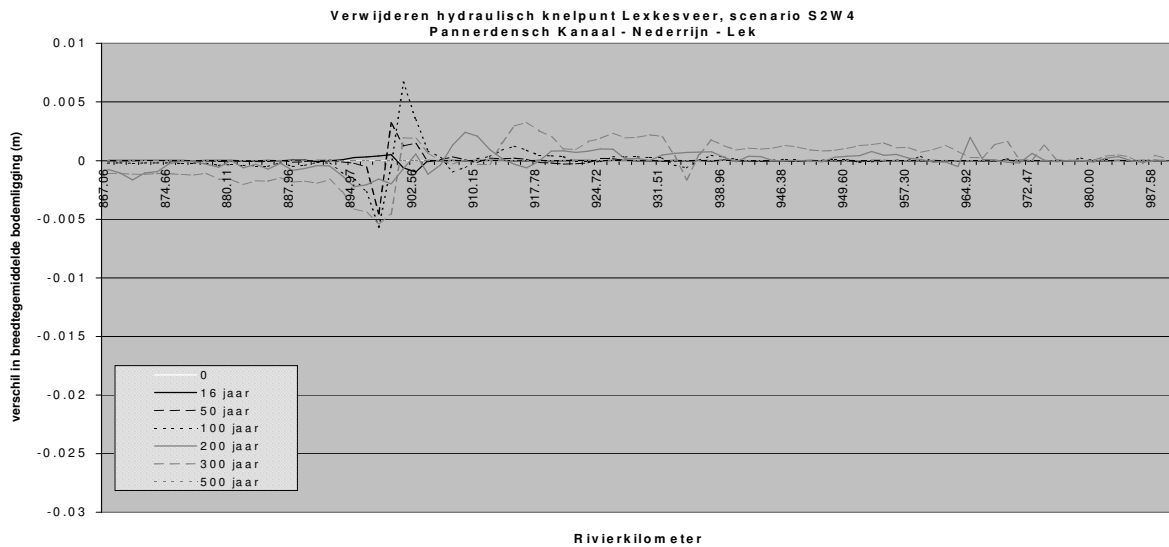


Vershil in bodemligging in de tak "Pannerdensch Kanaal - Nederrijn - Lek" bij klimaatscenario S0W0 bij het verwijderen van het hydraulisch knelpunt Lexkesveer, ten opzichte van de simulatie zonder maatregelen. (HYDS0W0 t.o.v. REFS0W0)



Vershil in bodemligging in de tak "Pannerdensch Kanaal - Nederrijn - Lek" bij klimaatscenario' s S1W1, S1W2 en S2W3 bij het verwijderen van hydraulisch knelpunt Lexkesveer, ten opzichte van de simulatie met klimaatscenario S0W0.

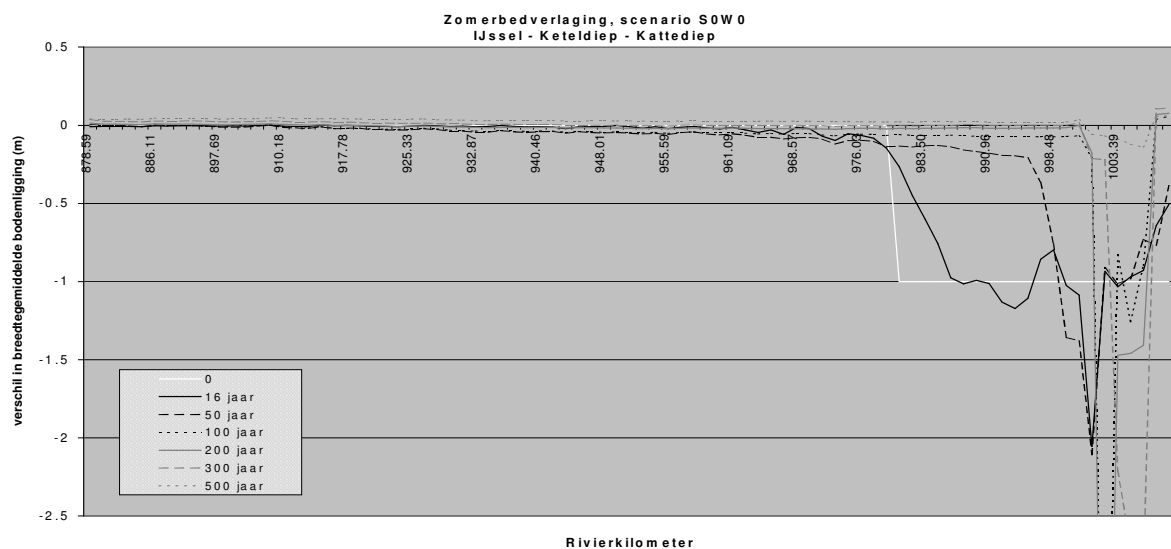
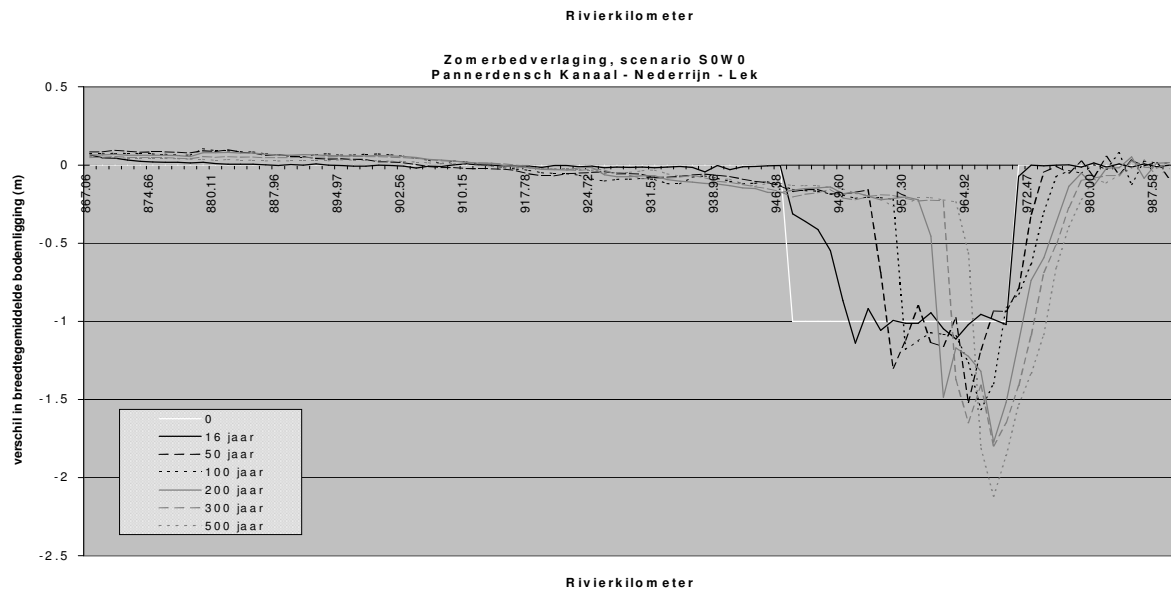
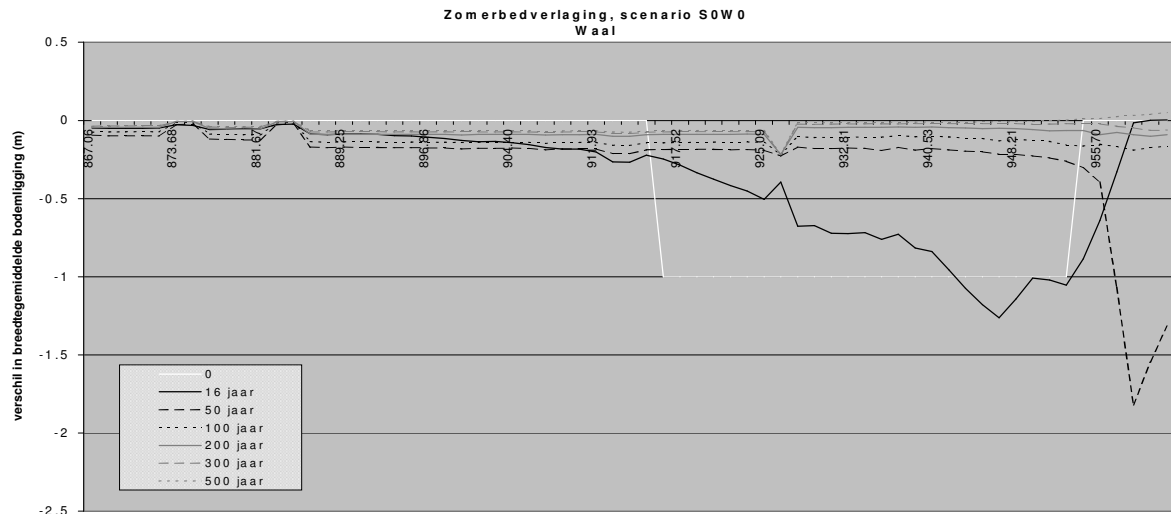
(HYDS1W1, HYDS1W2 en HYDS2W3 t.o.v. HYDS0W0)



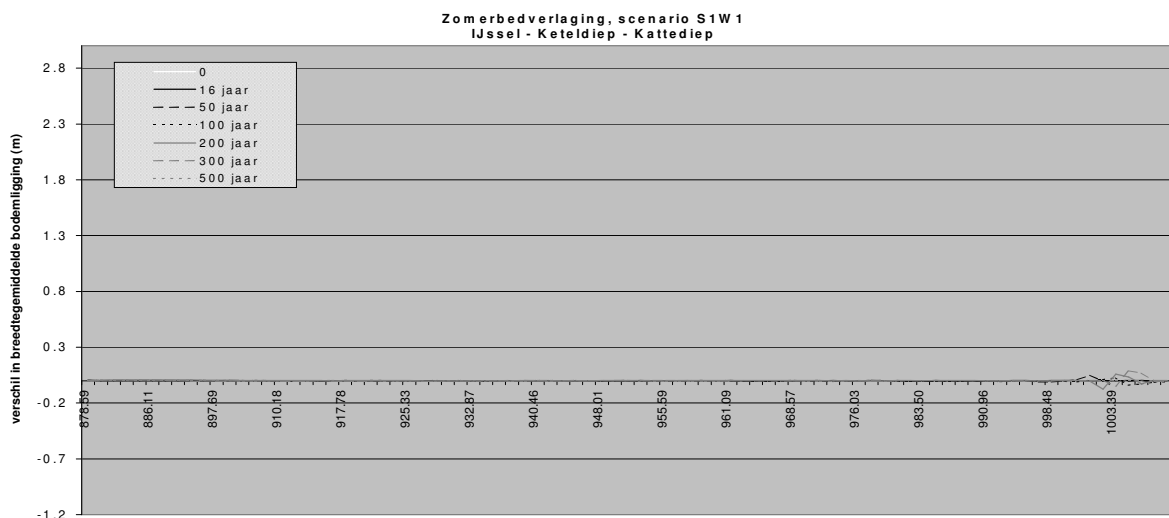
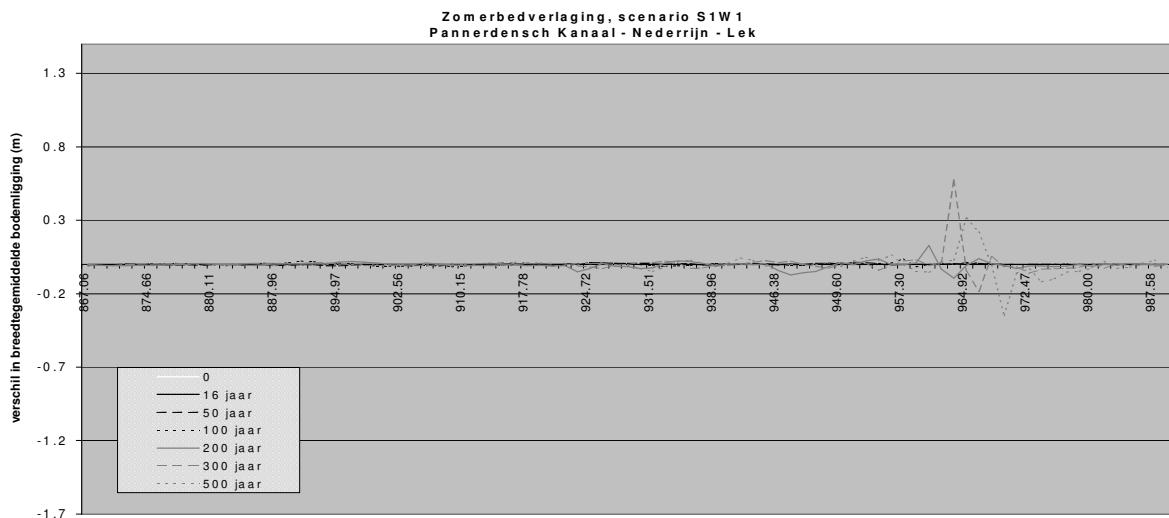
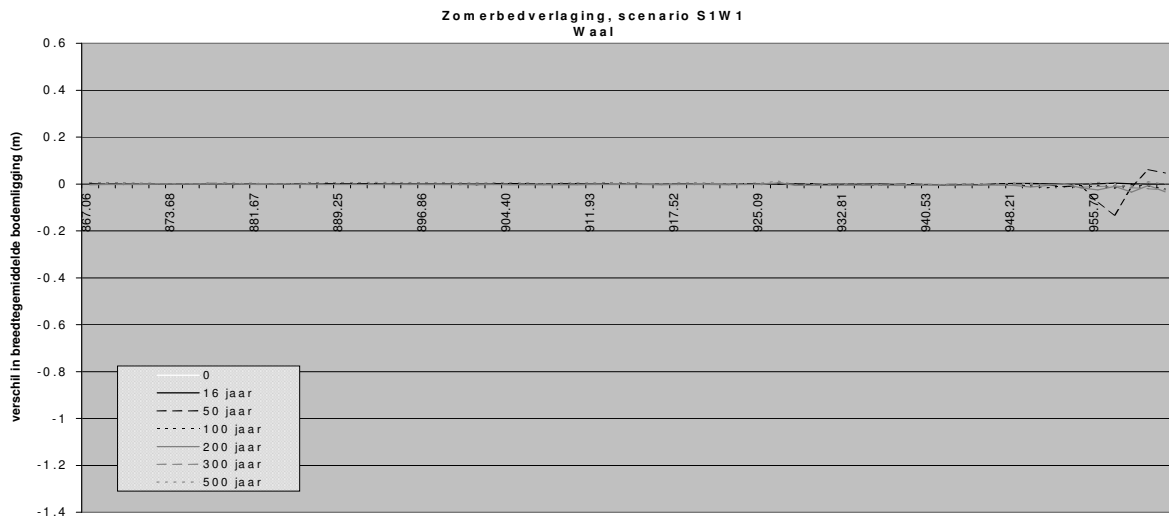
Vershil in bodemligging in de tak "Pannerdensch Kanaal - Nederrijn - Lek" bij klimaatscenario' s S2W4, S3W5 en S3W6 bij het verwijderen van hydraulisch knelpunt Lexkesveer, ten opzichte van de simulatie met klimaatscenario S0W0.

(HYDS2W4, HYDS3W5 en HYDS3W6 t.o.v. HYDS0W0)

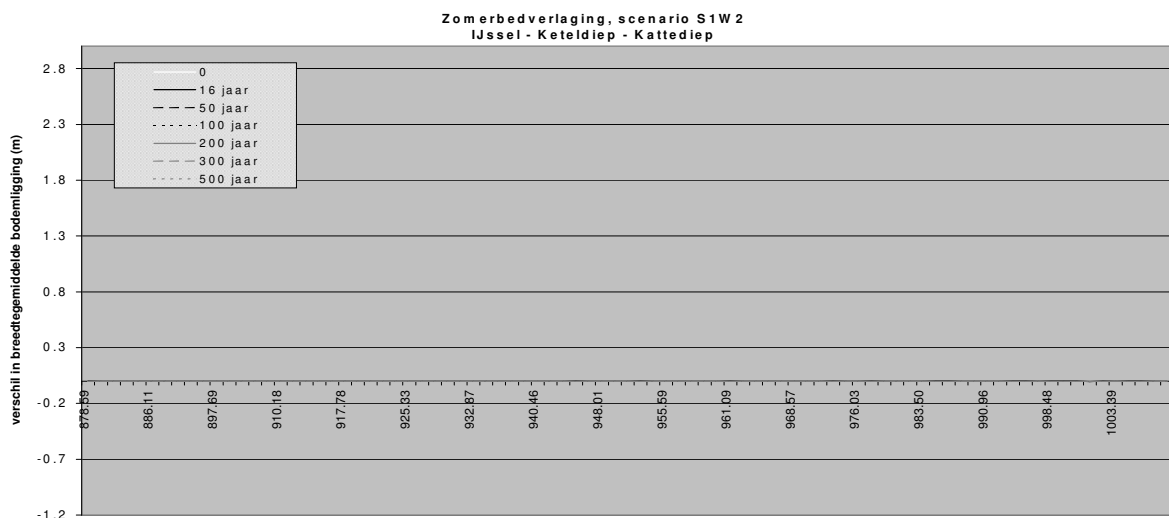
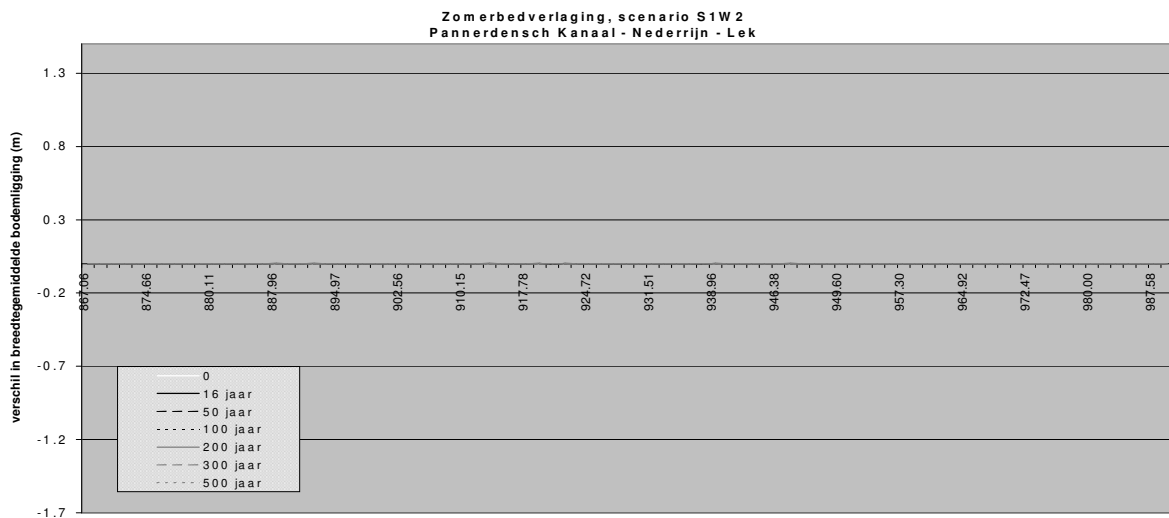
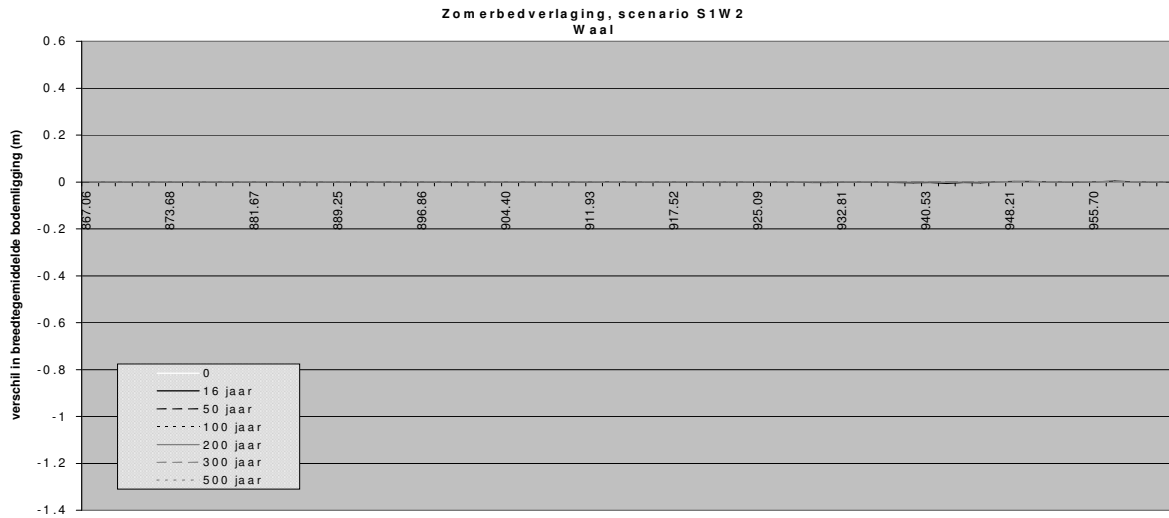
H.4 Zomerbedverlaging



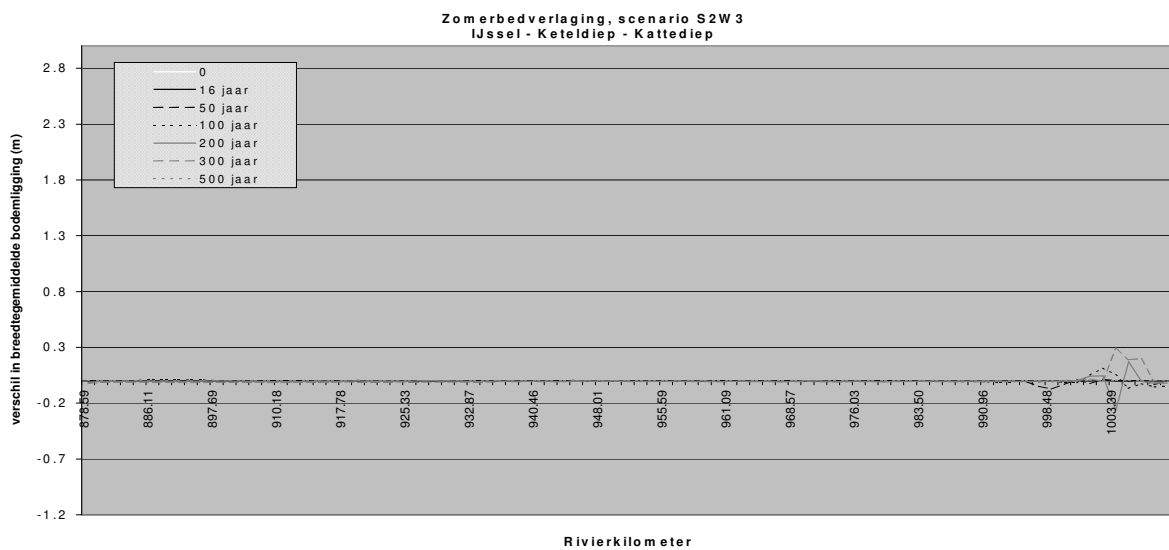
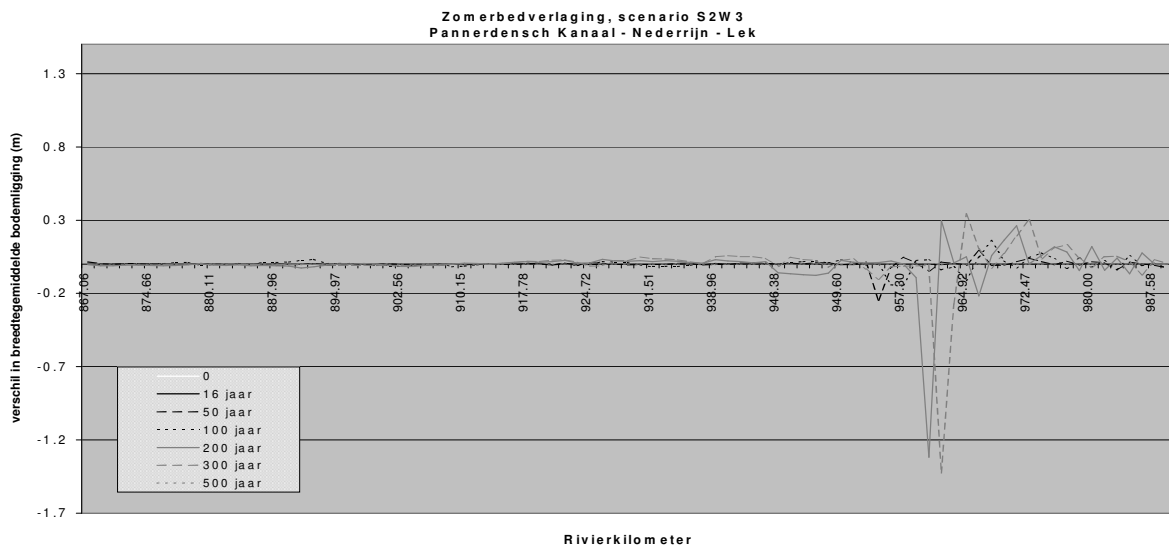
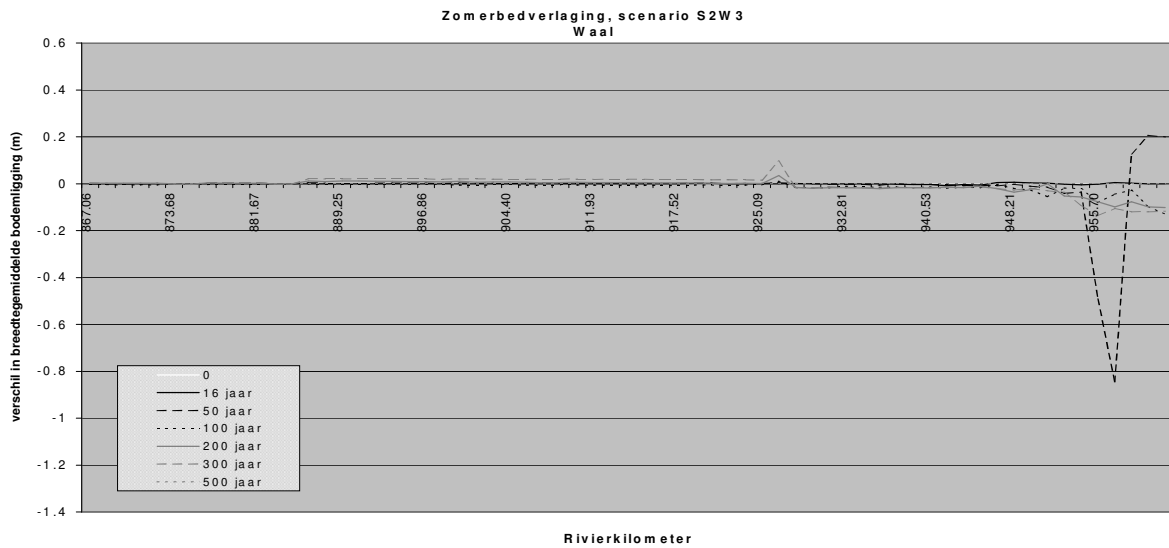
Verskil in bodemligging in de verschillende takken bij klimaatscenario S0W0 bij zomerbedverlaging, ten opzichte van de simulatie zonder maatregelen. (ZOMS0W0 t.o.v. REFS0W0)



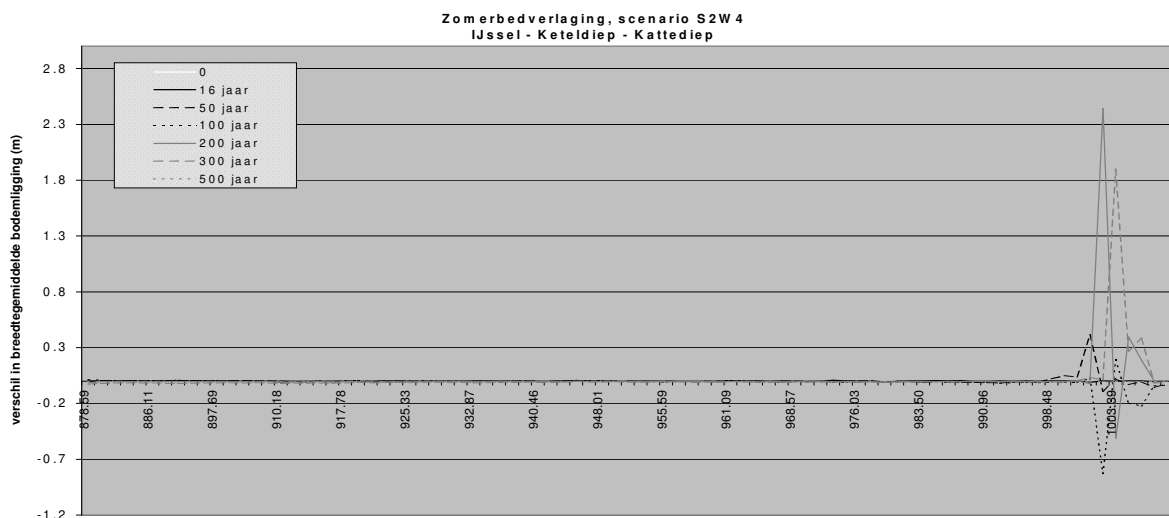
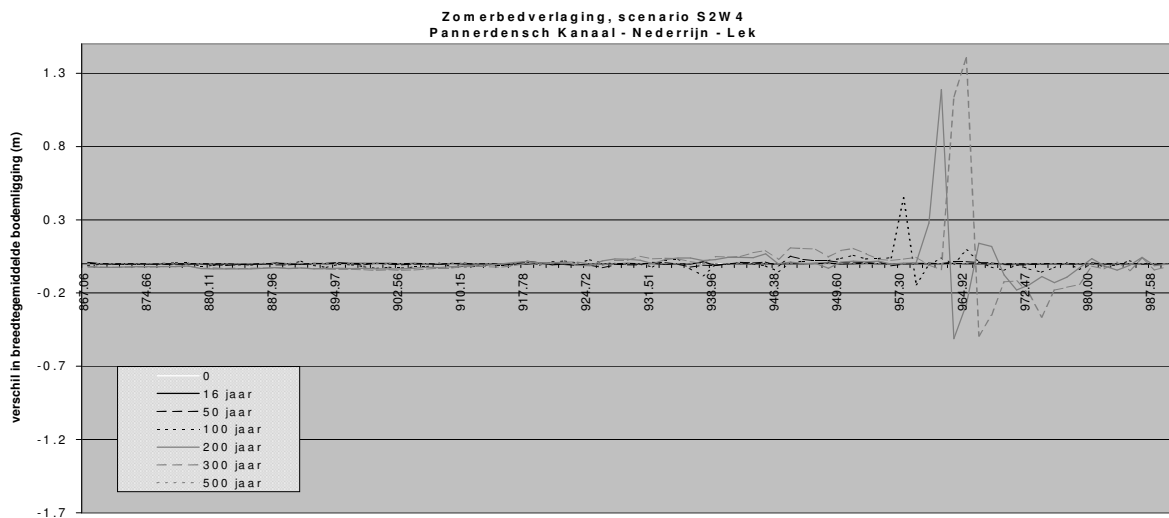
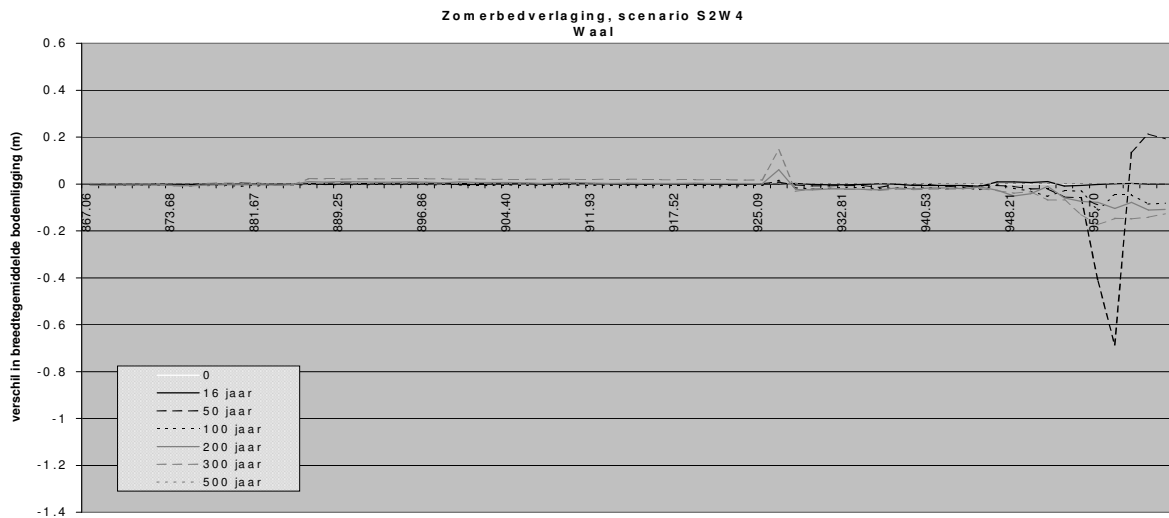
Verskil in bodemligging in de verschillende takken bij klimaatscenario S1W1 bij zomerbedverlaging, ten opzichte van de simulatie met klimaatscenario SOW0. (ZOMS1W1 t.o.v. ZOMSOW0)



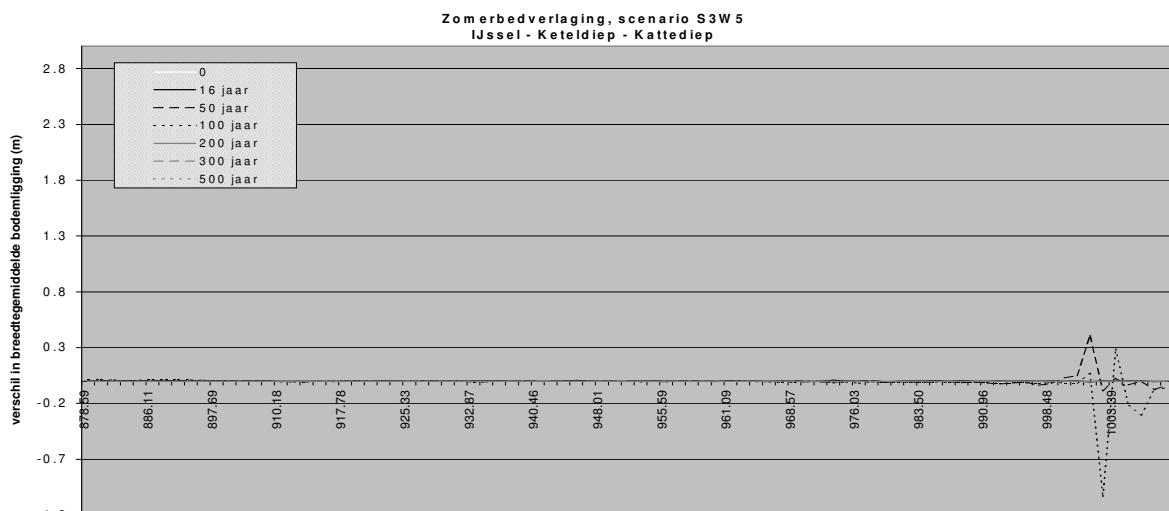
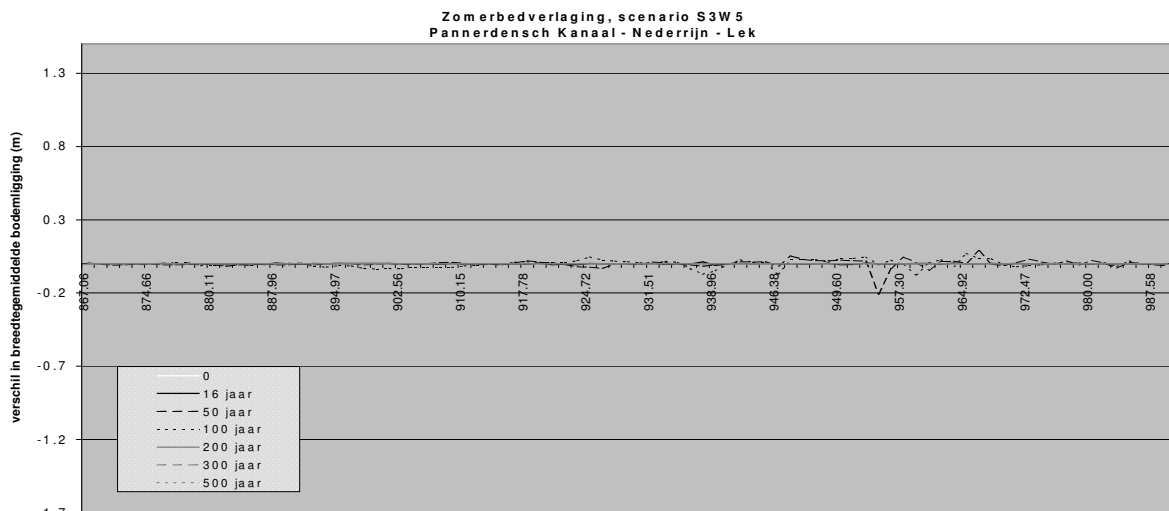
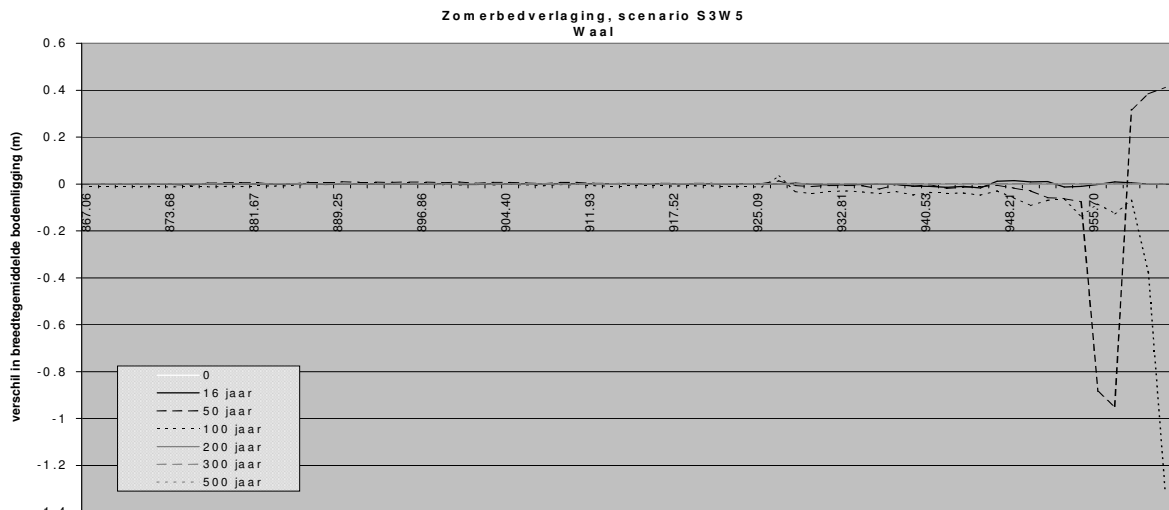
Vershil in bodemligging in de verschillende takken bij klimaatscenario S1W2 bij zomerbedverlaging, ten opzichte van de simulatie met klimaatscenario S0W0. (ZOMS1W2 t.o.v. ZOMS0W0)



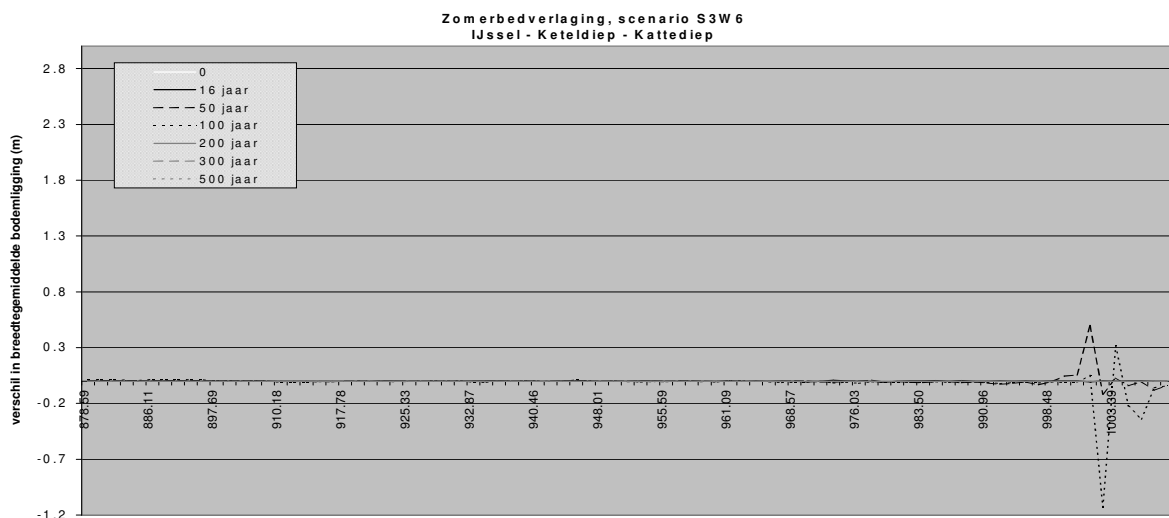
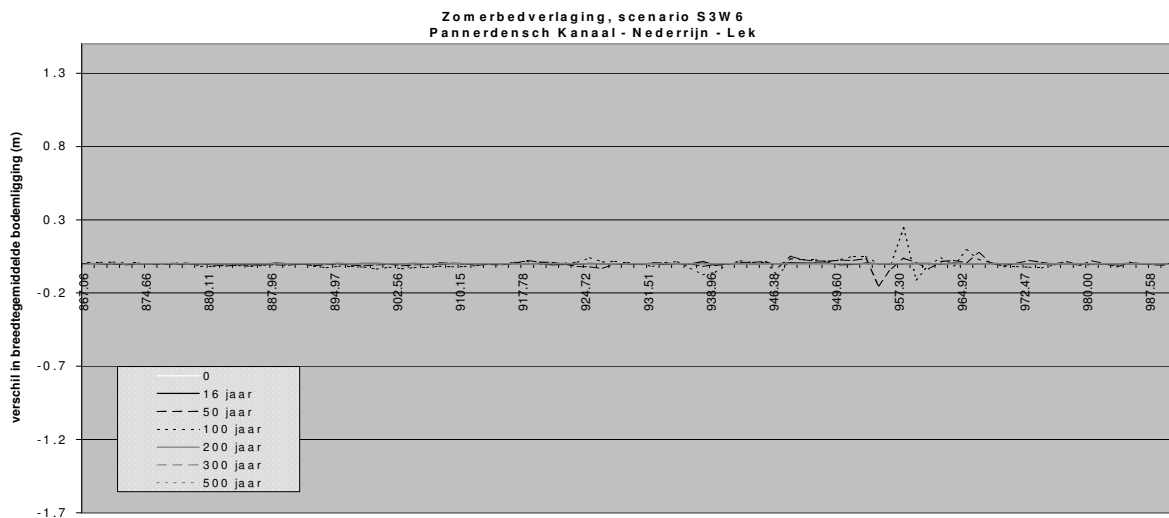
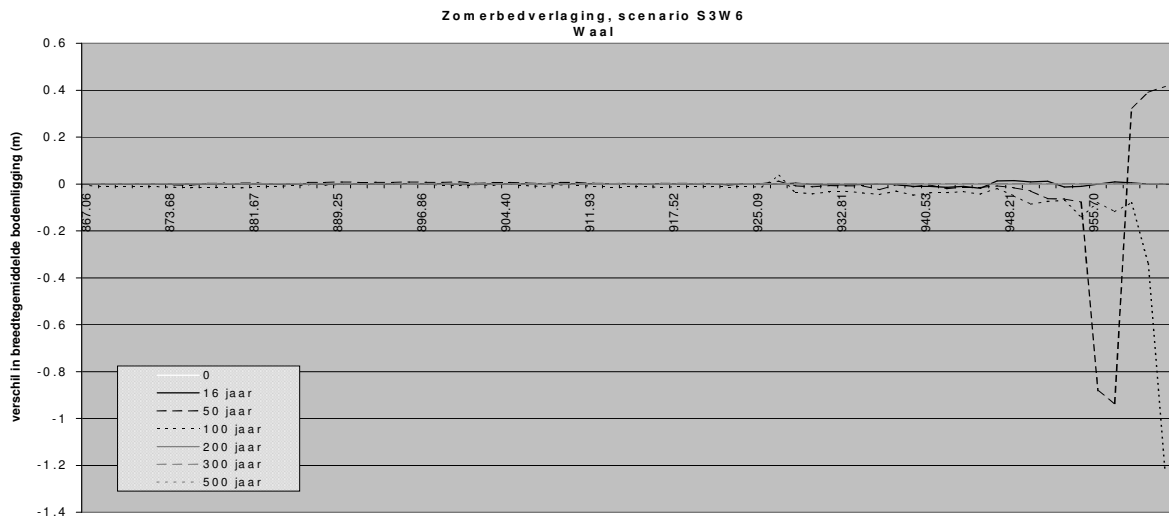
Vershil in bodemligging in de verschillende takken bij klimaatscenario S2W3 bij zomerbedverlaging, ten opzichte van de simulatie met klimaatscenario S0W0. (ZOMS2W3 t.o.v. ZOMS0W0)



Vershil in bodemligging in de verschillende takken bij klimaatscenario S2W4 bij zomerbedverlaging, ten opzichte van de simulatie met klimaatscenario S0W0. (ZOMS2W4 t.o.v. ZOMS0W0)

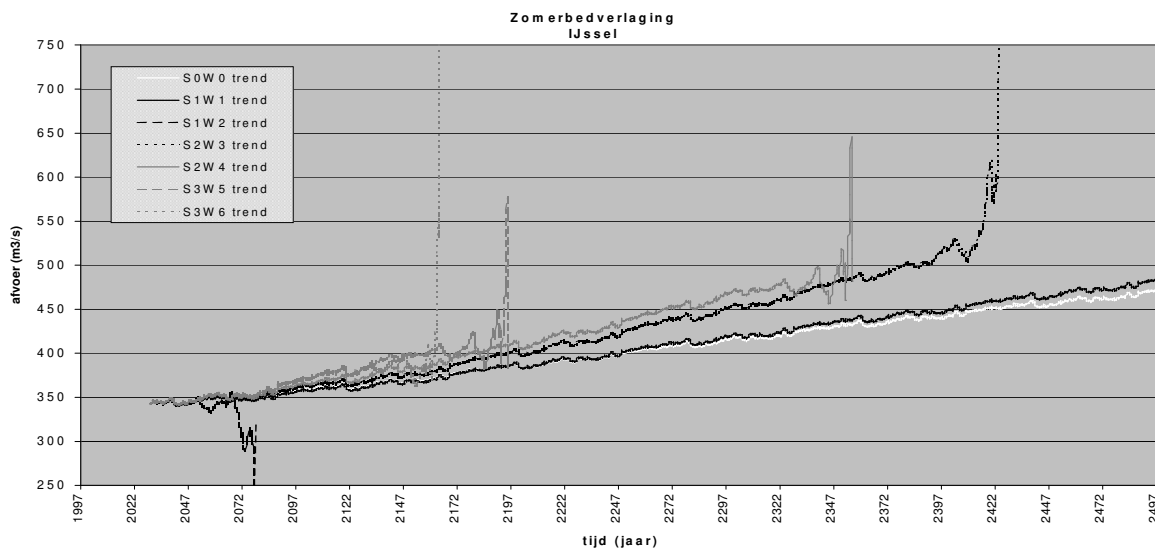
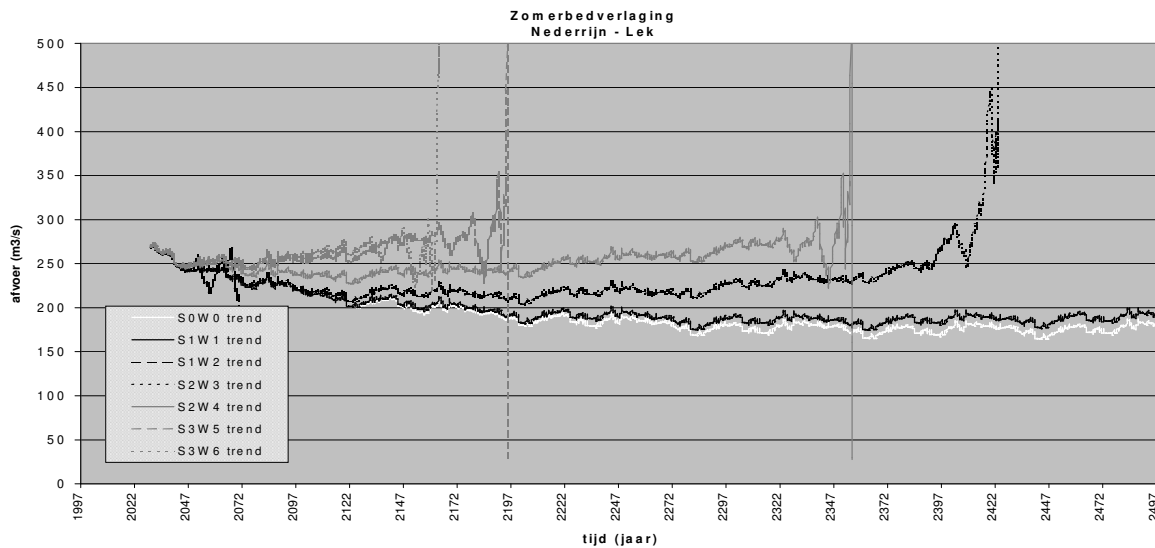
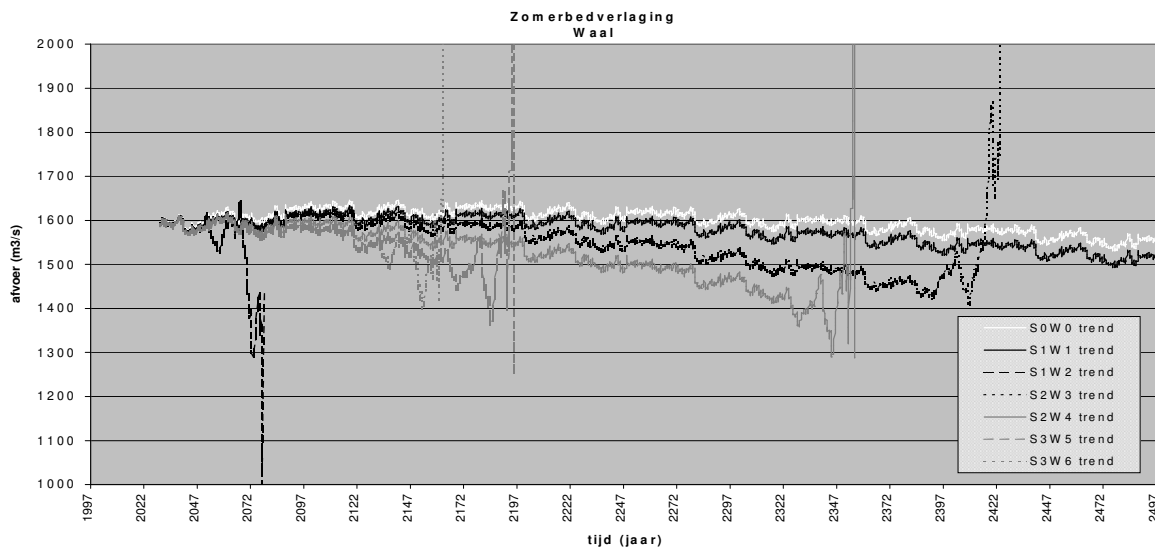


Vershil in bodemligging in de verschillende takken bij klimaatscenario S3W5 bij zomerbedverlaging, ten opzichte van de simulatie met klimaatscenario S0W0. (ZOMS3W5 t.o.v. ZOMS0W0)

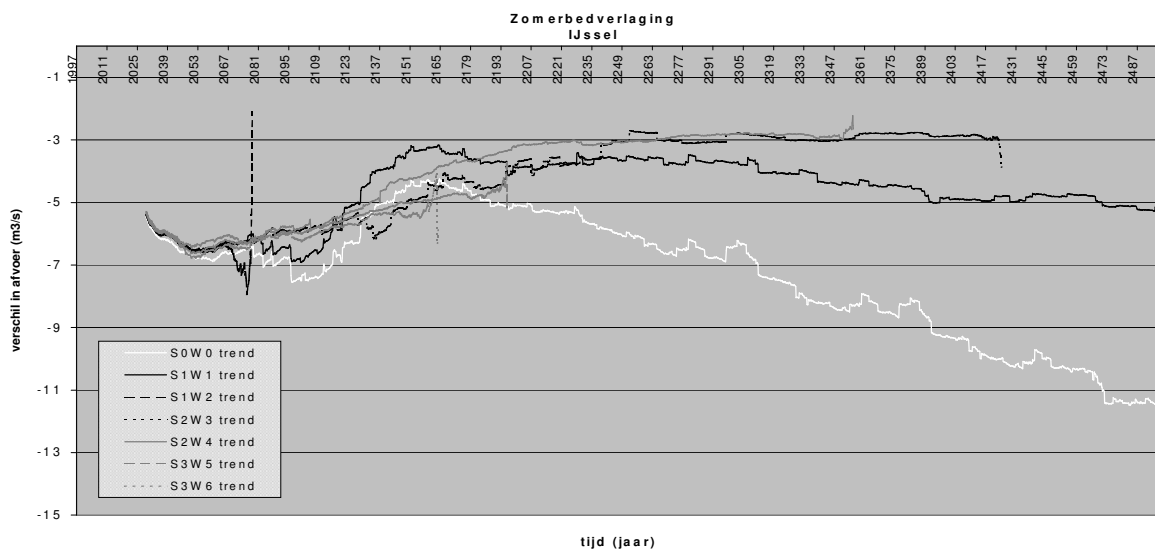
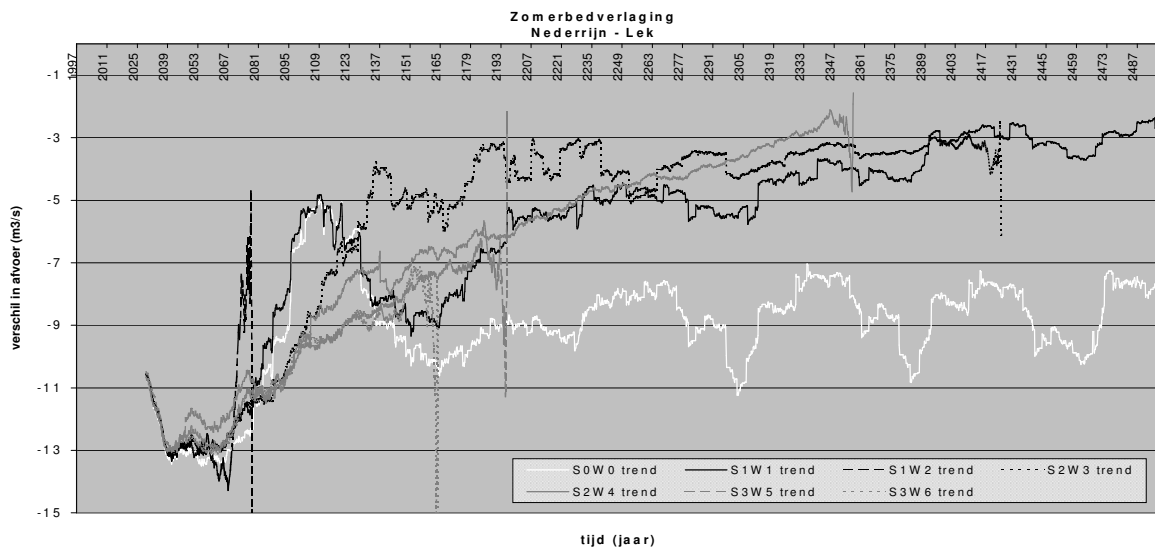
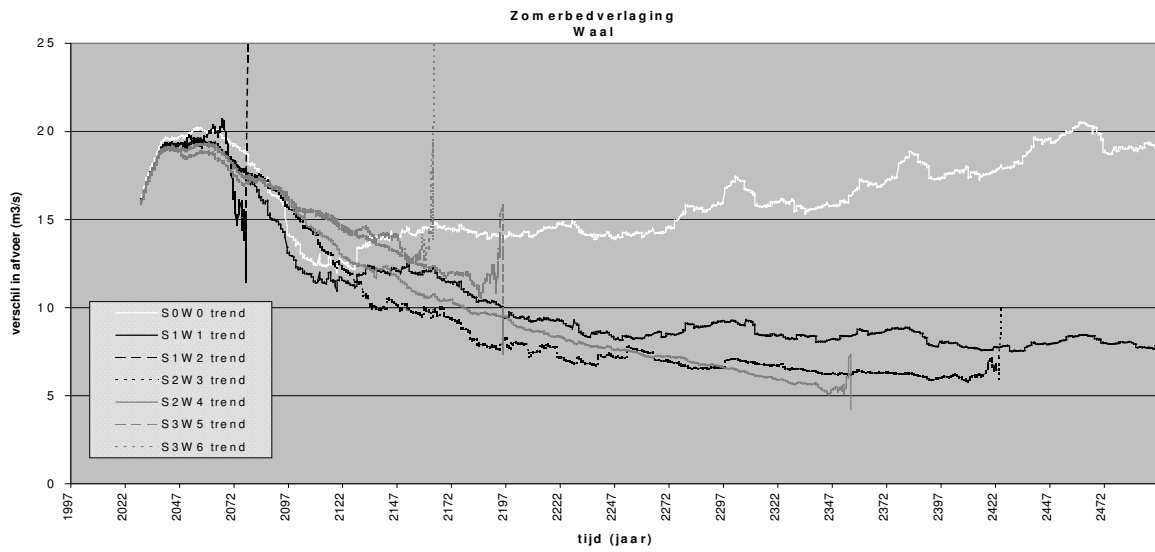


Vershil in bodemligging in de verschillende takken bij klimaatscenario S3W6 bij zomerbedverlaging, ten opzichte van de simulatie met klimaatscenario S0W0. (ZOMS3W6 t.o.v. ZOMS0W0)

Afvoerveranderingen bij zomerbedverlaging



Verandering in gemiddelde afvoer bij de berekeningen met maatregel "Zomerbedverlaging" bij de verschillende klimaatscenario's



Verskil in gemiddelde afvoer bij de berekeningen met maatregel "Zomerbedverlaging" bij de verschillende klimaatscenario's ten opzichte van de gemiddelde afvoer bij de referentieberekeningen.