



Universiteit Twente

Beoordeling van de kwaliteit van hoogwaterparameters berekend voor de Nederlandse Maas

juli 2007

Auteur

P.C. Jansen

Afstudeercommissie

Dr. M.S. Krol

Ir. A.J. Wesselink

Voorwoord

Dit verslag is het resultaat van mijn afstudeeronderzoek voor de studie Civiele Techniek & Management aan de Universiteit Twente. Het betreft een onderzoek naar de kwaliteit van de hoogwaterparameters berekend voor de Nederlandse Maas.

Ik wil van deze gelegenheid gebruik maken om de leden van de afstudeercommissie, Anne Wesselink en Maarten Krol, te bedanken voor hun ondersteuning, adviezen en tijd. Naast de relevante inbreng voor het afstudeeronderzoek hebben ze mij ervan overtuigd om kritischer te kijken naar zowel bestaand onderzoek als mijn eigen onderzoek. Ten tweede wil ik graag een aantal personen van buiten de Universiteit Twente bedanken voor hun input tijdens de interviews die ik heb afgelegd. Van Rijkswaterstaat-Limburg wil ik Joop Gerretsen bedanken voor zijn inbreng en de bereidwilligheid om mij van de nodige gegevens te voorzien. En Jan Tekstra voor de veldtrip en de uitleg over zijn ervaringen tijdens hoogwatermetingen. Verder ben ik Marcel de Wit van het Rijksinstituut voor Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA) te Arnhem dankbaar voor zijn verhelderende kijk op de maatgevende afvoer en de beschikbaar gestelde rapportages. Hetzelfde geldt voor Paul Torfs van de Universiteit Wageningen die mij met andere ogen achter het hoogwaterbeheer heeft laten kijken. Verder gaat mijn dank uit naar Hermjan Barneveld van HKV LIJN IN WATER voor de informatie via e-mail en Matthijs Kok van HKV LIJN IN WATER voor het interview tijdens de beginfase van mijn onderzoek.

Ondanks het uitlopen van de planning ben ik tevreden met het eindresultaat. Ik was me ervan bewust dat het een breedvoerige analyse zou worden om tot het eindresultaat te komen. Juist daarom was het voor mij een uitdaging en bovendien leerzaam.

Nieuw-Bergen, juli 2007

Paul Jansen

Samenvatting

Voor de beoordeling naar de kwaliteit van de hoogwaterparameters van de Maas zijn de onzekerheden geanalyseerd en beoordeeld die voorkomen in de processtappen voor berekening van de maatgevende afvoer. Om uit te leggen waarom deze beoordeling gewenst is, voldoet een toelichting naar de toepassing van de maatgevende afvoer. De maatgevende afvoer is de normaalafvoer die de rivier veilig zou moeten kunnen verwerken. Wanneer de maatgevende afvoer (MA) door het Ministerie van Verkeer en Waterstaat wordt verhoogd dan zijn rivierverruimende ingrepen nodig om de veiligheid te kunnen waarborgen. De MA heeft dus indirect veel invloed op het rivierlandschap. Het is daarom evident te weten of de MA berekend is volgens betrouwbare methoden gebaseerd op betrouwbare gegevens. Dit afstudeeronderzoek bestaat uit een onzekerheidsanalyse naar de parameters, modellen en methoden die gebruikt zijn voor bepaling van de MA. De analyse is gebaseerd op reeds bestaande onderzoeken in opdracht van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Namelijk de Boertien I (1993) en Boertien II (1994) onderzoeken en de Hydraulische Randvoorwaarden 2001 en 2006. Deze onderzoeken zijn vervolgonderzoeken, vandaar dat ze allen betrokken zijn voor de analyse. Ter uitbreiding en bevordering van een objectieve analyse worden twee alternatieve onderzoeken naar de maatgevende afvoer (Gerretsen, 2001 en Klunhaar, 2003) aan de analyse toegevoegd.

De maatgevende afvoer is een afvoer die volgens een schatting eens in de 1.250 jaar kan optreden. De schatting is gedaan met behulp van statistiek. De statistische berekeningen zijn gebaseerd op een tijdserie bestaande uit de hoogste jaarafvoeren die zijn geregistreerd sinds 1911. De tijdserie met topafvoeren heeft nu een lengte van bijna 100 jaar. Op basis van deze tijdserie moet een extrapolatie worden gedaan voor het bepalen van een afvoer die eens in de 1.250 jaar kan optreden. De onzekerheidsanalyse waar dit afstudeeronderzoek om draait begint bij de herkomst van de topafvoeren in de tijdserie die zijn afgeleid van gemeten afvoeren en waterstanden met meetapparatuur in de Maas. Voor de onzekerheidsanalyse is het proces voor berekening van de maatgevende afvoer opgedeeld in vijf deelprocessen. Dit zijn achtereenvolgens:

1. Meting van de afvoeren Q en waterstanden H , voor het:
2. construeren van de QH -relatie, waarmee:
3. de tijdserie met topafvoeren Q_{\max} wordt afgeleid door invoer H_{\max} in QH -relatie.
4. Toepassing van statistiek gebaseerd op de tijdserie met Q_{\max} t.b.v. modellering Q_T , voor:
5. bepaling van de maatgevende afvoer $Q_{T=1250}$

De onzekerheidsanalyse is uitgevoerd met behulp van de NUSAP methode. Met deze methode zijn de onzekerheden in de deelprocessen van de MA systematisch gekwantificeerd en gekwalificeerd. Het kwantificeren van de onzekerheden betreft het bepalen van de bandbreedte onzekerheid (uitgedrukt in een percentage) rond een parameter. Het kwalificeren bestaat uit een beoordeling van de gebruikte methoden, gebruikte hoeveelheid data en toegepaste statistiek. De gekwalificeerde onzekerheden zijn weer gewaardeerd met een score. Daarvoor is de zogenaamde Pedigree tabel gebruikt met daarin criteria voor de methodische, empirische en statistische kwaliteit. Is de beoordeling in overeenstemming met criteria die op een matige kwaliteit duiden, dan wordt de bijbehorende lage score toegekend. Voor een goede kwaliteit wordt vanzelfsprekend een hogere score toegekend.

Uit de opsomming van de vijf deelprocessen valt af te leiden dat deze van elkaar afhankelijk zijn. Zo ook de 'hoogwater'parameters in het proces en de onzekerheden die daarbij horen. Het onderzoek is globaal opgedeeld in twee delen. Voor het eerste gedeelte zijn de onzekerheden van de

hoogwaterparameters met behulp van NUSAP gekwantificeerd en gekwalificeerd. In het tweede gedeelte is de voortplanting van de kwantitatieve en kwalitatieve onzekerheden berekend.

De voortgeplante onzekerheden bepalen uiteindelijk de kwaliteit van de maatgevende afvoer. De kwantitatieve onzekerheden zijn alleen bepaald voor de meest recente MA volgens de Hydraulische Randvoorwaarden 2006. Daarvoor is een maatgevende afvoer berekend van 4.000 m³/s.

Het doorrekenen van de voortgeplante kwantitatieve onzekerheden heeft geleid tot een onzekerheid rond de maatgevende afvoer van 26%. Dit is nog zonder de statistische onzekerheid. De kansverdelingfunctie die gefit is op de tijdserie brengt nog een extra onzekerheid met zich mee in de vorm van het betrouwbaarheidsinterval. Wordt deze toegevoegd dan komt de totale kwantitatieve onzekerheid rond de huidige maatgevende afvoer op 54%.

De kwalitatieve onzekerheden zijn voor alle Rijkswaterstaat onderzoeken en alternatieve onderzoeken met de Pedigree tabel beoordeeld. Voor het berekenen van de voortplanting van de gekwalificeerde onzekerheden (de scores) zijn volgens NUSAP een aantal rekenregels toe te passen. Afhankelijk van of het een optelling, deling of vermenigvuldiging is, én de grootte van de kwantitatieve onzekerheid, wordt het gewicht van de parameter bepaald. Het gewicht geldt vanzelfsprekend ook voor de bijbehorende Pedigree scores. Op deze manier zijn de scores door het hele proces doorgerekend. Uiteindelijk heeft dat geleid tot scores voor de voortgeplante methodische, empirische, en statistische kwaliteit van de geëvalueerde onderzoeken

Resultierend: de empirische en methodische kwaliteit hebben voor alle Rijkswaterstaat onderzoeken een score van 2.4, uit een range van 0 tot 4. De kwaliteit is - uitgerukt in NUSAP termen - gebaseerd op (in)directe metingen en aanvaardbare methoden. De statistische kwaliteit scoort op alle RWS onderzoeken waarbij klassieke statistiek is toegepast een 2, wat beduidend lager is dan de alternatieve onderzoeken. De oorzaak ligt bij het niet volledig passeren van de statistische toetsen.

Van het alternatieve onderzoek Gerretsen scoort de empirische kwaliteit wat lager en de statistische kwaliteit wat hoger dan de RWS onderzoeken. De methodische kwaliteit is met een score van 1.6 erg laag vanwege de niet bewezen methode voor de frequentieanalyse. Het onderzoek van Klunhaar scoort met name voor de statistische kwaliteit hoog omdat de Bayesiaanse statistiek die daarvoor is toegepast de mogelijkheid biedt extra gegevens (subjectieve waarnemingen van historische hoogwaters) bij de frequentieanalyse te betrekken. Toepassing van Bayesiaanse statistiek geniet zodoende de voorkeur boven de klassieke statistiek.

Voor het verbeteren van de huidige maatgevende afvoer wordt aanbevolen om de aandacht te vestigen op de voorlaatste stap, de frequentieanalyse. De historische afvoeren zijn immers niet meer te reproduceren en daarmee ook niet de QH-relaties. Het uitbreiden van de frequentieanalyse met meer kansverdelingfuncties of het introduceren van de Bayesiaanse statistiek draagt bij aan een breder draagvlak voor de vastlegging van de maatgevende afvoer.

De NUSAP methode waarmee de onzekerheden zijn gekwantificeerd en gekwalificeerd is een prima uitgangspunt geweest voor de onzekerheidsanalyse. Alleen voor berekening van de voortplanting van de onzekerheden konden de rekenregels volgens NUSAP niet altijd worden toegepast. De QH-relatie is hiervan de oorzaak. De grafische afleiding van de QH-relatie op basis van meetpunten gaf moeilijkheden bij het bepalen van de gewichten en de voortplanting van de kwantitatieve en kwalitatieve onzekerheden. Desondanks is met creatieve oplossingen toch tot een eindresultaat gekomen.

Inhoudsopgave

VOORWOORD

SAMENVATTING

LIJST VAN FIGUREN 5

LIJST VAN TABELLEN..... 7

1. INLEIDING..... 9

1.1 OPBOUW VAN HET RAPPORT 10

1.2 ONDERZOEKEN RIJKSWATERSTAAT 12

1.3 ALTERNATIEVE ONDERZOEKEN 13

1.4 METHODIEK VOOR DE ANALYSE 13

2. METING H EN Q..... 17

2.1 INLEIDING 17

2.1.1 Hoogwatermetingen 18

2.1.2 Beoordeling onzekerheden 19

2.2 MEETINSTRUMENTEN 20

2.2.1 Waterstandsmeting 21

2.2.2 Stroomsnelheidsmeting 24

2.2.3 Afvoermeting 34

2.2.4 Bepaling dwarsprofiel 36

2.5 OVERZICHT BEOORDELING ONZEKERHEDEN 38

3. QH-RELATIES..... 39

3.1 INLEIDING 39

3.1.1 Veranderingen QH-relaties in de 20^e eeuw 40

3.1.2 Onzekerheden 41

3.1.3 Historische QH-relaties 45

3.2 PERIODE 1911-1932 47

3.3 PERIODE 1933-1950 52

3.4 PERIODE 1951-1970 55

3.5 PERIODE 1971 -1987 59

3.6 PERIODE 1988 - 2000 62

3.7 PERIODE VANAF 2000 64

3.8 OVERZICHT BEOORDELING ONZEKERHEDEN 67

4. TIJDSERIE HOGE Q 68

4.1 INLEIDING 68

4.1.2 Gebruikte basismetreeks 68

4.1.3 Toegevoegde historische afvoergegevens 69

4.1.4 Correcties afvoergegevens 69

4.1.5 Beoordeling onzekerheden 70

4.2 ONDERZOEK BOERTIEN I 71

4.2.1 Gebruikte basismetreeks 71

4.2.2 Correcties afvoergegevens 72

4.2.3 Onzekerheden 72

4.3 ONDERZOEK BOERTIEN II 73

4.3.1 Gebruikte basismetreeks 73

4.3.2 Verlenging basismetreeks 73

4.3.3 Correcties afvoergegevens 73

4.3.4 Onzekerheden 75

4.4 HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN 2001 77

4.4.1 Gebruikte basismetreeks 77

4.4.2 Verlenging basismetreeks.....	77
4.4.3 Correcties afvoergegevens.....	78
4.4.4 Onzekerheden.....	79
4.5 HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN 2006.....	81
4.5.1 Gebruikte basismetreeks.....	81
4.5.2 Correcties afvoergegevens.....	82
4.5.3 Onzekerheden.....	82
4.6 METHODE KLUNHAAR.....	83
4.6.1 Gebruikte basismetreeks.....	83
4.6.2 Toevoeging extra gegevens.....	83
4.6.3 Correcties afvoergegevens.....	83
4.6.4 Onzekerheden.....	83
4.7 METHODE GERRETSEN.....	84
4.7.1 Gebruikte basismetreeks.....	84
4.7.2 Verlenging basismetreeks.....	85
4.7.3 Correcties afvoergegevens.....	85
4.7.4 Onzekerheden.....	86
4.8 OVERZICHT BEOORDELING ONZEKERHEDEN.....	87
5. STATISTIEK.....	88
5.1 INLEIDING.....	88
5.1.1 Overzicht van in de onderzoeken toegepaste statistiek.....	88
5.1.3 Werkwijze frequentieanalyse.....	90
5.1.4 Onzekerheden.....	93
5.2 EVALUATIE VAN BESTAAND ONDERZOEK.....	96
5.2.1 Boertien I.....	96
5.2.2 Boertien II.....	100
5.2.3 Hydraulische Randvoorwaarden 2001.....	102
5.2.4 Hydraulische Randvoorwaarden 2006.....	103
5.2.5 Onderzoek Klunhaar.....	104
5.2.6 Onderzoek Gerretsen.....	108
5.2.7 Gevoeligheidsanalyse.....	112
5.3 OVERZICHT BEOORDELING ONZEKERHEDEN.....	117
6. BEOORDELING MAATGEVENDE AFVOER.....	118
6.1 VOORTPLANTING VAN ONZEKERHEDEN.....	118
6.1.1 Voortplanting gekwantificeerde onzekerheden.....	118
6.1.2 Voortplanting gekwalificeerde onzekerheden.....	123
6.2 ANALYSE RESULTATEN EN BEOORDELING.....	132
6.3 PERSPECTIEVEN OM DE KWALITEIT TE VERHOGEN.....	137
6.4 METHODISCHE REFLECTIE.....	139
LITERATUUR.....	142
BIJLAGE 1. ADCP METINGEN BORGHAREN EN ST. PIETER.....	145
BIJLAGE 2. OVERZICHT VERANDERINGEN GRENSMAAS.....	146
BIJLAGE 3. OVERZICHT BASISMEETREEKSEN.....	147
BIJLAGE 4. GEMETEN WATERSTANDEN TIJDENS DIVERSE JAARMAXIMA TUSSEN 1925 EN 1945.....	149
BIJLAGE 5. METHODEN PLOT POSITIES JAARMAXIMA.....	152
BIJLAGE 6. HISTOGRAMMEN MET KANSVERDELINGSFUNCTIES.....	153
BIJLAGE 7. MOM PARAMETERS KLASIEKE STATISTIEK.....	156

Lijst van Figuren

FIGUUR 1.1 CONSTRUCTIE EN GEBRUIK VAN DE QH-RELATIE	10
FIGUUR 1.2 TIJDSERIE MET JAARMAXIMA PERIODE 1911-2003	11
FIGUUR 1.3 SCHEMA ONDERZOEKSOPZET	12
FIGUUR 1.4 MEETFOUTEN	15
FIGUUR 2.1 METINGEN BORGHAREN TOT 1.200 M ³ /S KILOMETERRAAI 16,0	17
FIGUUR 2.2 METINGEN ST. PIETER BOVEN 1.200M ³ /S. KILOMETERRAAI 10,8	17
FIGUUR 2.3 Q-T RELATIE BORGHAREN MAART 2006	18
FIGUUR 2.4 PEILSCHAAL	21
FIGUUR 2.5 PRINCIPEWERKING PEILSCHRIJVER.....	22
FIGUUR 2.6 BOVENAANZICHT PRINCIPEWERKING STOKDRIJVER	24
FIGUUR 2.7 OTT-MOLEN	26
FIGUUR 2.8 VERSCHILLENDE TECHNIKEN VOOR DEBIETMETINGEN	26
FIGUUR 2.9 TOENAME FOUT BIJ AFNAME VAN VERTICALEN	27
FIGUUR 2.10 FLUCTUATIES DEBIET T.O.V GEMIDDELDE AFVOER TIJDENS EEN ADCP METING	28
FIGUUR 2.11A EN B. STROOMSNELHEID DWARSDOORSNEDE EN LANGSDOORSNEDE RIVIER.....	29
FIGUUR 2.12 METING VOLGENS JANUS-CONFIGURATIE MET BEWEGENDE BOOT	30
FIGUUR 2.13 JANUS CONFIGURATIE ADCP-METING	30
FIGUUR 2.14 HET DOOR RWS-LIMBURG SINDE 2001 GEBRUIKTE ADCP MEETSCHIP, TIJDENS EEN HOOGWATERMETING IN RAVENSTEIN.....	30
FIGUUR 2.15 GEMETEN PROFIEL EN MARGE ZONES ADCP	31
FIGUUR 2.16 VERGELIJKING AFVOERMETINGEN OTT-MOLEN EN ADCP	31
FIGUUR 2.17 ADCP METINGEN EN QH-RELATIE BORGHAREN	33
FIGUUR 2.18 IMPRESSIE VAN EEN AKOESTISCHE AFVOERMEET LOCATIE	34
FIGUUR 2.19 ADCP- EN ADM-METINGEN ST. PIETER T.O.V. QH-RELATIE 1996	35
FIGUUR 3.1 HUIDIGE QH-RELATIE BORGHAREN (1998).....	39
FIGUUR 3.2 QH-RELATIE BORGHAREN 1958-1962	40
FIGUUR 3.3 ONZEKERHEIDSMARGES MEETPUNTEN MET QH-RELATIE	43
FIGUUR 3.4 QH-RELATIES 1926 TOT 2015.....	46
FIGUUR 3.5 QH RELATIES MAASTRICHT 1924 EN 1926	47
FIGUUR 3.6 QH-RELATIE BORGHAREN 1911-1932	48
FIGUUR 3.7 QH-RELATIES OP BASIS VAN STOKDRIJVERMETINGEN TE MAASTRICHT.....	49
FIGUUR 3.8 JAARMAXIMA HYDROLOGISCHE JAREN 1911-1932	51
FIGUUR 3.9 VERLOOP VAN WATERSTANDEN TE BORGHAREN-BENEDEN BIJ AFVOER VAN 100 M ³ /S.....	52
FIGUUR 3.10 QH RELATIES BORGHAREN EN VISÉ	53
FIGUUR 3.11 JAARMAXIMA HYDROLOGISCHE JAREN 1933-1950	55
FIGUUR 3.12 QH RELATIE 1958 OP BASIS VAN OTT-MOLENMETINGEN	56
FIGUUR 3.13 QH RELATIES 1953 T/M 1966	57
FIGUUR 3.14 JAARMAXIMA HYDROLOGISCHE JAREN 1951-1970	58
FIGUUR 3.15 QH RELATIES 1971, 1976 EN 1984.	60
FIGUUR 3.16 JAARMAXIMA EN QH-RELATIES 1971-1984.....	60
FIGUUR 3.17 JAARMAXIMA 1971-1987.....	61
FIGUUR 3.18 QH RELATIES 1984, 1991 EN 1998	62
FIGUUR 3.19 JAARMAXIMA 1988-2000.....	64
FIGUUR 3.20 QH RELATIE 1998 EN BEREKENDE QH RELATIE 2015 IVM MAASWERKEN.....	66
FIGUUR 3.21 QH RELATIE ST. PIETER 1998 MET ADM/ADCP METINGEN.....	65
FIGUUR 3.22 QH RELATIES OVERLAAT BOSSCHERVELD, ST. PIETER EN BORGHAREN.....	65

FIGUUR 4.1 JAARMAXIMA EN AFVOERPIEKEN.....	68
FIGUUR 4.2 GEMETEN EN BEREKENDE AFVOERGOLF VAN 1993.....	75
FIGUUR 4.3 FREQUENTIE VAN GEREGISTREERDE HOOGWATERS UIT HET VERLEDEN.....	77
FIGUUR 4.4 JAARMAXIMA EN QH-RELATIE.....	80
FIGUUR 5.1 GEBRUIKELIJKE WEERGAVE VAN EEN FREQUENTIEANALYSE MET PLOTPOSITIES JAARMAXIMA EN HET BETROUWBAARHEIDSINTERVAL, GUMBEL VERDELING.....	92
FIGUUR 5.2 95% EN 99% BETROUWBAARHEIDSINTERVAL.....	95
FIGUUR 5.3 FIT VAN DE VERDELINGSFUNCTIES MET PLOTPOSITIES JAARMAXIMA VOLGENS HET BOERTIEN I ONDERZOEK.....	98
FIGUUR 5.4 FREQUENTIEPLOTS VAN BAYESIAANSE EN KLASSIEKE STATISTIEK.....	106
FIGUUR 5.5 HISTOGRAM JAARMAXIMA 475 – 1.975 M ³ /S.....	109
FIGUUR 5.6 HISTOGRAM JAARMAXIMA MET PEARSON III VERDELING VOLGENS GERRETSEN.....	110
FIGUUR 5.7 MAATGEVENDE AFVOER EN BEN JAARMAXIMA 1911-2006.....	112
FIGUUR 5.8 MAATGEVENDE AFVOER EN 95% BETROUWBAAR-HEIDSINTERVAL 1911-2006.....	112
FIGUUR 5.9 MAATGEVENDE AFVOER NA 1931 EN JAARMAXIMA 1911-2006.....	113
FIGUUR 5.10 MAATGEVENDE AFVOER EN BETROUWBAAR-HEIDSINTERVALLEN 1931-2006 EN 1966-2006.....	113
FIGUUR 5.11 GEZAMENLIJKE PLOT VERDELINGSFUNCTIES MET MOM EN MLE PARAMETERSCHATting VOOR DE 'FICTIEVE' MAATGEVENDE AFVOEREN VAN 1976 T/M 2006.....	114
FIGUUR 5.12 INTERVALLEN EN AFVOEREN BIJ T = 25 JAAR EN T = 1250 JAAR EN REEKSLONGTE N = 90.....	115
FIGUUR 5.13 INTERVALLEN EN AFVOEREN BIJ T = 1250 JAAR EN REEKSLONGTES VAN N = 20, N = 50, N = 90.....	115
FIGUUR 6.1 QH-RELATIES 1926 EN 1975 MET SPREIDING MEETDATA EN PERIODE SPECIFIEKE ONZEKERHEID (STIPPELLIJNEN).....	119
FIGUUR 6.2 QH-RELATIE 1926 MET ONZEKERHEID AFGELEIDE Q VOOR RESP 2.000 EN 2.500 M ³ /S.....	120
FIGUUR 6.3 QH-RELATIE 1975 MET ONZEKERHEID AFGELEIDE Q VOOR RESP. 2.000, 2.500 EN 3.000 M ³ /S.....	120
FIGUUR 6.4 MAATGEVENDE AFVOER MET GEPROPAGEERDE ONZEKERHEDEN (STIPPELLIJNEN).....	122
FIGUUR 6.5 VOORBEELD VAN VERHOUDING TUSSEN DE PARAMETERSPREIDING (S) EN DE PARAMETERAFSTAND (D).....	123
FIGUUR 6.6 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE LOCATIES VAN DE GEKWALIFICEERDE ONZEKERHEDEN.....	127
FIGUUR 6.7 PEDIGREE SCORES GEPROPAGEERDE ONZEKERHEDEN.....	130
FIGUUR 6.8 GEMIDDELDE PEDIGREE SCORES GEPROPAGEERDE ONZEKERHEDEN.....	131

Lijst van Tabellen

TABEL 1.1 PEDIGREE MATRIX VOOR ONZEKERHEIDSANALYSE	16
TABEL 2.1 OVERZICHT GEBRUIKTE MEETINSTRUMENTEN BORGHAREN	20
TABEL 2.2 COËFFICIËNTEN VOOR STROOMSNELHEDEN GEMETEN MET STOKDRIJVERS IN DE VS	24
TABEL 2.3 RESULTATEN ADCP- EN OTT-METINGEN TE VENLO, RAVENSTEIN EN MEGEN	32
TABEL 2.4 OVERZICHT BEOORDELING GEKWANTIFICEERDE EN GEKWALIFICEERDE ONZEKERHEDEN VAN DE MEETINSTRUMENTEN.....	38
TABEL 3.1 AFVOEREN BIJ EIJSDEN FEBRUARI 1962	40
TABEL 3.2 WATERSTANDEN AAN DE HOOFDPEILSCHALEN GEDURENDE DE HOOGWATERPERIODEN IN 1924, 1926, 1939 EN 1952	52
TABEL 3.3 OVERZICHT GEBRUIKTE QH-RELATIES BORGHAREN-BENEDEN 1953 T/M1971	57
TABEL 3.4 OVERZICHT GEBRUIKTE QH-RELATIES IN DE PERIODE 1971-1980	59
TABEL 3.5 JAARMAXIMA 2000-2004	65
TABEL 3.6 OVERZICHT BEOORDELING GEKWANTIFICEERDE EN GEKWALIFICEERDE ONZEKERHEDEN QH- RELATIES.....	67
TABEL 4.1 OVERZICHT NUSAP BEOORDELING VOOR DE REEKSEN JAARMAXIMA EN AFVOERPIEKEN.....	70
TABEL 4.2 OVERZICHT HERHALINGSTIJDEN DOOR TOEVOEGING HISTORISCHE AFVOEREN	73
TABEL 4.3 KLASSENBREEDTES VAN DE VAN DE AFVOERKLASSEN WAARIN DE HISTORISCHE HOOGWATERS ZIJN INGEDEELD.	78
TABEL 4.4 CORRECTIES JAARMAXIMA AFVOEREN VAN DE HYDROLOGISCHE JAREN (M^3/S).....	79
TABEL 4.5 HET AANTAL TOPAFVOEREN MET ONDERGRENS	81
TABEL 4.6 HERHALINGSTIJDEN JAARMAXIMA	85
TABEL 4.7 OVERZICHT BEOORDELING METHODISCHE KWALITEIT VOOR OMGANG TIJDSERIE HOGE Q VOLGENS NUSAP	87
TABEL 4.8 OVERZICHT EMPIRISCHE EN METHODISCHE BEOORDELING KWALITEIT VOLGENS NUSAP.....	87
TABEL 5.1 OVERZICHT STATISTISCHE KENMERKEN VAN DE ONDERZOEKEN	89
TABEL 5.2 VERDELINGSFUNCTIES DIE ZIJN ONDERZOEKT VOOR HET BOERTIEN I ONDERZOEK	96
TABEL 5.3 RESULTATEN BEREKENINGEN BOERTIEN I.....	99
TABEL 5.4 VERSCHIL MAATGEVENDE AFVOEREN TUSSEN BOERTIEN I EN BOERTIEN II ONDERZOEKEN	100
TABEL 5.5 RESULTATEN BEREKENINGEN BOERTIEN II.....	101
TABEL 5.6 VERGELIJK HOOGSTE JAARMAXIMA BOERTIEN I EN BOERTIEN II.....	101
TABEL 5.7 RESULTATEN BEREKENINGEN MET PERCENTAGES GEWOGEN GEMIDDELDE HR 2001 (RWS, 2001)	102
TABEL 5.8 RESULTATEN BEREKENINGEN HR 2006	103
TABEL 5.9 VERGELIJK HOOGSTE JAARMAXIMA BT II EN HR 2006.....	104
TABEL 5.10 RESULTATEN GEVOELIGHEIDSANALYSE BAYESIAANS MODEL I	105
TABEL 5.11 RESULTATEN GEVOELIGHEIDSANALYSE BAYESIAANS MODEL II	106
TABEL 5.12 95% BETROUWBAARHEIDSINTERVALLEN.....	107
TABEL 5.13 KANSVERDELINGFUNCTIES VOOR GEKNIKTE REEKS JAARMAXIMA.....	108
TABEL 5.14 BETROUWBAARHEIDSINTERVALLEN ONDERZOEK GERRETSEN.....	111
TABEL 5.15 OVERZICHT STATISTISCHE BEOORDELING KWALITEIT VOLGENS NUSAP	117
TABEL 5.16 OVERZICHT EMPIRISCHE EN METHODISCHE BEOORDELING KWALITEIT VOLGENS NUSAP	117
TABEL 6.1 SPREIDING Q EN H	118
TABEL 6.2 MEETPUNTONZEKERHEID EN PERIODE SPECIFIEKE ONZEKERHEID.	119
TABEL 6.3 SPREIDINGEN VOOR DE FICTIEVE TIJDSERIES	121
TABEL 6.4 RESULTATEN VOORTPLANTING GEKWANTIFICEERDE ONZEKERHEDEN.....	122
TABEL 6.5 OVERZICHT KWALITATIEVE BEOORDELING METING U, Q EN A	126
TABEL 6.6 OVERZICHT KWALITATIEVE BEOORDELING Q	126

TABEL 6.7 OVERZICHT KWALITATIEVE BEOORDELING H.....	126
TABEL 6.8 OVERZICHT KWALITATIEVE BEOORDELING QH-RELATIE.....	127
TABEL 6.9 GEWICHTEN VAN DE PARAMETERS	128
TABEL 6.10 EMPIRISCHE EN METHODISCHE KWALITEIT VOOR QMAX	128
TABEL 6.11 GEWICHTEN VOOR DE PERIODEN IN DE TWEE TIJDSERIES	129
TABEL 6.12 GEWOGEN GEMIDDELDE PEDIGREE SCORES VOOR DE TIJDSERIE.....	129
TABEL 6.13 PEDIGREE SCORES VOOR DE TIJDSERIE IN DE ONDERZOEKEN	129
TABEL 6.14 OVERZICHT VOORTGEPLANTE PEDIGREE SCORES	130
TABEL 6.15 OVERZICHT VAN HET ONDERZOEK NAAR DE KWALITEIT VAN DE MAATGEVENDE AFVOER.....	132
TABEL 6.16 OVERZICHT BEREKENDE MAATGEVENDE AFVOEREN VAN DE GEËVALUEERDE ONDERZOEKEN	136

1. Inleiding

De rivier de Maas is een regenrivier en heeft daardoor een sterk wisselend afvoergedrag, vooral afhankelijk van de hoeveelheid neerslag in de Belgische Ardennen. De gemiddelde jaarafvoer van de Maas is ongeveer $240 \text{ m}^3/\text{s}$ maar een hoge afvoergolf in de wintermaanden kan wel het tienvoudige debiet afvoeren. De Maas krijgt in de Ardennen aansluiting van een aantal zijrivieren, die vanwege de rotsachtige bodem en het steile verhang binnen korte tijd het regenwater op de Maas kunnen lozen (Berger, 1993). Een hevige en langdurige regenbui in de Ardennen veroorzaakt onvermijdelijk een hoge tot extreem hoge afvoer in de Maas. Vooral in Nederland levert dat problemen op vanwege de relatief hoge ligging van de rivier ten opzichte van het omringende landschap. Dit in tegenstelling tot de Belgische Maas die een diepere ligging heeft.

Om de kans op overstromingen te beperken worden rivierverruimende ingrepen verricht zoals uiterwaardverlaging, dijkverlegging en het creëren van overloopgebieden. Dergelijke ingrepen worden gebaseerd op een normaalafvoer die de rivier veilig zou moeten kunnen verwerken. Deze normaalafvoer wordt ook wel de maatgevende afvoer genoemd. Momenteel wordt het Grensmaasproject in Limburg uitgevoerd dat is gebaseerd op een maatgevende afvoer van $3.450 \text{ m}^3/\text{s}$. Na voltooiing van dit project moet de Limburgse Maas deze afvoer kunnen verwerken zonder dat overstromingen optreden. Overigens wordt voor de Maas benedenstrooms van Limburg een hogere norm gehanteerd van $3.800 \text{ m}^3/\text{s}$.

De berekening van de maatgevende afvoer vormt de kern van dit afstudeeronderzoek. De titel van het afstudeeronderzoek "Beoordeling van de kwaliteit van hoogwaterparameters berekend voor de Nederlandse Maas" is ook te omschrijven als de beoordeling van de kwaliteit van de huidige maatgevende afvoer.

De vaststelling van de maatgevende afvoer wordt voorafgegaan door een proces dat begint bij het collecteren van data voor invoer van de berekening. Het onderzoek is opgebouwd rond vijf processtappen die benodigd zijn voor bepaling van de maatgevende afvoer. De kwaliteit van de maatgevende afvoer hangt af van de hoeveelheid gekwantificeerde en gekwalificeerde onzekerheden. Om de analyse op een aanvaardbare en gelijkwaardige diepgang te houden, wordt de NUSAP methode gebruikt. Daarmee worden de twee typen onzekerheden systematisch geanalyseerd en beoordeeld. In iedere processtap worden de onzekerheden volgens dezelfde methodiek geanalyseerd. Vervolgens wordt bekeken in hoeverre de afzonderlijke onzekerheden door het gehele proces zich voortplanten. De voortgeplante onzekerheden bepalen uiteindelijk de kwaliteit van de maatgevende afvoer.

In opdracht van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat zijn al een aantal onderzoeken naar de maatgevende afvoer uitgevoerd. De analyse in dit rapport bestaat voor een groot gedeelte uit een evaluatie van deze onderzoeken. Ter uitbreiding en bevordering van een objectieve analyse worden twee alternatieve onderzoeken naar de maatgevende afvoer aan de analyse toegevoegd.

1.1 Opbouw van het rapport

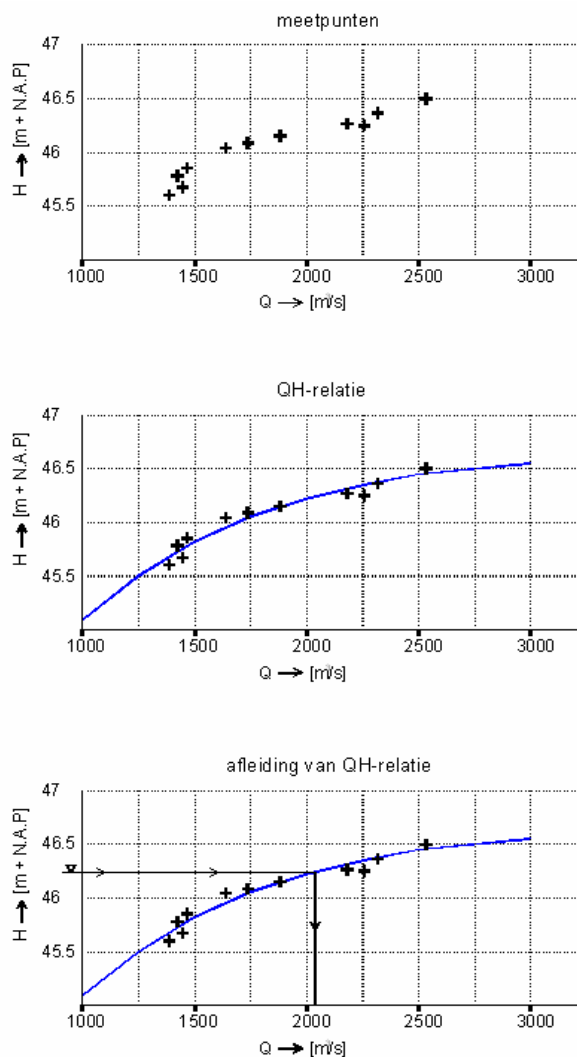
De opbouw van dit onderzoeksrapport komt praktisch overeen met processtappen die benodigd zijn voor het berekenen van de maatgevende afvoer. Om een idee te krijgen welke processtappen benodigd zijn, volgt eerst een korte toelichting op de totstandkoming van de maatgevende afvoer.

De huidige door Rijkswaterstaat bepaalde maatgevende afvoer van de Maas is een waarde uitgedrukt in m^3/s die volgens een schatting gemiddeld eens in de 1.250 jaar zal voorkomen, ook wel de herhalingstijd genoemd. Voor de Maas in het gehele Limburgse traject wordt een herhalingstijd van 250 jaar gehanteerd. De schatting is met behulp van statistiek gedaan. De statistische berekeningen zijn gebaseerd op een tijdserie met topafvoeren (hoogst opgetreden afvoer in een bepaald jaar) die zijn opgetreden in het verleden. Een schematische weergave van de tijdserie is gegeven in Figuur 1.2 op pagina 11. De statistiek gaat uit van het gebruiken van gegevens uit het verleden om een uitspraak te doen voor de toekomst. Met andere woorden: De topafvoeren die zijn verzameld over de laatste 100 jaar worden gebruikt om een schatting te doen over een afvoer (de maatgevende afvoer) die eens in de 1.250 jaar kan optreden. Voor het onderzoek wordt een analyse gedaan naar de onzekerheden in de berekening van de maatgevende afvoer. De analyse begint dus bij de herkomst van deze afvoeren, het meten met de meetapparatuur in de Maas.

De topafvoeren zijn *afgeleid* van gemeten afvoeren vanaf het jaar 1911. Dat wil zeggen dat ze niet direct van metingen afkomstig zijn. Daartussen zit nog een model dat gebaseerd is op de meetpunten. Het model hoort bij processtap 2. De metingen horen bij de eerste processtap. Het gaat hier om de gemeten afvoeren en waterstanden. Daarbij moet worden opgemerkt dat de afvoermeting bestaat uit een stroomsnelheidsmeting en de oppervlaktemeting van het dwarsprofiel. De stroomsnelheid uitgedrukt in m/s wordt vermenigvuldigd met het dwarsprofiel in m^2 . Zo wordt de afvoer in m^3/s verkregen. De maatgevende afvoer is daarom in eerste instantie afhankelijk van de waterstandmetingen, stroomsnelheidsmetingen en dwarsprofiel-metingen die zijn uitgevoerd sinds 1911. De belangrijkste onzekerheden die voorkomen gedurende een meting zijn:

- onzekerheid in de meetdata;
- onzekerheden met betrekking tot de uitvoering van de metingen;
- onzekerheden met betrekking tot het functioneren van de meetapparatuur.

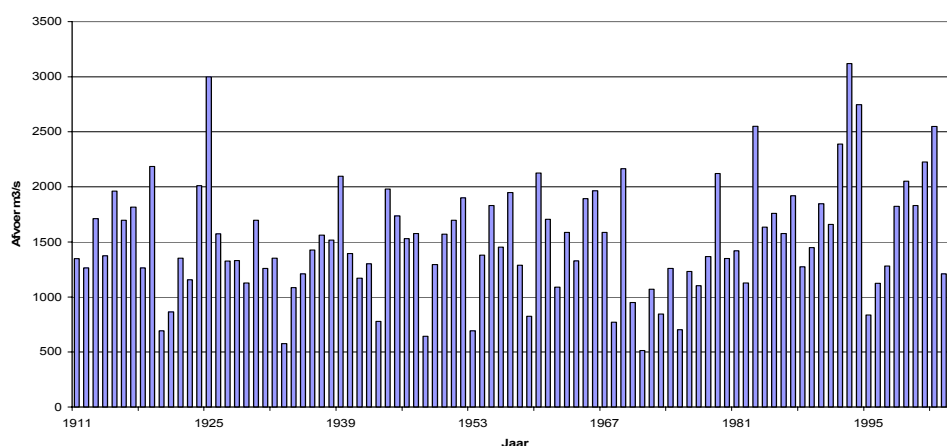
De afleiding van de topafvoeren gebeurt via een model dat afvoeren (Q) genereert na invoering van de waterstand (H). Dit model – de QH-relatie – is gebaseerd op de afvoermetingen.



Figuur 1.1 Constructie en gebruik van de QH-relatie

Figuur 1.1 geeft in het kort de constructie en het gebruik van de QH-relatie weer. De meetpunten van de afvoermetingen worden met de waterstand die gelijktijdig is gemeten, op een assenstelsel uitgezet. Door de punten kan vervolgens een lijn (curve) getrokken worden, en de QH-relatie is een feit. Deze kan nu worden gebruikt voor afleiding van waterstandsmetingen. Na het invoeren van de topwaterstand van een bepaald jaar, kan de topafvoer worden afgelezen. Het onderste plaatje in Figuur 1.1 geeft dit weer. De reden dat de afvoeren niet direct van metingen worden afgeleid is verklaarbaar: De QH-relatie levert het voordeel dat niet continu intensieve afvoermetingen hoeven te worden uitgevoerd. Aangezien een waterstandsmeting veel eenvoudiger en sneller is uit te voeren bespaart de QH-relatie de moeite van het afvoeren meten. Een QH-relatie hoeft in principe maar één keer gemaakt te worden en kan vervolgens een aantal jaren worden gebruikt. Om de QH-relatie actueel te houden zijn wel incidenteel controlemetingen nodig. De tweede processtap bestaat uit de fabricage en het gebruik van de QH-relatie. De onzekerheid van de QH-relatie is onder andere afhankelijk van de onzekerheid van de meetpunten en het aantal beschikbare meetpunten.

De afgeleide topafvoeren vanaf 1911 worden samengevoegd in de tijdserie. De tijdserie met hoge afvoeren dient als input voor de statistische berekeningen. Om de tijdserie geschikt te maken voor de statistiek worden door Rijkswaterstaat correcties uitgevoerd. Met het corrigeren wordt beoogd een meer homogene reeks van afvoeren te verkrijgen. De afvoeren zijn in de loop van de jaren onder variabele omstandigheden opgetreden - door onder andere grindonttrekking, baggerwerkzaamheden en kanalisering - en voor toepassing van de statistiek is het wenselijk dat de gegevens homogeen zijn. Het samenstellen en corrigeren van de serie jaarmaxima is de processtap alvorens de statistiek wordt toegepast. In Figuur 1.2 is de tijdserie met topafvoeren vanaf 1911 weergegeven.

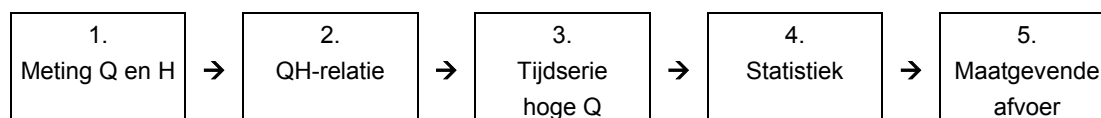


Figuur 1.2 Tijdserie met jaarmaxima periode 1911-2003

De onzekerheid van de tijdserie is voor een belangrijke mate afhankelijk van de afgeleide Q's. Verder is de beschikbare kennis voor het doen van correcties een toegevoegde (on)zekerheidsfactor.

Na het corrigeren van de tijdserie kan de statistiek - bestaande uit een frequentieanalyse - worden toegepast. De frequentieanalyse maakt het mogelijk om de afvoer behorende bij een herhalingsstijd te berekenen. In dit geval is dat de maatgevende afvoer behorende bij een herhalingsstijd van 250 of 1.250 jaar. In het vervolg wordt alleen gesproken over 1.250 jaar aangezien dit de landelijk (met uitzondering van Limburg) toegepaste norm is.

Het proces om tot de maatgevende afvoer te komen kan nu worden onderverdeeld in vijf deelprocessen. De processtappen om de maatgevende afvoer te berekenen zijn in Figuur 1.3 op chronologische wijze weergegeven.



Figuur 1.3 Schema onderzoeksopzet

Het rapport gaat uit van deze opbouw. Een belangrijk voordeel van deze opbouw is dat de doorwerking van onzekerheden in de processtappen meer inzichtelijk wordt gemaakt. Daarmee wordt tevens de analyseopzet van dit onderzoek verklaard. Van elke procestap worden de onzekerheden in kaart gebracht die uiteindelijk effect hebben op de onzekerheid van de maatgevende afvoer. Alvorens in te gaan op de wijze van het beoordelen van de onzekerheden wordt eerst toegelicht welke studies geëvalueerd worden in dit onderzoek. Dit zijn de voor Rijkswaterstaat uitgevoerde onderzoeken en een tweetal alternatieve onderzoeken.

1.2 Onderzoeken Rijkswaterstaat

In het begin van de 20^e eeuw werd nog niet gesproken van een maatgevende afvoer maar werd als maatstaf voor dijkhoogten de hoogst bekende waterstand plus een halve meter gehandhaafd (RIVM, 2004). Na de ernstige overstromingen in 1926 en 1953 werd duidelijk dat er meer gedaan moest worden voor de bescherming tegen overstromingen. In 1953 werd de Deltacommissie ingesteld die de een herhalingstijd voor de maatgevende afvoer vaststelde van 3000 jaar, destijds voornamelijk bedoeld voor de Rijn. Dit zou leiden tot zeer ingrijpende veranderingen in het rivierengebied omdat de bijbehorende maatgevende afvoer eveneens zeer hoog was. Door de weerstand tegen deze norm gebeurde er in de jaren daarna niet veel op het gebied van dijkverbeteringen. In 1977 werd de Commissie Becht ingesteld die adviseerde om de herhalingstijd te verlagen tot 1.250 jaar, welke tot op heden gehandhaafd wordt. Ten grondslag aan deze norm lag de algemene redenatie dat de riviergebieden economisch vergelijkbaar waren met Friesland, Groningen en Zeeland maar dat de gevolgen van een overstroming door zoet water minder groot zouden zijn dan een overstroming door zout water. Opnieuw stagneerde de dijkversterking vanwege het ontbreken van maatschappelijk draagvlak (RIVM, 2004).

In 1993 heeft het Ministerie van Verkeer en Waterstaat de Commissie Boertien I ingesteld voor het onderzoek 'Toetsing uitgangspunten rivierdijkversterkingen'. Voor het onderzoek is met gebruik van verschillende kansverdelingen een maatgevende afvoer (MA) voor de Maas berekend van 3.685 m³/s. Het hoogwater van december 1993 was met het uitbrengen van het rapport in juni nog niet opgetreden. In de MA is het effect van modernisering van de Belgische Maas meegenomen door middel van een correctiewaarde. Aangezien het effect van de modernisering niet nauwkeurig kon worden geschat, werd voorgesteld de MA te handhaven op 3.650 m³/s. Opvallend is dat de waterstand van deze afvoer (46,3m Borgharen) overeenkomt met de oude maatstaf; de hoogst gemeten waterstand (1926 = 45,8m te Borgharen) plus een halve meter.

Nadat in december 1993 het extreme hoogwater was opgetreden, werd de Commissie Boertien in 1994 opnieuw aangesteld om vervolgonderzoek te verrichten. Ditmaal voor het 'Onderzoek Watersnood Maas'. Dit onderzoek kenmerkte zich door de uitgebreide studie naar het corrigeren van oudere jaarmaxima. Er werd een MA berekend van 3.800 m³/s.

Naar aanleiding van de 'Wet op de waterkering' zijn in 1996 de Hydraulische Randvoorwaarden (HR1996) opgesteld waarin onder andere de leidraad voor bepaling van de MA is vastgelegd. Vanaf het in werking treden van deze norm wordt de MA iedere vijf jaar opnieuw berekend. Voor de HR 1996 is de hoogte van de MA vastgesteld op 3.650 m³/s. De hoogwaters van 1993 en 1995 zijn nog niet meegenomen in de berekening van de MA van 1996 (2). De rivierdijkverhogingen uitgevoerd tijdens het grootschalige project 'Deltaplan Grote Rivieren' zijn gebaseerd op deze maatgevende afvoer. Zodoende kan de Maas een afvoer 3.650 m³/s nu 'veilig' verwerken.

In 2001 is naar aanleiding van de tweede termijn Hydraulische Randvoorwaarden (HR2001) een nieuwe maatgevende afvoer vastgesteld van 3.800 m³/s. Ditmaal is dat gebeurd door het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA). In het Boertien II onderzoek werd deze waarde in 1994 ook berekend, zónder dat het hoogwater van 1995 was meegenomen. Het verhogende effect door toevoeging van het hoogwater van 1995 is gecompenseerd doordat het RIZA de hoge afvoeren op een andere manier heeft afgeleid (zie § 4.4). Het is de bedoeling dat in 2015 de niet-Limburgse Maas de maatgevende afvoer van 3.800 m³/s veilig kan verwerken. Op het moment worden de Maaswerken uitgevoerd die gebaseerd zijn op deze afvoer. Met uitzondering van het Grensmaasproject in Limburg waarvoor 3.450 m³/s wordt gehanteerd (pers. comm. Gerretsen, 2006).

In 2006 zijn de Hydraulische Randvoorwaarden opnieuw vastgesteld waarmee tevens de maatgevende afvoer is herberekend. De periode van vijf toegevoegde jaren bevat een aantal hoge hoogwaters waardoor de maatgevende afvoer is verhoogd naar 4.000 m³/s. De berekeningswijze komt exact overeen met de HR2001. Op basis van deze maatgevende afvoer zijn nog geen rivierverruimende ingrepen gepland. Vanwege de met HR2001 overeenkomstige berekeningsmethode wordt de analyse enigszins kort gehouden. Het effect van de twee extra hoge hoogwaters in 2002 en 2003 op de maatgevende afvoer geeft wel inzicht in de gevoeligheid van de toegepaste statistiek.

De onderzoeken Boertien I, Boertien II en de Hydraulische Randvoorwaarden 2001 en 2006 worden in de hoofdstukken 2 tot en met 6 geanalyseerd.

1.3 Alternatieve onderzoeken

Behalve de onderzoeken in opdracht van Rijkswaterstaat zijn er twee alternatieve onderzoeken uitgevoerd naar de maatgevende afvoer. Gerretsen (2001) en Klunhaar (2003) hebben onderzoek uitgevoerd met een alternatieve benadering voor de maatgevende afvoer. Het onderscheid met de voor Rijkswaterstaat uitgevoerde onderzoeken is vanaf de derde processtap kenmerkend. Zo hebben beide alternatieve onderzoeken een reeks met historische afvoeren van vóór 1911 toegevoegd en is de toegepaste statistiek verschillend. Uiteraard leidt dat tot een andere maatgevende afvoer. In hoofdstuk 4, 5 en 6 worden de alternatieve onderzoeken naast de Rijkswaterstaatonderzoeken geëvalueerd.

1.4 Methodiek voor de analyse

De evaluatie van de onderzoeken geschiedt op basis van een uitgebreide analyse naar de onzekerheden in de processtappen van de maatgevende afvoer die voor de verschillende studies gebruikt zijn. Om de analyse zo consequent mogelijk uit te voeren wordt voor dit onderzoek gebruik gemaakt van één methode. Onder het devies "Robuuste kennis voor duurzaamheid" (vrij vertaald van de website nusap.net) hebben twee Amerikaanse onderzoekers en een Nederlandse onderzoeker (Funtowicz & Ravetz, Van der Sluijs, 1990) gezamenlijk een kennisbank opgezet onder andere ter

bevordering van de consensus over onzekerheidsanalyses bij de totstandkoming van beleidsprocessen. Daarvoor is de zogenaamde NUSAP methode ontwikkeld waarin zowel kwantitatieve als kwalitatieve aspecten betrokken worden voor de onzekerheidsanalyse. De NUSAP methode is eerder al gebruikt voor een aantal publicaties van het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) en het Milieu en Natuurplanbureau (MNP). De methode wordt voor dit onderzoek toegepast en bevat de volgende onderdelen met beschrijvingen gedeeltelijk overgenomen uit Van de Sluijs (2005a):

Kwantitatief

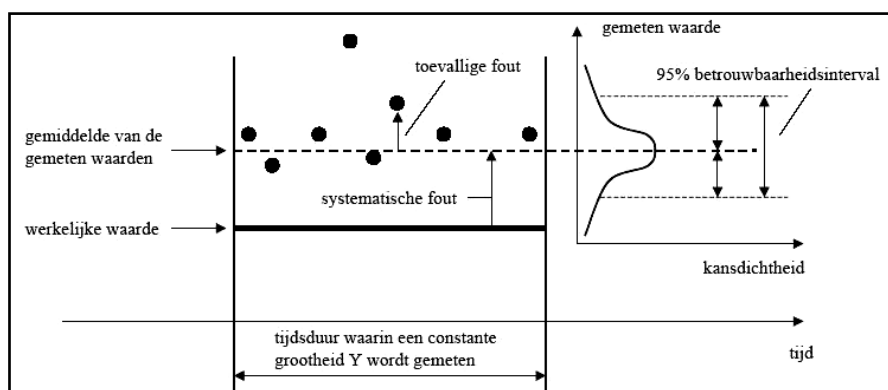
Numeral: Bij de analyse naar een reeks data is de omvang van de getallen van betekenis voor de interpretatie. Wanneer de reeks voornamelijk bestaat uit miljoenen dan hebben verschillen in de orde van het getal 1 een niet zo grote betekenis, met uitzonderingen daargelaten. Er wordt op gedoeld om de grote aantallen te omschrijven met ordegroottes van tien. Zoals 1000 te omschrijven is als $1 \text{ E}3$. Bijvoorbeeld de optelsom $1 \text{ E}6 + 5 \text{ E}0 = 1 \text{ E}6$. Het getal 5 ($5 \text{ E}0$) valt weg in de ordegrootte miljoen ($\text{E}6$).

In geen van de te analyseren data voor dit onderzoek wordt met ordegroottes gewerkt. Bij de reeks jaarmaxima liggen de afvoeren in het bereik van ongeveer $700 \text{ m}^3/\text{s}$ tot $3.000 \text{ m}^3/\text{s}$. De afvoeren zijn met een nauwkeurigheid van $1 \text{ m}^3/\text{s}$ gegeven. Vanwege het relatief smalle bereik hoeft geen rekening te worden gehouden met interpretatieverschillen. Voor de waterstanden die over een bereik van ongeveer 5 meter kunnen verschillen ligt de nauwkeurigheid op 1 cm, vergelijkbaar met die van de afvoeren. Het dwarsprofiel dat tegenwoordig nauwkeurig opgemeten kan worden, heeft wel te maken met interpretatieverschillen met name tijdens hoogwater. In hoofdstuk 2 paragraaf 2.4 wordt dit aan de hand van een voorbeeld toegelicht.

Unit: De eenheden welke in dit onderzoek de waterstand in m, stroomsnelheid in m/s, het dwarsprofiel in m^2 en de afvoer in m^3/s zijn, hebben allen een belangrijke additionele eenheid namelijk de datum. Uit de datum waarop de gegevens zijn geproduceerd kan worden afgeleid onder welke omstandigheden deze zijn verkregen. De hoofdstukken 1 en 2 worden gekenmerkt door een periodieke onderverschillen vanwege veranderde omstandigheden. Het aspect unit is inherent aan de analyse van de data en wordt zodoende niet als apart element aan elk deelproces toegevoegd. Er wordt bij de analyse van de data van tevoren rekening mee gehouden. Nadat de data verzameld en geordend is kan gestart worden met de onzekerheidsanalyse berustend op de volgende punten.

Spread: De spreiding van de data is de bandbreedte van de afwijkingen van de metingen op één locatie. De afwijking wordt in dit onderzoek aangeduid als de procentuele onzekerheid van de data. Voor dit onderzoek gaat het om de data voortgekomen uit de veldmetingen op de Maas. Dit zijn de waterstandmetingen, stroomsnelheidsmetingen en dwarsprofielmetingen. Figuur 1.3 geeft een schematische voorstelling van soorten meetfouten. In de Figuur wordt gesproken van fouten maar dat geeft een ietwat verkeerde voorstelling. Een veldmeting zoals voor de stroomsnelheid die weer bestaat uit een serie metingen zal vanwege de variabele omstandigheden nagenoeg nooit gelijke resultaten geven. Dat is een ander geval dan bijvoorbeeld in een productieproces waar metalen plaatjes op dikte worden gemeten. Afwijkingen in de plaatjes zijn in feite productiefouten die opgevat mogen worden als toevallige fouten. Maar afwijkingen in veldmetingen kunnen óók veroorzaakt zijn door natuurlijke variabiliteit. Dat neemt uiteraard niet weg dat er spreiding voorkomt in de gegevens welke bijdraagt aan de onzekerheid. De toevallige fout in de metingen kan op een praktische manier berekend worden. De spreiding in de individuele waarden van de duplometingen (meervoudige metingen onder gelijke omstandigheden) om de gemiddelde waarde van de duplometing is dan een maat voor de meetonzekerheid (Arnold, 2004). De systematische fout is alleen te benaderen omdat niet precies bekend is wat de werkelijke waarde is waarop de meting is berust. Vooral bij veldmetingen in en rond de rivier is het vanwege de omvang nagenoeg onmogelijk om alle invloedsvariabelen mee te nemen. Een voorbeeld is de afvoer, het aantal m^3/s water per seconde dat

op een bepaalde locatie in de rivier passeert. In principe is dat op geen enkele manier exact te bepalen. Factoren die nauwelijks te meten of te interpreteren zijn zoals grondwaterstromingen, turbulentie, lokale wrijvingsverliezen en wind hebben wel degelijk effect op het stromingsgedrag. Afwijkingen van de meetapparatuur die eveneens een systematische fout kunnen veroorzaken, zijn te achterhalen door ijkmetingen uit te voeren. Met behulp van een stroomgoot in een laboratorium waarmee het debiet exact is in te stellen, kan de uitvoer van het meetinstrument worden gecontroleerd. Bij constatering van een systematische fout moet het instrument worden afgesteld. Aangezien er ten tijde van dit onderzoek geen laboratoriumresultaten ter beschikking zijn gekomen, wordt de bepaling van de systematische fout buiten beschouwing gelaten. Alle afwijkingen, onnauwkeurigheden en onzekerheden die uit te drukken zijn in een procentuele marge onzekerheid, dragen bij aan de uiteindelijke beoordeling van de kwaliteit van de maatgevende afvoer.



Figuur 1.4 Meetfouten (Arnold, 2004)

Kwalitatief

Assesment: De kwalitatieve beoordeling staat in direct verband met de Pedigree tabel die hierna wordt behandeld. In de Pedigree tabel is onderscheid gemaakt tussen empirische, methodische en statistische beoordelingscriteria. Om de Tabel te gebruiken moet dus eerst op deze aspecten een analyse worden uitgevoerd.

Pedigree: Na de analyse gebeurt de beoordeling door het toekennen van een bepaalde score oplopend van 0 tot en met 4 voor een slechte respectievelijk goede kwaliteit. De beoordeling gebeurt aan de hand van het vinden van overeenkomsten tussen de door NUSAP omschreven kwaliteiten en de waargenomen kwaliteiten volgend uit de analyse. De omschreven kwaliteiten volgens NUSAP zijn beschreven in een Tabel. Voordat daarop wordt ingegaan, volgt eerst een toelichting gegeven over de betekenis van de methodische, empirische en statistische kwaliteit.

- De methodologische kwaliteit verwijst naar de normen voor methodologische rigiditeit in het proces dat door experts in de relevante disciplines wordt toegepast. De reeds lang gevestigde en gerespecteerde methodes om de gegevens te interpreteren en toe te passen zullen een hoge score verdienen, terwijl de onbeproeft of onbetrouwbare methodes lager scores (3). Het 'proces' duidt voor dit onderzoek op de afzonderlijke deelprocessen voor bepaling van de maatgevende afvoer zoals weergegeven in Tabel 1.
- De empirische kwaliteit verwijst naar de mate waarin directe observaties worden gebruikt om een parameter te schatten. Wanneer een parameter op een relatief groot aantal waarnemingsgegevens wordt gebaseerd, dan is de NUSAP score hoog. Soms zijn direct waargenomen gegevens niet beschikbaar en wordt de parameterschatting gebaseerd op gedeeltelijke metingen of berekend vanuit onafhankelijke data. De parameters die door dergelijke

indirecte methodes worden bepaald hebben een zwakkere empirische basis en zullen over het algemeen lager scoren dan die gebaseerd op directe observaties (3).

- De statistische kwaliteit is afhankelijk van de parameteronzekerheid en kansverdelingstype-onzekerheid. Het is dus een toetsing van de kwaliteit van de fit van de kansverdelingsfuncties. Deze aspecten komen aan de orde bij deelproces 4, de toegepaste statistiek. Voor de eerste drie deelprocessen komt de statistiek niet aan de orde. Het kan voorkomen dat statistiek een kleine rol heeft gespeeld om de representativiteit van een set data te controleren maar in het onderzoek naar de maatgevende afvoer is daarvan geen sprake. Het vierde deelproces waarin statistiek een primaire rol bezit, heeft uiteraard te maken met de twee typen onzekerheden. De verschillende onderzoeken die in dit rapport zijn onderzocht bieden een goed uitgangspunt voor het doen van een vergelijkende analyse naar de parameter- en kansverdelingstype-onzekerheid.

Nadat van elk deelproces is achterhaald welke methode op welke manier is toegepast, het aantal directe observaties in relatie tot niet-directe observaties is gebruikt en voor deelproces 4 de onzekerheden van de gebruikte statistiek zijn bepaald, kan de Pedigree tabel (Tabel 1.1) ter hand worden genomen. Wanneer de analyse is gebeurd en een score is toegekend, dan is daarmee de kwalitatieve beoordeling voor de verschillende deelprocessen gemaakt. Voor de uiteindelijke beoordeling van de maatgevende afvoer geven de afzonderlijk geëvalueerde scores een goede indicatie van de hiaten in de processtappen. In hoofdstuk 5 en 6 wordt verder ingegaan op de resultaten van de NUSAP analyse.

Score	Statistische kwaliteit	Empirische kwaliteit	Methodische kwaliteit
4	uitstekende aanpassing naar een bekend statistisch model (Normaal, Lognormaal, Binomiaal enz.)	gecontroleerde experimenten & groot aantal directe metingen.	goedgekeurde standaard in gevestigde discipline.
3	goede aanpassing naar een betrouwbaar statistisch model welke de meeste hulptests heeft doorstaan, maar niet allemaal.	Historische/veldgegevens, ongecontroleerde experimenten, klein aantal directe metingen.	betrouwbare methode, die bekend is binnen de discipline.
2	hulptests niet beduidend gepasseerd, model geen duidelijke betrekking op gegevens, of model gekozen op basis van gelijkaardige gegevens	gemodelleerde gegevens, indirecte maten, handboek schattingen.	aanvaardbare methode, maar beperkte consensus op betrouwbaarheid.
1	geen statistische tests, subjectief model.	met enige kennis gemaakte schattingen, heel indirecte benaderingen, "vuistregel" schatting.	niet bewezen methoden, twijfelachtige betrouwbaarheid.
0	Onwetend model (Uniform)	Puur gissen.	Puur subjectieve method.e

Tabel 1.1 Pedigree matrix voor onzekerheidsanalyse (Ellis *et al.* 2000a)

Met de toegekende scores voor alle individuele parameters kan de volgende en laatste stap worden uitgevoerd. De berekening van de maatgevende afvoer is gebaseerd op afhankelijke parameters. Zonder de eerste processtap kan de tweede niet worden uitgevoerd, en zo verder. De doorwerking van de processtappen geldt ook voor de doorwerking van de onzekerheden. De onzekerheid van de meting wordt meegenomen in de QH-relatie, vervolgens de tijdserie en tenslotte in het berekeningsresultaat van de frequentieanalyse, de maatgevende afvoer. Een apart hoofdstuk wordt

toegevoegd om de voortplanting van de onzekerheden te bepalen. De kwantificeerbare en kwalificeerbare onzekerheden worden daarvoor apart geanalyseerd. NUSAP heeft voor de voortplanting van onzekerheden een aantal richtlijnen gegeven. Het resultaat van de analyse geeft een indruk van de onzekerheden in de maatgevende afvoer afkomstig uit de deelprocessen. Op basis daarvan wordt de kwaliteit van de maatgevende afvoer beoordeelt.

2. Meting H en Q

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt uiteengezet op welke wijze de waterstanden, afvoeren en het dwarsprofiel door Rijkswaterstaat Limburg gemeten en berekend worden vanaf het begin van de officiële metingen in 1917. In de periode 1911 tot 1917 zijn in Nederland geen debietmetingen uitgevoerd en zijn door Rijkswaterstaat de gegevens overgenomen van Belgische metingen in Visé. De Belgische meetgegevens zijn echter nog na 1917 gebruikt ter controle vanwege de bodemdaling in Nederland. Hoofdstuk 3 gaat daar verder op in. Dit hoofdstuk beperkt zich tot de Nederlandse metingen omdat er over de vroegere Belgische metingen en werkwijzen geen informatie beschikbaar is gekomen. Zelfs over de Nederlandse metingen in het begin van de 20^e eeuw is maar beperkte informatie beschikbaar gekomen. Uit interviews met deskundigen (Tekstra, 2006 en Gerretsen, 2006) van Rijkswaterstaat Limburg zou de oorzaak van het ontbreken van deze informatie te maken kunnen hebben met de oorlogssituatie midden jaren '40 en verhuizingen en reorganisaties bij Rijkswaterstaat. De beschikbare informatie over de metingen zijn afkomstig uit de rapporten van het Boertien I- en Boertien II onderzoek en uit interviews met dezelfde deskundigen.

De meetapparatuur die gebruikt is voor de metingen bij St. Pieter, Maastricht en Borgharen is in de loop van de tijd vervangen dan wel doorontwikkeld. Ging het tot de eerste helft van de 20^e eeuw voornamelijk handmatig, tegenwoordig zijn er automatische meetstations voorzien van digitale apparatuur. Deze zijn gelegen zowel ten Noorden van Maastricht bij Borgharen benedenstrooms van de stuw en in Sint Pieter, ten Zuiden van Maastricht. Figuren 2.1 en 2.2 geven de huidige meetlocaties weer.



Figuur 2.1 Metingen Borgharen tot $1.200 \text{ m}^3/\text{s}$ Kilometerraai 16,0.



Figuur 2.2 Metingen St. Pieter boven $1.200 \text{ m}^3/\text{s}$. Kilometerraai 10,8.

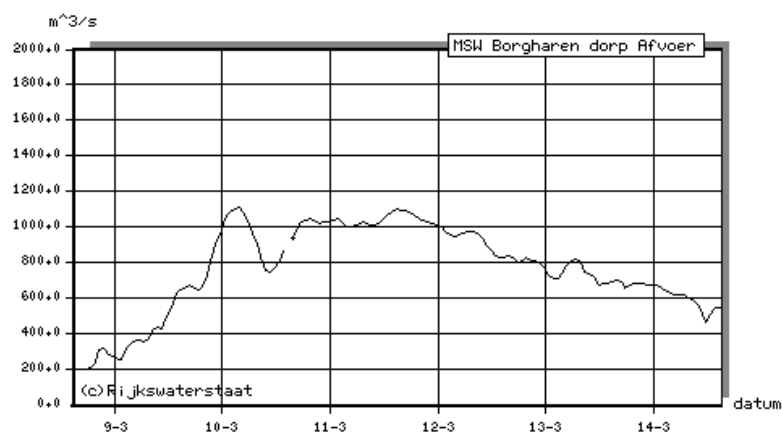
In Borgharen zorgt een digitale niveaumeter (DNM) voor continue registratie van de waterstand en in St. Pieter zorgt zowel een DNM als Akoestische Debietmeter (ADM) voor continue registratie van waterstand en afvoer. Voor de afvoerbepaling in Borgharen wordt een QH-relatie gebruikt. Om de actualiteit van de QH-relatie van Borgharen te controleren worden incidenteel en dan met name tijdens hoogwaters stroomsnelheidmetingen verricht vanaf een boot uitgerust met akoestische meetapparatuur. Tegelijkertijd wordt het dwarsprofiel 'A' gemeten. Door vervolgens de stroomsnelheid

'u' met het oppervlak van het natte dwarsprofiel te vermenigvuldigen wordt de afvoer 'Q' verkregen, immers $Q \text{ (m}^3/\text{s)} = u \text{ (m/s)} \cdot A \text{ (m}^2\text{)}$. Het oppervlak is afhankelijk van het actuele bodemniveau van het zomerbed, terreinhoogten van het winterbed en de waterstand.

Bij Borgharen worden metingen bij voorkeur uitgevoerd zolang de Maas alleen in het zomerbed stroomt ofwel, tot een afvoer van ongeveer $1.200 \text{ m}^3/\text{s}$. Wanneer de Maas een hogere afvoer te verwerken krijgt en daardoor de uiterwaard ter plaatse zal overlopen, dan worden metingen in St. Pieter uitgevoerd. St. Pieter heeft tijdens hogere afvoeren een gelijkmatiger en smaller dwarsprofiel dan Borgharen waardoor het varen met de meetboot minder problemen geeft. In bijlage 1 is te zien dat metingen bij Borgharen die verricht zijn boven afvoeren van $1.200 \text{ m}^3/\text{s}$ verschillen met de QH-relatie vertonen tot wel 13%. Bij St. Pieter zijn de verschillen niet groter dan 5%. Met behulp van een waterbalans is het mogelijk om een controle uit te voeren voor de hogere afvoeren bij Borgharen. De waterbalans bestaat uit het inkomende debiet bij St. Pieter minus het debiet van Borgharen, het Julianakanaal, overlaat Bosscherveld en nog drie kleine zijrivieren (Barneveld, 2004). Met behulp van de waterbalans blijken de verschillen tussen de QH-relatie Borgharen en de metingen ook niet meer dan 5% te zijn.

2.1.1 Hoogwatermetingen

Tot 1965 werden afvoeren boven de $1.200 \text{ m}^3/\text{s}$ gemeten tussen de St. Servaasbrug en de Wilhelminabrug in Maastricht (Gerretsen, pers. comm. 2006). Het voordeel van deze locatie was dat de Maas hier door een soort bakprofiel stroomt zodat het stroomgedrag makkelijker kon worden geïnterpreteerd. Ondanks dat waren de omstandigheden midden in de stad niet ideaal vanwege de gebrekkige ruimte voor het opstellen van de meetinstrumenten en de tijdsbeslag van de meting. Er moest een andere locatie gevonden worden waar metingen zonder hinder uitgevoerd konden worden. Zodoende worden sinds 1965 de hogere afvoeren verder bovenstrooms gemeten bij St. Pieter. Deze meetlocatie is echter pas sinds 1996 toegevoegd aan het officiële Monitoring Systeem Water (MSW) meetnet na installatie van een permanent meetstation.



Figuur 2.3 Q-t relatie Borgharen maart 2006 (1)

De waterstanden en afvoeren bij St. Pieter worden met de DNM elke 10 minuten geregistreerd. De registratie verschijnt direct op het Internet (1). Het resultaat hiervan is weergegeven in Figuur 3 waar de afvoer is gevisualiseerd voor een periode van zes dagen. In de Figuur is de hoogwatergolf weergegeven die is gepasseerd tussen 9 en 14 maart 2006.

Aangezien de maatgevende afvoer is gebaseerd op afgeleide topafvoeren, is het van belang te weten onder welke omstandigheden deze hoge afvoeren gemeten zijn. De voor dit onderzoek interessante afvoeren liggen boven de $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$. Bij deze afvoer is de Maas bij Borgharen niet meer gestuwd en overstromen de uiterwaarden. Tijdens deze omstandigheden wordt het meten complexer. Metingen die de meetdienst Rijkswaterstaat tijdens *extreem* hoogwater ($> 2.500 \text{ m}^3/\text{s}$) heeft uitgevoerd, zijn op

één hand te tellen. Om precies te zijn hebben dergelijke situaties zich voorgedaan in 1926, 1993, 1995 en 2003.

De meting van de stroomsnelheid gebeurt bij voorkeur onder stationaire omstandigheden maar vanwege de snelle afvoerwisselingen van de Maas is nagenoeg geen sprake van een gelijkmatige stroomsnelheid onder het tijdsbestek van de meting. Door de fluctuaties kan de nauwkeurigheid van de metingen in het geding komen. In de winterperioden wanneer de meeste jaarmaxima optreden zijn de verschillen in afvoeren wel honderden m^3 binnen een paar uur. Naast de gebruikelijke waterstandfluctuaties door regenval zijn er nog een tweetal invloeden op de afvoeren in de Maas, namelijk het stuwbeheer in België en de manipulaties van de waterkrachtcentrale te Lixhe (in werking sinds 1980). De stuw bij Borgharen wordt bij een afvoer van $1.250 \text{ m}^3/\text{s}$ opengezet. De stuwen in België hebben een minder strikt stuwbeheer en worden bij afvoeren tussen de 1.500 en $2.500 \text{ m}^3/\text{s}$ opengezet. De eerste stuw in België te Monsin is in 1940 in werking getreden (Berger, 1992). Monsin ligt 27 kilometer bovenstrooms van Borgharen zodat van *sterke* afvoerschommelingen in Maastricht door het Belgische stuwbeheer geen sprake hoeft te zijn.

De verschillende meetmethoden die in de periode 1917-2003 zijn gebruikt hebben ieder hun specifieke onnauwkeurigheden gekend tijdens hoge afvoeren. Van alle gebruikte meetinstrumenten worden de onzekerheden zo goed mogelijk aan het licht gebracht. De aspecten waarop de onzekerheidsanalyse volgens de NUSAP methode worden geanalyseerd, worden in de volgende paragraaf toegelicht.

2.1.2 Beoordeling onzekerheden

De kwantitatieve elementen van NUSAP: het getal (N), de eenheid (U) en de spreiding (S) worden in één keer geanalyseerd. Van de waterstand in cm wordt bepaald in hoeverre variaties tijdens een meting kunnen voorkomen. Voor de stroomsnelheid in m^3/s wordt geanalyseerd hoeveel spreiding er in de meetgegevens is voorkomen tijdens een meet sessie. Hetzelfde geldt voor het dwarsprofiel. Vanwege de verschillende meetinstrumenten die in de loop van de laatste honderd jaar zijn gebruikt wordt er periodiek onderscheid gemaakt.

De gekwalificeerde onzekerheden worden beoordeeld (A) met behulp van de Pedigree tabel. De onzekerheidsbronnen van de meetonzekerheid worden onderworpen aan de toetsingscriteria methodische en empirische kwaliteit. Onzekerheidsbronnen die invloed hebben op de empirische en methodische kwaliteit zijn:

1. Onzekerheden in de meetdata (empirische kwaliteit);
2. Onzekerheden met betrekking tot de uitvoering van de meting (methodische kwaliteit);
3. Onzekerheden met betrekking tot het functioneren van de apparatuur.

Ad. 1) Het verschil tussen de gemeten waarden en de werkelijke waarden wordt veroorzaakt door systematische en toevallige fouten (zie paragraaf 1.4). De systematische fout wordt voor dit onderzoek buiten beschouwing gelaten. De toevallige fout aangeduid als de spreiding is afhankelijk van de marges die voorkomen in de resultaten van de duplometingen.

Ad. 2) Voor de onzekerheid met betrekking tot de uitvoering van de metingen gaat de aandacht alleen uit naar de hoogwatermetingen. In hoeverre de meting beïnvloedt wordt door buitengewone omstandigheden, bepaalt in welke mate afgeweken moet worden van de standaard procedures. Hoe meer er van de standaard procedures wordt afgeweken, des te minder basis bestaat er nog voor de verificatie van de resultaten. Wanneer metingen zijn verricht in een meer natuurlijk gevormd dwarsprofiel zoals St. Pieter in plaats van het kanaalvormige rivierprofiel zoals in Maastricht, wordt het meetresultaat ook lastiger te interpreteren vanwege de non-uniformiteit. Analyse van de

meetresultaten moet uitmaken of er daadwerkelijk sprake is van interpretatieverschillen. De NUSAP kwaliteitsbeoordeling voor de methodologie is hiervan afhankelijk.

Ad. 3) Als gevolg van bezwijken of falen kan een instrument zijn functie niet meer vervullen. Een instrument kan falen als gevolg van bijvoorbeeld een technische storing of een energiestoring. Van de meetstations Borgharen, St. Pieter en voorheen Maastricht is niet bekend of een dergelijke situatie is voorgekomen. Of de instrumenten sinds het begin van het meten volgens de gebruikelijke opgave heeft gefunctioneerd is moeilijk te achterhalen. De gehandhaafde meetprotocollen en logboekregistraties zouden hierover meer kunnen vertellen maar zijn niet boven water gekomen ten tijde van dit onderzoek. De systematische fout die hiermee samenhangt is daardoor niet te beoordelen. Laboratoriumonderzoek met een stroomgoot afgesteld op een bekend debiet zou meer uitsluitsel kunnen geven over de systematische fout van de verschillende gebruikte instrumenten. Navraag bij Rijkswaterstaat Limburg over rapportages van dergelijke onderzoeken heeft geen resultaten opgeleverd. Er bestaat zodoende te weinig informatie om de systematische fout van de gebruikte instrumenten te beoordelen. Voor het vervolg in dit onderzoek zullen alleen de toevallige fouten geanalyseerd worden (zie ad.1).

2.2 Meetinstrumenten

Tabel 2.1 geeft een overzicht van de gebruikte meetapparatuur die door de meetdienst van Rijkswaterstaat Limburg is gebruikt. De eerste stroomsnelheidsmetingen gebeurde met stokdrijvers welke later vervangen zijn door kettingdrijvers. Daarna volgden de Ott-molens en tegenwoordig de akoestische meetapparatuur. Ook de apparatuur voor het meten van de waterstand en het dwarsprofiel is gewijzigd. De waterstand werd tot ver in de 20^e eeuw gemeten met een peilschaal en later met de automatische peilschrijver. Tegenwoordig wordt de waterstand bij Borgharen gemeten met een digitale niveaumeter (DNM). Het meten van het bodemniveau in het zomerbed gebeurt met een meetschip uitgerust met een lodingsysteem en de uiterwaarden met behulp van landmeetapparatuur.

	1917-1956	1956-1965	1965-1975	1975-2000	2000-
Waterstand	Peilschaal beneden de sluis km.15,46	Peilschaal beneden de sluis km. 15,46	Peilschaal beneden de sluis km. 15,46	1974 Registrerende peilschrijver km.16 1987 DNM geplaatst	Digitale niveaumeter (DNM) km.16
Stroomsnelheid	Stokdrijver/ kettingdrijver	Ott-molen	Ott-molen	Ott-molen	ADCP
Debiet					ADM
Dwarsprofiel	<i>Droge oeverbepaling:</i> Waterpas en raaipalen <i>Natte profiel:</i> Peilstok	<i>Droge oeverbepaling:</i> Waterpas en raaipalen <i>Natte profiel:</i> Peilstok	<i>Droge oeverbepaling:</i> Theodoliet en raaipalen <i>Natte profiel:</i> staaldraad met merktekens en peilstok	<i>Droge oeverbepaling:</i> Theodoliet en raaipalen <i>Natte profiel:</i> staaldraad met merktekens en peilstok	<i>Droge oeverbepaling:</i> Raaipalen en GPS RTK ¹ <i>Natte profiel:</i> meetschip en lodingsysteem

Tabel 2.1 Overzicht gebruikte meetinstrumenten Borgharen (pers. comm. Tekstra, 2006)

¹ GPS, RTK: Global Positioning System, Real Time Kinematic. RTK is ondersteunend plaatsbepalingssysteem met hogere nauwkeurigheid.

2.2.1 Waterstandsmeting

Waterstanden kunnen worden geregistreerd met behulp van observatie van peilschalen of met automatische meetapparatuur. De automatische meetapparatuur heeft het voordeel dat de nauwkeurigheid hoger is, het makkelijker is om gegevens van andere stations door te sturen en er niet altijd een persoon bij het meten betrokken hoeft te zijn, wat bij observatie uiteraard wel het geval is. Met de DNM wordt elke 10 minuten de waterstand automatisch geregistreerd.

De waterstanden worden sinds 1911 gemeten beneden de stuw Borgharen. De reden hiervoor is dat de waterstand dan niet onder invloed staat van stuwmanipulaties, aangezien stuwbeheer alleen effect heeft op de waterstand bovenstrooms.

De waterstandsmeting wordt gebruikt voor afleiding van de afvoeren uit de QH-relatie. De onzekerheid van de waterstandsmeting wordt zodoende pas bij het gebruik van de QH-relatie toegevoegd. De omgang met deze doorwerking van onzekerheden staat beschreven in paragraaf 6.1 'voortplanting van onzekerheden'.

Peilschaal (1911-1975)

De oudste waterstanden zijn opgenomen door middel van het aflezen van de peilschaal beneden de sluis van Borgharen (km. 15.460). Een peilschaal is een paal die verticaal in het water staat met daarop afgebeeld de centimeterverdeling ten opzichte van Normaal Amsterdams Peil (NAP). Registratie van de waterstanden gebeurde tot 1950 éénmaal per dag om acht uur iedere morgen, daarna elke vier uur. Aangenomen kan worden dat een topafvoer van een hoogwatergolf in werkelijkheid nooit werd gemeten, aangezien de kans dat deze tussen twee opnamen zou optreden, veel groter zou zijn. Zodoende zijn de 8-uur topafvoeren die gebruikt zijn bij de huidige maatgevende afvoer tijdens het onderzoek Boertien II gecorrigeerd (Min van V&W, 1994) Daarover meer in hoofdstuk 4.



Figuur 2.4 Peilschaal

Beoordeling NUSAP

Spreiding: Van de peilschaal mag worden aangenomen dat deze met de nodige expertise geïnstalleerd is, rekeninghoudend met een zorgvuldige overname van het NAP. Over de nauwkeurigheid van de waterstandsmeting onder normale omstandigheden, hoeft niet veel twijfel te bestaan. Voor dit onderzoek is geen literatuur gevonden waarin de aflezing van de peilschaal is geanalyseerd. De onzekerheid is daarom geschat op basis van inzicht. De toevallige meetfout die ontstaat door golfwerking en windopstuwing waardoor het aflezen van de centimeterverdeling enigszins bemoeilijkt kan worden, zal tijdens hoge afvoeren niet veel groter zijn dan enkele centimeters. Voor de kwantificeerbare onzekerheid wordt een maximale foutmarge van 3 cm aangehouden.

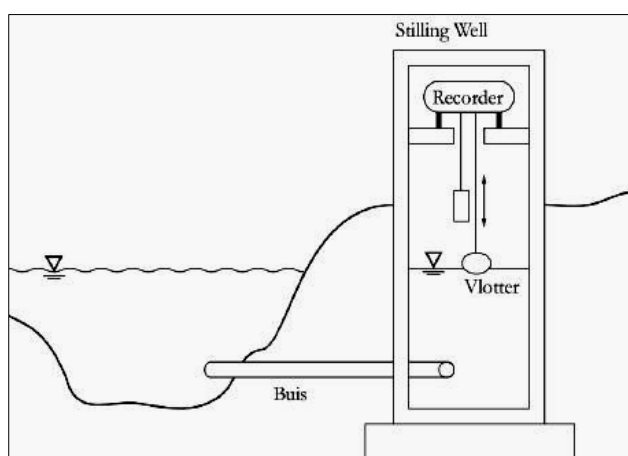
Empirische kwaliteit: Het aflezen van een peilschaal is een zeer directe vorm om de parameter (H) te schatten. Aangezien een waterstandsmeting een momentane opname is, is het niet mogelijk om een serie van metingen van dezelfde waterstand uit voeren. Tijdens het aflezen worden indirect al meerdere metingen uitgevoerd omdat het wateroppervlak continu in beweging is en de aflezer een gemiddelde bepaald afhankelijk van de golfbewegingen. Door de golfbewegingen kan niet zomaar gesproken worden van goede kwalitatieve waarnemingsgegevens. Het is een gecontroleerd experiment met een klein aantal directe metingen. De Beoordeling volgens NUSAP ligt daardoor tussen twee criteria in namelijk: "gecontroleerde experimenten & groot aantal directe metingen", score

is 4 en “Historische/veldgegevens, ongecontroleerde experimenten, klein aantal directe metingen”, score is 3. De resulterende score is 3,5.

Methodische kwaliteit: Vanwege de eenvoud van de uitvoering is er nauwelijks sprake van een methodiek. Alleen bij veel golfwerking zal de aflezer meer tijd moeten nemen om de gemiddelde waterstand te bepalen. Vanwege het algemene gebruik van dit instrument binnen het waterbeheer kan de methode gezien worden als betrouwbaar, die bekend is binnen de discipline. De bijbehorende NUSAP score is 3.

Registrerende peilschrijver (1975-1987)

Al in de eerste helft van de negentiende eeuw werd het principe van de peilschrijver ontwikkeld. Desondanks heeft nog tot 1975 geduurd voordat van de peilschaal is overgestapt naar de peilschrijver. Het meetgedeelte bestaat uit een vlotter drijvend op het wateroppervlak verbonden met



Figuur 2.5 Principewerking peilschrijver

een pen. Deze registreert continu de waterstand op een ronddraaiende papieren rol. Tijdens de introductie van de registrerende peilschrijver had deze het voordeel dat er alleen tijdens de installatie van de papieren rol een persoon aanwezig hoeft te zijn terwijl het verder automatisch de waterstanden meet en registreert.

Figuur 5 geeft schematisch de opstelling van de peilschrijver in de peilput weer. De registrerende peilschrijver heeft het grote voordeel dat vooral de sterke afvoerfluctuaties van regenrivieren continu kunnen worden geregistreerd. Volgens een

eerder gedane studie van Herschy (1999) heeft de peilschrijver een meetonzekerheid van hooguit 1 cm (Arnold, 2004). Deze hoge nauwkeurigheid kan verklaard worden door de golfdempende werking van de buis die via de rivier is verbonden met de peilput, werkend volgens het principe van de communicerende vaten. De waterstand wordt zonder versturende weersinvloeden van buiten gemeten. De systematische fout kan worden veroorzaakt door een verkeerde overname van het NAP of een niet secure installatie. Aangenomen wordt dat de meetapparatuur met zorgvuldigheid is geïnstalleerd waardoor de grootte van de systematische fout geen significant aandeel heeft in de onzekerheid.

Beoordeling NUSAP

Spreiding: De onnauwkeurigheid van het meetinstrument wordt overgenomen uit de bepaling van Herschy (Arnold, 2004). De spreiding is 1 cm.

Empirische kwaliteit: De geregistreeerde waterstanden zijn direct afgeleid van het waterpeil in de put welke gelijk is aan het waterpeil in de Maas. Aangezien de meting onbemand gebeurt, is het een ongecontroleerd experiment maar met een grote hoeveelheid directe metingen vanwege de continue registratie. De overeenkomstige waardering volgens de Pedigree tabel ligt tussen twee omschrijvingen in, namelijk: “Historische/veldgegevens, ongecontroleerde experimenten, klein aantal directe metingen”, score is 3 en “gecontroleerde experimenten & groot aantal directe metingen”, Pedigree score is 4. De uiteindelijke score komt daardoor op 3,5.

Methodische kwaliteit: Peilschrijvers zijn in Nederland in de vorige eeuw op grote schaal toegepast. Daaruit kan worden afgeleid dat de meetmethode geaccepteerd is binnen de discipline. De NUSAP beoordeling komt daardoor uit op de hoogste score in overeenstemming met de omschrijving: “goedgekeurde standaard in gevestigde discipline”. De Pedigree score is 4.

Digitale Niveaumeter (vanaf 1987)

De moderne uitvoering van de registrerende peilschrijver werkt volgens hetzelfde principe maar is nog verder verfijnd en gedigitaliseerd. De Digitale Niveaumeter (DNM) heeft de peilschrijver vervangen maar meet onder dezelfde omstandigheden als in de paragraaf hiervoor beschreven. De analoge schrijver is vervangen door een mechanisch-digitaal instrument. In de meetbuis is een vlotter opgehangen die via een metalen vlotterband en Gray-codeschijven² continu de waterstand registreert. Verder is het instrument uitgerust met een golfdemper. Jaarlijkse ijking zorgt ervoor dat het instrument goed afgesteld blijft. Het enige nadeel van dit systeem is dat het tamelijk onderhoudsgevoelig is: de vlotterbuis, die in een bak met water hangt, krijgt te maken met bezinkend sediment, waardoor de meetpaal regelmatig moet worden schoongemaakt (7). Daarom heeft de DNM bij Borgharen twee meetbuizen. De één heeft een opening vlak boven de bodem van de Maas zodat deze altijd onder water staat. De ander ligt hoger zodat alleen bij hogere waterstanden deze in werking treedt. Hiermee wordt de kans op gegevensverlies voor de meer belangrijke hogere afvoeren beduidend kleiner. De DNM met vlotterstelsel is een door de afdeling Hydro-Instrumentatie van het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) zelf ontworpen systeem. Doordat bepaalde onderdelen in de toekomst niet meer kunnen worden aangeleverd (mede vanwege het feit dat RIKZ dit systeem zelf ontworpen heeft) zullen alle DNM's in de toekomst vervangen worden door radarniveaumeters (7).

Beoordeling NUSAP

Spreiding: Evenals voor de peilschrijver het geval was heeft onderzoek Herschy (Arnold, 2004) aangetoond dat de DNM een meetonzekerheid heeft van 1 cm.

Empirische kwaliteit: De controleerbaarheid van de DNM is ten opzichte van de peilschrijver in principe verbeterd omdat de digitale gegevens direct verzonden worden naar Rijkswaterstaat. Het aantal directe metingen is verder gelijk gebleven met de peilschrijver omdat beide een continue registratie hebben. In overeenstemming met de NUSAP beoordeling: “gecontroleerde experimenten en groot aantal directe metingen”, verdient de DNM een Pedigree score van 4

Methodische kwaliteit: Alle 150 in Nederland aanwezige meetstations zijn uitgerust met een DNM (1). Dat de methode geaccepteerd is binnen de discipline mag duidelijk zijn en zal daardoor zonder twijfel de hoogste score verdienen in overeenstemming met de NUSAP beoordeling: “goedgekeurde standaard in gevestigde discipline”, Pedigree score is 4

² Graycodeschijf: Binaire codering met als eigenschap dat twee opeenvolgende getallen altijd maar één bit verschillen. Als een van de positiegevers defect is of als niet alle positiegevers exact gelijktijdig schakelen zal de code altijd nog “in de buurt” van de werkelijke waarde liggen (wikipedia.nl).

2.2.2 Stroomsnelheidsmeting

De vijf meest gebruikelijke methoden om stroomsnelheid te meten worden in deze paragraaf beschreven waarvan er drie bij Maastricht zijn gebruikt.

Verhang-oppervlak methode

Een van de oudste methoden om de stroomsnelheid te bepalen is door gebruik te maken van een vergelijking waarmee achteraf – als de hoogwatergolf al gepasseerd is – de stroomsnelheid berekend kan worden. De methode wordt ook wel gebruikt wanneer door extreem hoogwater de meetapparatuur niet goed heeft kunnen functioneren. Door de waterstandsmarkering af te lezen na een hoogwater kan met gebruikmaking van de Chezy formule de bijbehorende snelheid worden bepaald en vervolgens de afvoer. Het is echter een onnauwkeurige methode vanwege het ontbreken van de werkelijke snelheidsmeting. Deze methode is niet gebruikt voor de Maas.

Stokdrijver (1917-1956)

De stokdrijver is een staaf of buis die in het midden van een kanaal of rivier wordt losgelaten zodat deze met de stroming wordt meegevoerd. Vervolgens wordt de reistijd tussen twee punten gemeten. De reistijd gedeeld door de afstand tussen deze punten is, na correctie, een maat voor de stroomsnelheid van het water.



Figuur 2.6 Bovenaanzicht principewerking stokdrijver

De Nederlandse stokdrijver (Krayenhoffsche drijver) bestaat uit een 8 à 10 cm dikke stok, aan het ondereind verzwaard, aan het boveinde eventueel voorzien van een zinken drijfkop (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1994). De stok dient tot nabij de bodem van de rivier te reiken. Meestal wordt voor de lengte 0,9 maal de waterdiepte gehandhaafd. De methode voor het meten met stokdrijvers is op de redelijke veronderstelling gebaseerd dat de snelheid van de staaf de gemiddelde snelheid van het water vertegenwoordigt. Metingen worden meerdere malen herhaald teneinde meer zekerheid te verkrijgen over de gemiddelde snelheid. Omdat het meten aan de oevers nagenoeg onmogelijk is, wordt voor de snelheden op die plaatsen tweederde of driekwart van de aangrenzende watersnelheid aangehouden (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1993). De stokdrijver wordt bij voorkeur gebruikt in kanalen met rechte stukken die regelmatig en gelijkvormig in dwarsdoorsnede en verhang zijn. Daarbij moeten ook plaatsen waar turbulente stromingen en draaikolken kunnen optreden vermeden worden. Op plaatsen waar aan deze voorwaarden kan worden voldaan kunnen snelheidsmetingen met een relatief hoge graad van nauwkeurigheid worden uitgevoerd (5). De meetlocatie in Maastricht tussen de Sint Servaasbrug en de Wilhelminabrug voldeed aan deze voorwaarden (recht langsprofiel met kademuuren) zodat de metingen daar zijn uitgevoerd.

Onder normale omstandigheden wordt de gemeten snelheid vermenigvuldigd met een coëfficiënt om de werkelijke stroomsnelheid van het water te benaderen. Een voorbeeld is hieronder gegeven.

Gem. waterdiepte (m)	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	>3,0
Coëfficiënt	0.66	0.68	0.70	0.72	0.74	0.76	0.77	0.78	0.79	0.80

Tabel 2.2 Coëfficiënten voor stroomsnelheden gemeten met stokdrijvers in de VS (5)

Aangezien het alweer een lange tijd geleden is dat metingen met de stokdrijver zijn uitgevoerd, is het moeilijk over de methode de benodigde informatie te verkrijgen. De methode zal door zijn eenvoud en het uniform blijvende dwarsprofiel onder normale dan wel hoogwatersituaties onveranderd blijven. De nauwkeurigheid van het meten met stokdrijvers wordt beïnvloed door een aantal factoren. Dit zijn onder andere:

- gebrek aan nauwkeurigheid in de coëfficiënten;
- aantal meetseries;
- veranderingen in bodemniveau langs het testbereik;
- niet uniforme stroming;
- wind;
- experimentele fouten in het meten van tijd en afstand;
- obstakels op de bodem van de rivier.

Een stokdrijver heeft dus vele mogelijke onzekerheidsfactoren waarvan kan worden aangenomen dat de kans van optreden vrij groot is aangezien zij niet alleen bij uitzonderlijke omstandigheden kunnen optreden. Bij de metingen met de stokdrijver werd, in tegenstelling tot de Ott-molen, maar van een klein aantal meetverticalen (Figuur 2.8c) in het dwarsprofiel gebruik gemaakt. De stokdrijver drijft geheel vrij van het startmeetpunt naar het eindmeetpunt en kan daardoor naar links of rechts uitwijken. Het had daardoor ook weinig zin om op elke meter de gemiddelde stroomsnelheid te meten. Het was eerder *gewenst* om te meten over minstens drie tot vijf secties over de rivierbreedte die in Maastricht ongeveer 200 m is. De situering was echter wel gunstig omdat er gemeten werd over een recht en nagenoeg uniform gedeelte tussen de twee bruggen. Dit leidt vervolgens tot een makkelijker te interpreteren stroomsnelheidsprofiel zodat ondanks een kleine hoeveelheid aan meetgegevens een redelijke inschatting van de gemiddelde snelheid gegeven kan worden. Desondanks wordt voor de onzekerheidsanalyse rekening gehouden met de gevoeligheid voor de vele invloedsfactoren en het verhoudingsgewijs grote gebied waarvan de snelheid is aangenomen.

Beoordeling NUSAP

Spreading: Omdat van de stokdrijvermetingen weinig informatie beschikbaar is gekomen moet met aanneming van een aantal aspecten worden beredeneerd. Van de Ott-molen die na de stokdrijver is toegepast ligt de onzekerheid volgens het onderzoek van Herschy (1999) op 5%, voornamelijk gebaseerd op afvoerfluctuaties tijdens een meting (Arnold, 2004). Rekeninghoudend met een vergelijkbaar tijdsbeslag van de meting wordt de waarde van 5% ook voor de stokdrijver gehanteerd. Aangenomen wordt om rekening te houden met een extra onzekerheid van 5% ten gevolge van de externe invloedsfactoren zoals eerder beschreven wat de totale procentuele onzekerheid brengt op 10%. Overigens is in het onderzoek van Boertien I al aangegeven dat stokdrijvers een overschatting van de afvoer gaven tot 7%.

Empirische kwaliteit: Het aantal directe metingen is in vergelijking met de later toegepaste Ott-molen niet erg hoog. De stokdrijver is op hooguit vijf secties te water gelaten waarna de meting een aantal keren werd herhaald (Tekstra, 2006). Ondanks dat de meetdienst aanwezig was bij de metingen is de controleerbaarheid niet feilloos omdat de stokken vrij door het water konden manoeuvreren. De Pedigree tabel geeft niet een passende omschrijving en ligt tussen twee omschrijvingen in. Het gebruik van coëfficiënten voor de stroomsnelheid op een bepaalde diepte is een handboekschatting, daarentegen zijn wel directe, semi-gecontroleerde metingen uitgevoerd. De twee omschrijvingen voor de empirische kwaliteit zijn als volgt: “gemodelleerde gegevens, indirecte maten, handboek schattingen”, score is 2. En: “Historische/veldgegevens, ongecontroleerde experimenten, klein aantal directe metingen.”, score is 3. De Pedigree score komt uiteindelijk op 2,5.

Methodische kwaliteit: De stokdrijver werd in Nederland toegepast terwijl in België al voor langere tijd de Ott-molen werd gebruikt. Het mag duidelijk zijn dat met de Ott-molen nauwkeuriger metingen kunnen worden verricht dan de stokdrijver. Maar de stokdrijver heeft zich wel bewezen gezien de bijna 40 jaren dat deze is gebruikt door Rijkswaterstaat. De NUSAP omschrijving is passend: “aanvaardbare methode, maar beperkte consensus op betrouwbaarheid”, Pedigree score is 2

Ott-molen (1957-2000)

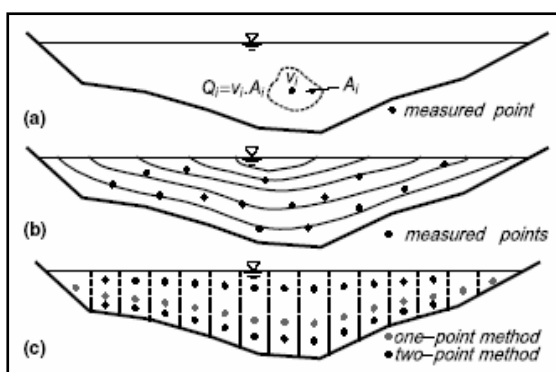
De Ott-molen (Figuur 2.7) is een propeller aangedreven stroomsnelheidsmeter die al geruime tijd wereldwijd wordt toegepast. Bij elke ronddraaiende beweging wordt een elektrisch signaal afgegeven die met een bijbehorende rekeneenheid wordt omgezet in de stroomsnelheid. Het bepalen van de meetpunten voor de stroomsnelheid is afhankelijk van de berekeningsmethode voor de afvoer en de gewenste nauwkeurigheid. Omdat de stroomsnelheid van een rivier nagenoeg nergens gelijk is, wordt



Figuur 2.7 Ott-molen (9)

de nauwkeurigheid alleen maar vergroot door op een groot aantal verschillende punten te meten en vervolgens een gemiddelde ofwel de geaggregeerde snelheid te bepalen. Wanneer op meerdere punten wordt gemeten, vertegenwoordigt elk meetpunt een gebied waarvoor die stroomsnelheid geldt (Figuur 2.8a). Hoe groter dit gebied, des te meer onzekerheid ontstaat over de gemiddelde stroomsnelheid.

Het is mogelijk om uit te gaan van één punt zoals weergegeven in Figuur 2.8a. De vuistregel dat de gemiddelde snelheid op 0,6d ligt, wordt hier aangenomen. Hierbij is ‘d’ de gemiddelde waterdiepte. Deze veronderstelling is gebaseerd op het logaritmische snelheidsprofiel zoals in Figuur 2.11b weergegeven. Een andere methode is het bepalen van de isotachen (stroomsnelheid-dieptelijnen) door op verschillende plaatsen de stroomsnelheid te meten. Op deze manier wordt een longitudinaal snelheidsprofiel verkregen.



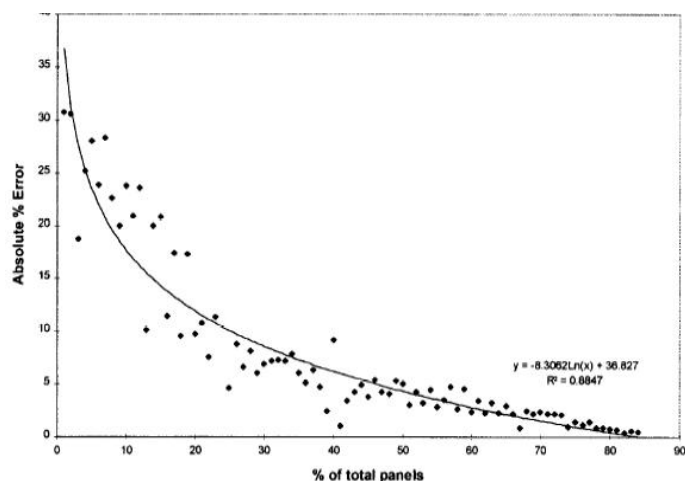
Figuur 2.8 Verschillende technieken voor debietmetingen (Maghrebi, 2005)

Vervolgens kan de snelheids-oppervlak integraal ($Q = \int_A v \cdot dA$) gebruikt worden voor bepaling van het debiet. Met de twee-punten meetmethode zoals voorgesteld in Figuur 3c wordt gemeten op 0,2d en 0,8d. De gemiddelde snelheid is vervolgens het rekenkundig gemiddelde tussen deze meetpunten. Wanneer over het dwarsprofiel een aantal van deze metingen wordt herhaald, kunnen de gemiddelde snelheden van de zijdelingse oppervlakken worden opgeteld. Dezelfde methodiek kan voor de een-punt methode gebruikt worden.

Uiteraard is met nog meer punten te meten. Gestandaardiseerde (British Standard ISO) meetpunten zijn onderverdeeld in 1, 2, 3 en 5 punts metingen in de verticaal (Whalley, 2001).

Een belangrijke afweging die van invloed is op de onzekerheidsanalyse is de optie te kiezen voor een groot aantal verticalen in het dwarsprofiel met een gering aantal meetpunten of een reductie in het aantal verticalen maar met meerdere meetpunten. Wanneer zowel een groot aantal verticalen als meetpunten gemeten worden, dan zal de tijdsduur van de meting te langdurig worden. Dit komt mede omdat de Ott-molen stil moet hangen ten tijde van de meting. Daarnaast reageert de Maas vrij snel op neerslag zodat ook de afvoer in korte tijd aanzienlijk kan fluctueren. Om de meting onder nog enigszins stationaire omstandigheden uit voeren is het van belang de tijdsduur beperkt te houden. Een groter aantal meetpunten in plaats van verticalen heeft het meeste nut bij lage afvoeren. Dit geldt voornamelijk bij afvoeren die een functie zijn van stroomsnelheid ofwel waarbij de dwarsdoorsnede gelijk is bij lage en hoge afvoeren (Whalley, 2001) Wanneer de Maasuitewaarden overstromen bij hoge afvoeren is het vanzelfsprekend beter om te kiezen voor meer verticalen. Zo ook op de plaatsen waar een overgangssituatie (ruwheid of niveau) voorkomt in het dwarsprofiel.

Het is gewenst om een goede verdeling van zowel verticalen als meetpunten te hebben voor verschillende afvoeren. De keuze voor de juiste afweging is bepalend voor de mate van nauwkeurigheid. In het onderzoek van Whalley (2001) is hiervan een duidelijk voorbeeld gegeven: Het vervangen van 16 verticalen met 5-puntsmetingen in de dwarsdoorsnede door 20 verticalen (2 extra bij de oevers) met 2-puntsmetingen zou een tijdsbesparing opleveren van 25% en een toename van de nauwkeurigheid van 4%. De toename van de nauwkeurigheid is ontstaan door een 5% hogere nauwkeurigheid vanwege de extra verticalen en een 1% lagere nauwkeurigheid door afname van het aantal meetpunten. Daarbij is de wellicht hogere nauwkeurigheid - minder invloed door afvoerfluctuaties vanwege tijdsbesparing - nog niet meegenomen. Figuur 2.9 uit een artikel van



Figuur 2.9 Toename fout bij afname van verticalen (Maghrebi, 2000)

Maghrebi (2000) geeft aan dat er een logaritmisches verband waarneembaar is tussen verhouding verticalen en de 'fout'.

Rijkswaterstaat gebruikt voor de Ott-molen-metingen minstens 12 verticalen (Rijkswaterstaat, 2001c). In Borgharen en St. Pieter is meestal met 20 verticalen over het dwarsprofiel gemeten. Er werd gemeten volgens 2 methoden: De semi-integratie methode en de puntmeetmethode.

- Semi-integratie methode: In de verticaal werd over gelijke afstanden van 0,20 m gemeten zodat aan het einde van de meting direct het debiet uitgerekend kon worden. Het eerste punt lag 0,15 m boven de bodem en het laatste punt lag 0,15 m onder de wateroppervlakte. De semi-integratiemethode werd bij gemiddelde waterstanden en afvoeren gebruikt en alleen op een groot

meetschip van 15 m. Nadeel van dit meetschip was dat het niet bij zeer lage en zeer hoge afvoeren ingezet kon worden vanwege de navigeerbaarheid van het vaartuig.

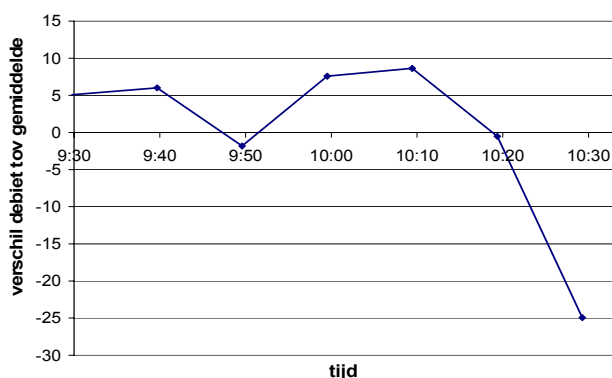
- **Puntmeetmethode:** hierbij werd gemeten op dezelfde hoogte boven de bodem en onder de wateroppervlakte en daarna op 0,50 m boven de bodem en onder de wateroppervlakte. Vervolgens op 1 m boven de bodem en onder de wateroppervlakte. Daarna werd bij een waterdiepte van < 5 m per meter gemeten en bij een waterdiepte > 5 m. per 2 meter. De puntmeetmethode werd bij hoog- en laagwater gebruikt, vanaf bruggen en vanuit kleine roeiboten (pers. comm. Tekstra, 2006).

Bij de extreme situaties geldend voor afvoeren hoger dan 2500 m³/s ondervond de meting wel enige belemmering. De extreem hoge afvoeren van rond de 3000 m³/s die voor het laatst zijn opgetreden in 1993 en 1995 zijn gemeten in resp. St. Pieter en Ravenstein.

De meetnauwkeurigheid is zonder twijfel voor afvoeren in het middenbereik het hoogst vanwege de gunstige omstandigheden (afvoer en dwarsprofiel in evenwichtssituatie). Voor dit onderzoek zijn alleen de metingen tijdens de hoge afvoeren van belang dus wordt alleen de puntmeetmethode beschouwd. Verondersteld kan worden dat de metingen vanaf bruggen en vanuit roeiboten redelijk nauwkeurig uit te voeren zijn. De meetdichtheid per m² is met de puntmeetmethode bij grotere waterdiepten weliswaar kleiner, relatief wordt door het aanzienlijk grotere stroomoppervlak tijdens een hoge afvoer een vergelijkbare meetdichtheid bereikt.

Beoordeling NUSAP

Spreiding: Het grootste nadeel van de Ott-molen is de tijdsduur van een meting die kan oplopen tot ruim drie uur waardoor variaties in de afvoer tijdens een duplometing worden meegenomen. In Figuur 5 zijn de veranderingen van het debiet gegeven in het tijdsbestek van een uur van een ADCP meting met een gemiddelde afvoer van 2.180 m³/s. De verschillen zijn hier maximaal 35 m³/s overeenkomend met 2% van de gemiddelde afvoer. Voor een Ott-molenmeting waarvan de tijdsduur



Figuur 2.10 Fluctuaties debiet t.o.v gemiddelde afvoer tijdens een ADCP meting

gedurende een hoge afvoergolf kan oplopen tot drie uur, kan op basis van deze gegevens worden aangenomen dat fluctuaties bij metingen van hoge afvoeren tot wel 6% van de gemiddelde waarde kunnen afwijken. In het onderzoek van Arnold (2004) is aangetoond dat de meetonzekerheid van de Ott-molen in een enkele afvoermeting wordt geschat op 5% van de afvoer (Ouwekerk, 2003). Ten aanzien van dit onderzoek wordt de 5% waarde aangenomen omdat de hiervoor bepaalde 6% een extrapolatie is.

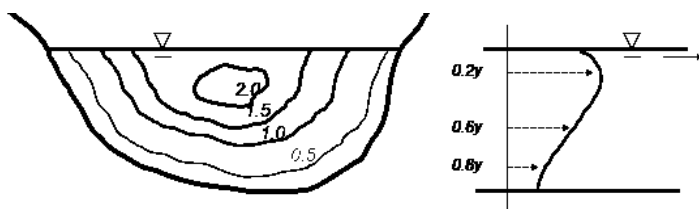
Empirische kwaliteit: De dichtheid en controleerbaarheid van de metingen ligt vele malen hoger dan de stokdrijver maar tijdens hoogwatersituaties worden nog steeds schattingen gedaan. Daardoor verdient de empirische kwaliteit niet de hoogste score. De waardering komt tussen de score 3 en 4 te liggen omdat sprake is van gecontroleerde experimenten in het veld. Overeenkomstige beschrijvingen in de Pedigree tabel zijn als volgt:

“gecontroleerde experimenten en groot aantal directe metingen”, score is 4. en
 “Historische/veldgegevens, ongecontroleerde experimenten, klein aantal directe metingen”, score is 3.
 De resulterende Pedigree score is 3,5.

Methodische kwaliteit: De puntmeetmethode staat weliswaar niet beschreven in de ISO normen maar heeft tijdens een hoogwatersituatie minstens zo veel metingen als de vijfpunts-meetmethode. Over de eerste meter onder het wateroppervlak en boven de rivierbodem worden in beide gevallen al drie metingen uitgevoerd en vervolgens per meter of per twee meter. Daar waar het stroomsnelheidsprofiel de minste uniformiteit vertoont (vlak bij de bodem en vlak onder de waterspiegel), is een relatief grote meetdichtheid verkregen. Doordat het een door RWS zelf ontwikkelde methode is die niet in binnen ISO normen is ontwikkeld verdient de methode niet de hoogste score maar zit het tussen score 3 en 4 in. Omschreven als: “goedgekeurde standaard in gevestigde discipline”, score is 4 en “betrouwbare methode, die bekend is binnen de discipline”, score is 3. De resulterende Pedigree score is 3,5.

Het isotachen-model

De stroomsnelheden over het dwarsprofiel zijn in beeld te brengen door zogenaamde isotachen zoals weergegeven in Figuur 2.11a. Deze stroomsnelheidslijnen vertonen veel overeenkomsten met het magnetische veld in de doorsnede wanneer spanning loopt door een staaldraad die over de bodem wordt gelegd. Een hierop gebaseerd model kan zodoende voor elk ingevoerd dwarsprofiel de contouren van de isotachen in beeld brengen (Nikolaev, 1989). Een eenmalig gemeten stroomsnelheid op een bepaalde diepte is dan voldoende om het stroomsnelheidsprofiel in beeld te brengen.



Figuur 2.11a en b. Stroomsnelheid dwarsdoorsnede en langsdoorsnede rivier

Deze methode is tot dusver niet in Borgharen toegepast en wordt daarom niet verder behandeld in dit onderzoek.

ADCP (2000)

De Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) meting is de meest recente methode toegepast bij St. Pieter om de afvoer te meten. Een ADCP kan worden gebruikt om stromingspatronen te meten met behulp van een varende boot of door middel van een vaste positie aan de oever. De laatste methode is vrij recent en wordt nog niet toegepast. Bij varende metingen wordt de ADCP aan een schip gemonteerd en worden lijnen gevaren waarbij de ADCP over deze lijn stroomsnelheidsprofielen meet tot aan de bodem. Het meetprincipe van de ADCP berust op het meten van de Dopplerverschuiving. Het instrument zendt een puls uit met een vaste frequentie, die gereflecteerd worden door de deeltjes in het water. Door de beweging van de deeltjes ten opzichte van de ADCP ontstaat er een frequentieverandering. Deze frequentieverandering is een maat voor de snelheid van het water. Met vier bundels is het instrument in staat om stroomsnelheid en –richting te bepalen. Het instrument is bij de varende boot methode in staat om in een meting bijna de gehele verticaal door te meten. Het aantal metingen waarover gemiddeld wordt, is samen met de celomvang (Figuur 2.13) bepalend voor de nauwkeurigheid van de meting.

Het meetbereik van het instrument wordt naast de hoogte van de frequentie (hoe hoger de frequentie, hoe kleiner het meetbereik) hoofdzakelijk bepaald door de volgende factoren:

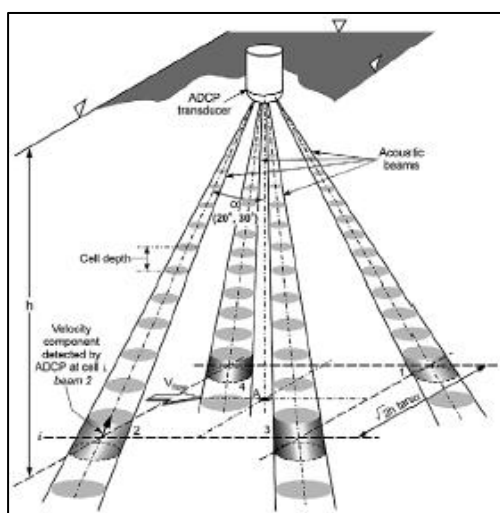
- de zijlobben: het buiten de meetbundels weggezonden geluid. De reflecties van de zijlobben naar de bodem en terugkerend naar het instrument leveren incorrecte snelheidswaarden op omdat de

bodem geen snelheid heeft (Rijkswaterstaat, 2003). Deze verstoringen zullen door software uitgefilterd moeten worden.

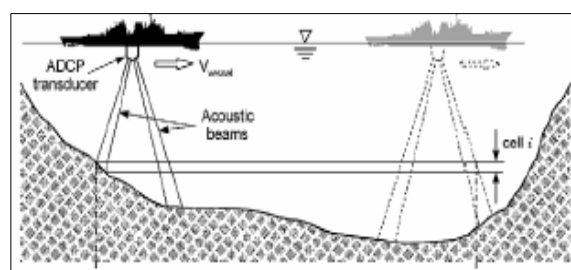
- absorptie van het geluid: de samenstelling van het water (helderheid) bepaalt mede de dichtheid van het gereflecteerde geluid;
- verlies door divergentie van de bundel: op grotere diepte is de meetnauwkeurigheid lager;
- het vermogen van de geluidsbron.

Een groot voordeel van de ADCP is de tijdwinst die wordt geboekt ten opzichte van de Ott-molen. Het meten met een Ott-molen kost twee tot drie uur, terwijl voor een ADCP-meting maar drie minuten nodig is. Omdat er geen afweging meer hoeft te worden gemaakt voor de keuze tussen het aantal verticalen en meetpunten - de ADCP-meetboot heeft op elke diepte een geconcentreerd meetbereik - kan continu worden doorgevoerd.

Wanneer de meting vanuit een bewegende boot wordt uitgevoerd, zal overlapping van de gegevens zorgen voor meetvlakken bestaande uit stroomsnelheden op verschillende niveaus. Door alle meetvlakken met horizontale meetgegevens met een computermodel te converteren naar verticale data, wordt een stroomsnelheidsprofiel verkregen over de dwarsdoorsnede.



Figuur 2.13 Janus configuratie ADCP-meting



Figuur 2.12 Meting volgens Janus-configuratie met bewegende boot



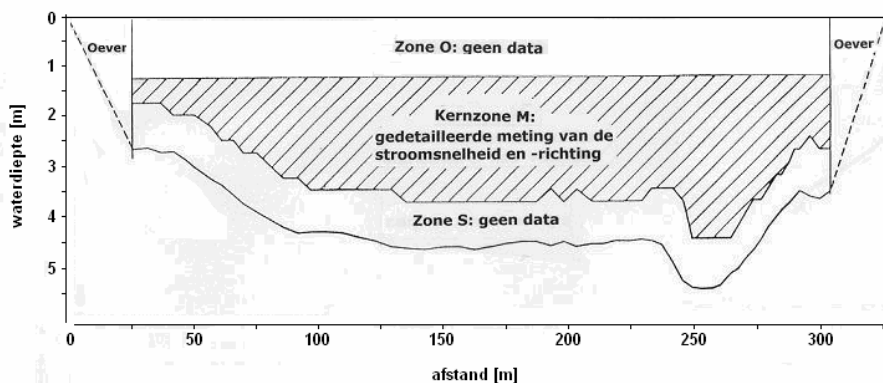
Figuur 2.14 Het door RWS-Limburg sinds 2001 gebruikte ADCP-meetschip, tijdens een hoogwatermeting in Ravenstein.

Sinds in Borgharen de ADCP in gebruik is genomen zijn een aantal belangrijke voordelen ten opzichte van de Ott-molen bereikt, namelijk:

- sneller, dus meer dwarsprofielen op een dag mogelijk
- hogere meetdichtheid (van het gemeten gedeelte)
- nauwkeuriger

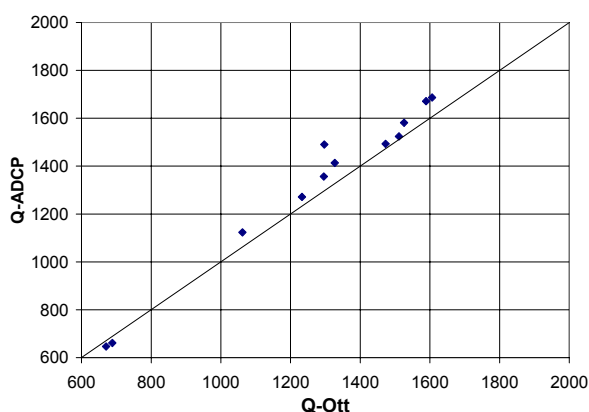
De hogere meetdichtheid is een voordeel maar niet de gehele dwarsdoorsnede kan met de ADCP worden gemeten. Figuur 2.15 geeft aan dat de bovenste meter niet wordt meegenomen evenals de

onderste meter vanaf de bodem en de oevers. De ADCP is gevoelig voor bewegend bodemsediment waardoor het onderste gedeelte van de meting teveel verstoord wordt. Interpolatietechnieken worden gebruikt om het overige onbekende meetgebied te bepalen. Er wordt gestreefd naar een minimale procentuele verhouding van 70% en 30% voor respectievelijk het gemeten en niet gemeten gedeelte.



Figuur 2.15 Gemeten profiel en marge zones ADCP (RWS Limburg, 2006)

Tijdens hoog water zal deze verhouding eerder worden bereikt dan tijdens gemiddelde waterstanden. Althans, wanneer gemeten wordt op een sectie waar geen of nauwelijks uiterwaarden aanwezig zijn. Het meten in uiterwaarden met de ADCP zorgt eveneens voor een lagere meetdichtheid. In St. Pieter - bovenstrooms van Maastricht - komt deze situatie bijna nooit voor omdat de Maas nog tot zeer hoge afvoeren van wel $2.500 \text{ m}^3/\text{s}$ in het zomerbed blijft stromen. Dit valt af te leiden uit de gegevens van de akoestische debietmeter (ADM, zie § 2.2.3). De ADM die alleen de afvoer in het zomerbed kan meten (Rijkswaterstaat, 2003a) geeft bij de locatie St. Pieter nog waarden tot $2.500 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figuur 2.19). Benedenstrooms van Maastricht bij Borgharen verandert deze situatie waar bij afvoeren van rond de $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$ het gehele winterbed onder water staat. De meetdichtheid van hoogwatermetingen met de ADCP bij St. Pieter neemt relatief gezien toe ten opzichte van laagwatermetingen. Van de metingen in de uiterwaarden is niet bekend hoeveel verstoring er tijdens de meting optreedt maar de begroeiing zal ongetwijfeld zorgen voor een niet meetbaar gedeelte.



Figuur 2.16 Vergelijking afvoermetingen Ott-molen en ADCP. (Rijkswaterstaat, 2001c)

In januari 2001 is een veldonderzoek uitgevoerd voor afvoermetingen met zowel de Ott-molen als de ADCP om het verschil tussen deze twee methoden in kaart te brengen. Het resultaat is in onderstaande Figuur weergegeven. De meetlocaties betroffen Venlo, Ravenstein en Megen. Uit de Figuur is af te lezen dat de ADCP gemiddeld hogere afvoeren geeft dan de Ott-molen. Dit zegt natuurlijk nog niets over de systematische fout van de meting. Die is alleen te achterhalen met een vergelijkend laboratoriumonderzoek.

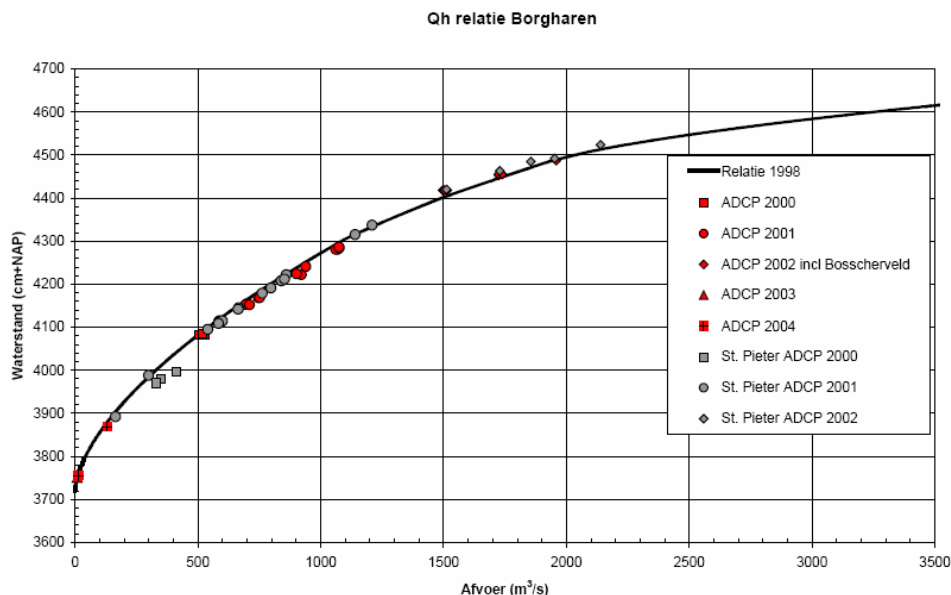
Tijdens dit onderzoek zijn geen laboratoriumresultaten gevonden met ADCP metingen onder uniforme condities. Over de systematische fout van de meting kan daardoor geen uitspraak worden gedaan. Feit is wel dat de ADCP waarde een gemiddelde is van tenminste tien metingen die uitgevoerd kunnen worden tijdens één Ott-molen meting. Ook al is de hoogte van de systematische fout moeilijk te kwantificeren, voor de ADCP meting kan met meer zekerheid worden gezegd hoeveel spreiding er rond de gemiddelde waarde ligt.

Locatie	Tijd	Q MSW	Q Ott	Qgem ADCP	Q _{MSW} - Q _{Ott}	%	Q _{MSW} - Q _{ADCP}	%
Venlo 07-01-2001	10:00-12:00	1397,37	1295,43	1356,51	101,94	7,30	40,86	2,92
Venlo 07-01-2001	13:30-15:00	1457,46	1326,95	1413,42	130,51	8,95	44,04	3,02
Venlo 08-01-2001	09:30-11:30	1748,33	1588,82	1670,88	159,51	9,12	77,45	4,43
Venlo 08-01-2001	13:00-15:00	1748,33	1606,29	1686,18	142,04	8,12	62,15	3,55
Venlo 09-01-2001	09:30-12:00	1637,79	1525,92	1581,13	111,87	6,83	56,66	3,46
Ravenstein 10-01-2001	09:30-12:00		1511,07	1524,1				
Ravenstein 10-01-2001	12:45-15:00		1472,72	1492,99				
Ravenstein 10-01-2001	14:30-16:00		1296,95	1490,24				
Ravenstein 11-01-2001	13:30-15:00		1232,92	1271,2				
Ravenstein 11-01-2001	09:00-10:00		1062,23	1123,19				
Megen 16-01-2001	10:45-12:00	721,19	688,59	661,2	32,6	4,52	59,99	8,32
Megen 16-01-2001	13:00-14:00	697,27	670,69	646,45	26,58	3,81	50,82	7,29
					gem. verschil	6,95	gem. verschil	4,71

Tabel 2.3 Resultaten ADCP- en Ott-metingen te Venlo, Ravenstein en Megen (Rijkswaterstaat, 2001c)

Tabel 2.3 geeft de resultaten weer van controlemetingen voor de MSW-meetstations (MSW = Monitoring Systeem Water) in Venlo, Ravenstein en Megen. Zowel de ADCP en de Ott molen zijn daarvoor gebruikt. Uit de tabel is af te leiden dat de ADCP over het algemeen lagere afvoeren heeft gemeten dan de waarden die het MSW meetstation gaf bij dezelfde waterstand. De MSW-waarden zijn afgeleid van de akoestische debietmeter (ADM, zie § 2.2.3) in combinatie met de digitale niveaumeter (DNM) (1). Met de Ott-molen zijn nog lagere afvoeren gemeten dan met de ADCP. De meetverschillen van de Ott-molen met de MSW stand zijn in sommige gevallen vrij groot. De oorzaak ligt waarschijnlijk bij het niet meer actueel zijn van het gedigitaliseerde dwarsprofiel in de ADM software. Wanneer het werkelijke dwarsprofiel is veranderd door bodemverlaging e.d. dan geeft de MSW waarde een afwijking ten opzichte van de gemeten afvoer.

Uit een vergelijkende studie van Folkertsma (2001) waarbij ADCP-metingen, ADM-metingen en Ott-molen metingen zijn vergeleken, bleek dat de Q_{ADCP} gemiddeld 2,5% hoger was dan de Q_{Ott} (Barneveld, 2004). Dit bleek echter alleen voor de afvoeren tussen de 400 en 900 m^3/s zo te zijn. In Figuur 2.17 worden deze beweringen bevestigd als blijkt dat de ADCP voor het lage afvoerbereik in de QH-relatie hogere afvoeren meet, en bij het hogere afvoerbereik juist lagere afvoeren meet.



Figuur 2.17 ADCP metingen en QH-relatie Borgharen

Beoordeling NUSAP

Spreading: Omdat nog niet bewezen kan worden dat de ADCP meetgegevens genereert die dichter bij de werkelijke afvoer zitten dan de Ott-molen, zal voor de onzekerheidsanalyse de ADCP meting geen hogere score verdienen dan de Ott-molen. De toevallige fout van de ADCP is identiek met de Ott-molen, namelijk 5%. Ten aanzien van dit onderzoek wordt ook de waarde van 5% gehanteerd vanwege het ontbreken van gegevens van laboratoriumproeven met de ADCP.

Empirische kwaliteit: De dichtheid en controleerbaarheid van de metingen ligt hoger dan de Ott-molen maar evenals de Ott-molen moeten schattingen worden gedaan voor de gedeeltes nabij de oever, bodem en waterspiegel. Daardoor verdient de empirische kwaliteit niet de hoogste score. De waardering komt tussen de score 3 en 4 te liggen omdat sprake is van gecontroleerde experimenten in het veld. Overeenkomstige beschrijvingen in de Pedigree tabel zijn als volgt:

“gecontroleerde experimenten & groot aantal directe metingen”, score is 4. en
 “Historische/veldgegevens, ongecontroleerde experimenten, klein aantal directe metingen”, score is 3.
 De resulterende Pedigree score is 3,5.

Methodische kwaliteit: Het meten met de ADCP is in Nederland al langere tijd bekend bij metingen voor de kustwateren en de containerhaven in Rotterdam. In Duitsland wordt de methode langer toegepast waar jaarlijks meetcampagnes in Koblenz georganiseerd worden om onderlinge ervaringen met het buitenland uit te wisselen. Ook de meetdienst van RWS-Limburg deelt daaraan mee. Dit bevordert uiteraard de kennis over de ADCP-methode en draagt bij aan verbeterde inzichten omtrent het juist toepassen ervan. De kwaliteit van de methode verdient nog niet de maximale score omdat het gebruik nog niet op hetzelfde bewezen niveau ligt als de Ott-molen. Volgens de Pedigree tabel voldoet de volgende omschrijving: “betrouwbare methode, die bekend is binnen de discipline”, Pedigree score is 3.

2.2.3 Afvoermeting

Afvoeren kunnen ook direct bepaald worden met gebruikmaking van een enkele meetmethode.

1. De akoestische methode vanaf de oever met een Akoestische Debietmeter (ADM).
2. De verdunningsmethode: Door tracers (gekleurde vloeistof, zout of radioactief materiaal) in de stroming los te laten en verderop de concentratie te meten, kan met behulp van een continuïteitsvergelijking bepaald worden wat de afvoer van de rivier is. Het is ook mogelijk om de concentratie van de injectie bij het eindpunt van de meting in een grafiek uit te zetten waarmee met een integraalvergelijking (die de vorm van de grafiek beschrijft) de afvoer kan worden bepaald.

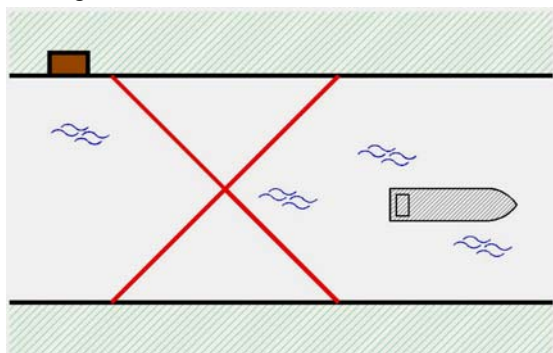
Tracers hebben een aantal nadelen, te weten:

- gevoeligheid voor chemicaliën in het water of zonlicht;
- absorptie tracers door begroeiing in winterbed en oevers;
- in open kanalen kunnen draaikolken het vermengingsproces belemmeren (door het vasthouden van de tracer);
- bij hoge afvoeren hoge concentraties benodigd;
- toxische samenstelling.

De verdunningsmethode is vanwege deze redenen nooit toegepast op de Maas. Voordat de ADM zijn intrede had gedaan, werden in Borgharen en St. Pieter geen directe afvoeren gemeten.

Akoestische Debietmeter (2000)

De ADM bevat in principe dezelfde werkende onderdelen als een ADCP zij het dat deze gemonteerd is aan de oever van de Maas en horizontale geconcentreerde geluidspulsen uitzend die over het dwarsprofiel van de Maas strijken. Deze worden in een meetkruis opgesteld zoals weergegeven in Figuur 2.18. Bij St. Pieter zijn twee meetkruizen geplaatst om de zekerheid rond de gemeten waarde te vergroten.

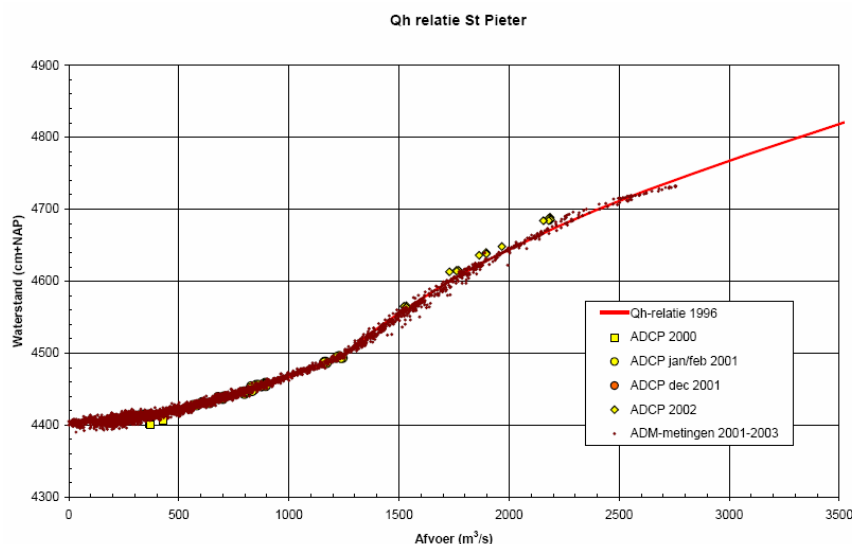


Figuur 2.18 Impressie van een akoestische afvoermeter locatie

Een ADM is een combinatie van een stroomsnelheidsmeter, een waterstandmeter en een rekenmodule. Met de ADM kan de stroomsnelheid gemeten worden door de snelheid van de retourgaande geluidsgolf te meten. De tijd die het nodig heeft een bepaalde afstand af te leggen onder een bepaalde hoek, zegt dan iets over de stroomsnelheid. Een ingebouwd softwareprogramma genereert van de gemeten snelheid een gemiddelde snelheid afgeleid van het geldende snelheidsprofiel op die locatie. Het snelheidsprofiel is uniek voor elke locatie en is bij St. Pieter bepaald met ADCP-metingen. Het bijbehorende oppervlak wordt bepaald

uit het dwarsprofiel (voor bepaling zie volgende paragraaf) dat gedigitaliseerd is in het rekenprogramma. Vervolgens wordt het debiet automatisch uitgerekend. Omdat bij deze methode alleen de stroomsnelheid op een vaste diepte gemeten wordt, kunnen geen betrouwbare metingen boven de 2.400 m³/s (47m+N.A.P) worden uitgevoerd. In Figuur 2.19 zijn de resultaten van de ADM metingen over de bestaande QH-relatie van St. Pieter uitgezet. De puntenwolk loopt gelijk op totdat er bij de extreem hoge afvoeren een overschatting van de afvoer wordt gegeven. De ADM resultaten zijn gebaseerd op een aangenomen verticaal snelheidsprofiel dus hoe groter de waterdiepte hoe meer

onzekerheden bij de aanname worden geïntroduceerd. Daardoor worden de nu geregistreerde 10-minuten afvoeren tot 2.400 m³/s permanent gemeten door de ADM bij St. Pieter en de waterstanden bij Borgharen beneden de stuw. Op de QH-relatie wordt overgegaan wanneer de waterstand hoger wordt dan 47m+NAP bij St. Pieter (Barneveld, 2004).



Figuur 2.19 ADCP- en ADM-metingen St. Pieter t.o.v. QH-relatie 1996 (Barneveld, 2004)

Beoordeling NUSAP

Spreiding: Aan de hand van Figuur 2.19 kan een inschatting worden gedaan van de spreiding bij hogere afvoeren. Het grootste gedeelte van de meetpunten ligt op enige afstand van de QH-curve. Enkele liggen maximaal 100 m³/s van de curve af maar hebben door het kleinere aantal minder gewicht dan diegene op de curve. Voor de spreiding wordt 50 m³/s aangehouden wat overeenkomt met 2,5%.

Empirische kwaliteit: Het grote voordeel van de ADM is dat deze net als de DNM continu metingen kan verrichten. Daardoor wordt een veelvoud aan meetgegevens over het gehele afvoerbereik verkregen. De enige reden waarom de ADM geen maximale score verdient is vanwege de ongecontroleerde toestand. De ADM houdt geen rekening met een tijdelijk veranderend dwarsprofiel tijdens bijvoorbeeld een zeer hoge afvoer. Het dwarsprofiel dat in de software verwerkt is, moet zo nu en dan worden geactualiseerd door de meetdienst van Rijkswaterstaat. De beoordeling volgens NUSAP omvat twee omschrijvingen: "gecontroleerde experimenten & groot aantal directe metingen", score is 4 en "Historische/veldgegevens, ongecontroleerde experimenten, klein aantal directe metingen", score is 3. De uiteindelijke Pedigree score komt uit op 3,5

Methodische kwaliteit: De ADM is vanaf midden jaren negentig op diverse plaatsen in Nederland in gebruik genomen (Rijkswaterstaat, 2003a). Bij de laatste controle voor de QH-relatie van Borgharen zijn ook ADM meetgegevens gebruikt. Daaruit valt af te leiden dat het instrument is geaccepteerd als betrouwbaar en nauwkeurig. De NUSAP beoordeling is: "betrouwbare methode, die bekend is binnen de discipline", Pedigree score is 3.

2.2.4 Bepaling dwarsprofiel

Om het dwarsprofiel van een rivier te bepalen is het nodig om de terreinhoogten op te meten en in kaart te brengen. Voor het zomerbed is dat de bodem van de Maas, voor het winterbed zijn dat de terreinhoogten van de uiterwaarden en eventuele overloopgebieden. Belangrijk aspect is het actueel houden van het in kaart gebrachte dwarsprofiel. Het dwarsprofiel ter plaatse van de metingen bij Borgharen en St. Pieter verandert in principe continu omdat we eenmaal te maken hebben met een natuurlijke omgeving, bijvoorbeeld door bodemerosie/sedimentatie, oevererosie en begroeiing. Niet-natuurlijke veranderingen ontstaan door aanleg van kades, kunstwerken en grindontgravingen (gepland vanaf 2007). De terreinhoogten van de uiterwaarden kunnen ook veranderen wanneer deze tijdens een hoogwater zijn overgelopen. Het met hoogwater meegevoerde sediment zal voor opslibbing zorgen. Bij St. Pieter speelt sedimentatie een kleinere rol vanwege het smalle dwarsprofiel en vrij grote verhang waardoor de stroomsnelheid te hoog is om grote hoeveelheden sediment achter te laten. Verder benedenstreams, waar de Maas meer ruimte krijgt om in de breedte af te voeren, zal door de lagere stroomsnelheid de meeste sedimentatie optreden.

De bedding van de Maas bij St. Pieter is vrij vast met een bodem bestaande uit mergel en grove grind. De kans dat grote zandgolffpatronen ontstaan tijdens hoge afvoeren is daardoor vrijwel uitgesloten. Op de Rijn bij Lobith bestaat de bodem uit veel fijner materiaal waardoor hier tijdens hoge afvoeren grootschalig sedimenttransport over de bodem plaatsvindt waarbij migrerende zandgolven ontstaan. Tijdens een hoogwatermeting kunnen dergelijke patronen ook het afvoergedrag beïnvloeden waardoor onzekerheden worden geïntroduceerd. (Ouwkerk, 2003). Bij de Maas in Zuid Limburg is de bodem niet zo dynamisch als de Rijn en heeft daardoor ook geen beduidende invloed tijdens hogere afvoeren. Voor de onzekerheidsbepaling ligt het accent meer op de kwaliteit en de actualiteit van de metingen zonder in te gaan op externe factoren. Voor de kwaliteit geldt nog wel een opmerking:

Het dwarsprofiel van het stroomvoerende gedeelte bij hoge afvoeren kan tot wel 1000 m² toenemen. Een gesimplificeerde rekensom kan wat meer inzicht verschaffen in de invloed van een bepaalde meetonzekerheid. Voor het gemak wordt uitgegaan van een rivierbreedte van 200 meter en een waterdiepte van 5 meter tijdens een hoge afvoer. Het meten *kan* lokaal niet goed uitgevoerd zijn waardoor op sommige plaatsen verkeerde terreinhoogten en waterdiepten zijn opgegeven. Een voorbeeld wordt gegeven: De aanname dat over het gehele dwarsprofiel alle metingen een overschatting hebben van 15 cm is vrij onwettelijk dus wordt aangenomen dat er op 30% 15 cm te laag is gemeten, op 10% goed is gemeten en op 60% 15 cm te hoog is gemeten. Dan blijft er 30% over wat neerkomt op een gemiddelde overschatting van 0,045 m. Op een breedte van 200 meter en waterdiepte van 5 meter geeft dit een oppervlakteoverschatting van 9 m² ten opzichte van de werkelijke (hier aangenomen) 1000 m², dat is nog geen 1%. Het geeft aan dat zelfs betrekkelijk grote meetfouten een bijna verwaarloosbaar effect hebben op de bepaling van het dwarsprofiel tijdens hoogwatersituaties. De meetonzekerheid van de instrumenten kan aanzienlijk zijn maar het gevolg voor de bepaling van de afvoer hoeft echter niet veelbetekenend te zijn. In 1965 is de meetlocatie Maastricht opgeheven en naar St. Pieter verplaatst en daarmee is het dwarsprofiel enigszins complexer geworden vanwege de meer natuurlijke omgeving.

Van geen van alle gemeten dwarsprofielen zijn de meetresultaten voor dit onderzoek geanalyseerd. Het zou zeer veel tijd kosten om van de geregistreerde dan wel grafische gegevens van de dwarsprofielen de afwijkingen te bepalen, als dat al mogelijk is. Mede doordat afwijkingen een kleine rol spelen in het eindresultaat (de te berekenen afvoer), zoals hiervoor is aangetoond, is het voor dit onderzoek niet relevant daar uitgebreid op in te gaan. De analyse beperkt zich tot het doen van een kwalitatieve beoordeling van de gebruikte instrumenten.

Peilstok en raaipalen (1911-1965)

De bij de hoogwatermetingen behorende dwarsprofielen zijn voor deze periode allemaal geldend voor de locatie Maastricht. Hier werden namelijk tot 1965 stokdrijvermetingen verricht. Het meten met de peilstok gebeurde vanaf de boot door deze in het water te laten zakken en de diepte op te meten. De op de kademuur aanwezige raaipalen dienden ter referentie. De peilstok is een probaat middel om de bodemligging te bepalen omdat het meten direct en eenvoudig uitgevoerd kan worden met een vrij hoge zekerheid. Om een inschatting te maken van de toevallige fout van de peilstok zal bedacht moeten worden hoeveel centimeters de peilstok wel of niet in de bodem wordt gedrukt. De vraag is wanneer je over bodemdiepte spreekt als de eerste 20 cm uit modder bestaat. Nu bestaat de Maasbodem in Zuid Limburg voornamelijk uit grind met weinig fijn sediment vanwege de relatief hoge stroomsnelheid. De zekerheid bij het peilen tot een vaste laag is daardoor hoog genoeg om vrij exact de ligging van de bodem vast te stellen. Er kan rekening worden gehouden met een onzekerheid van maximaal 5 cm, mede rekening houdend met de wat ongefixeerde ligging van het meetschip. Uit het rekenvoorbeeld is gebleken dat een dergelijke onnauwkeurigheid nauwelijks invloed heeft op de uiteindelijke afvoerbepaling.

Beoordeling NUSAP

Empirische kwaliteit: De metingen zijn gecontroleerde experimenten en hebben een redelijk aantal directe metingen. De omschrijving volgens NUSAP ligt tussen: “gecontroleerde experimenten & groot aantal directe metingen”, score is 4. en “Historische/veldgegevens, ongecontroleerde experimenten, klein aantal directe metingen”, score is 3. De resulterende Pedigree score is 3,5

Methodische kwaliteit: De methode met peilstok en raaipalen is zeer lang in gebruik gebleven. Omschrijving volgens NUSAP: “betrouwbare methode, die bekend is binnen de discipline”, Pedigree score is 3.

2.4.2 Peilstok en Theodoliet (1965-2000)

Ook voor deze periode is de peilstok gebruikt voor bepaling van de bodemligging, maar nu voor de locatie St. Pieter. De terreinhoogten zijn in kaart gebracht met de theodoliet. Een instrument dat sinds lange tijd wordt gebruikt voor landmeetkunde. De nauwkeurigheid van de theodoliet is hoog. De nieuwe locatie heeft er wel toe geleid dat er uitgebreidere veldmetingen verricht moeten worden vanwege de uiterwaard aan de Oostkant.

Beoordeling NUSAP

Empirische kwaliteit: De veldmetingen zijn gecontroleerde experimenten en hebben een redelijk aantal directe metingen. De omschrijving volgens NUSAP ligt tussen: “gecontroleerde experimenten & groot aantal directe metingen”, score is 4. en “Historische/veldgegevens, ongecontroleerde experimenten, klein aantal directe metingen”, score is 3. De resulterende Pedigree score is 3,5

Methodische kwaliteit: De peilstok die al sinds 1911 is gebruikt, kan worden beschouwd als een betrouwbaar instrument, mede omdat de ‘harde’ Maasbodem de meetnauwkeurigheid positief beïnvloedt. Ook de waterpas/theodoliet geeft nauwkeurige meetresultaten mits er professioneel mee wordt omgegaan. Dat buiten twijfel latend komt de beoordeling overeen met de volgende Pedigree tabel omschrijving: “betrouwbare methode, die bekend is binnen de discipline”, Pedigree score is 3.

2.4.3 Meetschip en GPS (2000)

Het meetschip dat nu wordt gebruikt voor bepaling van de bodemligging is uitgerust met een automatisch lodingsysteem. De gegevens worden meteen digitaal verwerkt. Doordat het loden nu volledig digitaal met ondersteuning van een Global Positioning System (GPS) wordt uitgevoerd, kan een hogere nauwkeurigheid worden bereikt. De meetonzekerheid is kleiner dan de handmatige meting met behulp van de peilstok. De theodoliet die gebruikt wordt voor de uiterwaarden is eveneens uitgerust met GPS voor exacte coördinaatvastlegging.

Beoordeling NUSAP

Empirische kwaliteit: Met het lodingsysteem op het meetschip worden de bodemcontouren volledig in kaart gebracht. Hiervan is de meetdichtheid ook zeer hoog. De veldmetingen gebeuren met behulp van GPS dus de meetnauwkeurigheid ligt hoog. Omschrijving volgens NUSAP: “gecontroleerde experimenten & groot aantal directe metingen”, Pedigree score is 4.

Methodische kwaliteit: Het automatisch lodingsysteem is weliswaar nog vrij recent in gebruik genomen maar biedt meer nauwkeurigheid. De Pedigree tabel geeft twee passende omschrijvingen: “goedgekeurde standaard in gevestigde discipline”, score is 4 en “betrouwbare methode, die bekend is binnen de discipline”, score is 3. De resulterende Pedigree score is 3,5.

2.5 Overzicht beoordeling onzekerheden

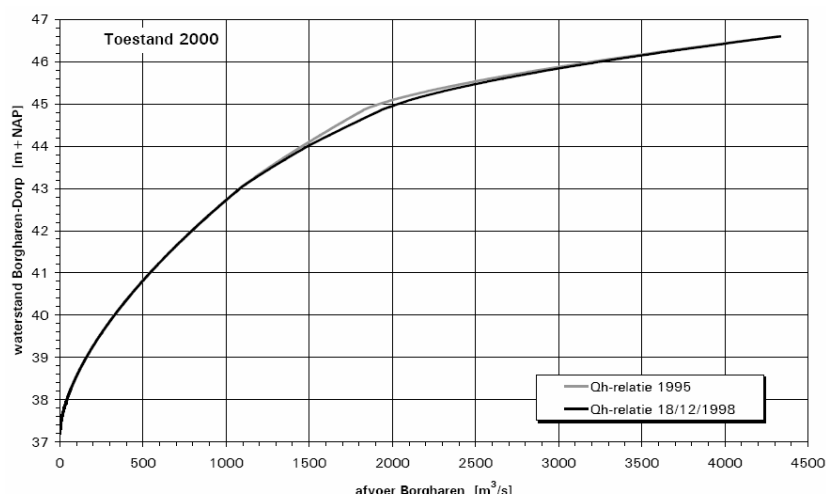
Gekwantificeerde en gekwalificeerde onzekerheden	1917-1956	1956-1965	1965-1975	1975-2000	2000-2006
Stroomsnelheid					
Spreiding	10%	5%	5%	5%	5%
Empirisch	2,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Methodisch	2	3,5	3,5	3,5	3
Debiet					(ADM)
Spreiding					2,5%
Empirisch					3,5
Methodisch					3
Dwarsprofiel					
Empirisch	3,5	3,5	3,5	3,5	4
Methodisch	3	3	3	3	3,5

Tabel 2.4 Overzicht beoordeling gekwantificeerde en gekwalificeerde onzekerheden van de meetinstrumenten

3. QH-relaties

3.1 Inleiding

Een QH-relatie bestaat uit een curve op een xy-assenstelsel waarmee door het aflezen van de waterstand direct de afvoer bepaald kan worden. In Figuur 3.1 is een QH-relatie weergegeven met op de y-as de waterstand in (m + NAP) en op de x-as de afvoer in (m³/s). Aan de hand van deze QH-relatie gemaakt in 1998 is bijvoorbeeld af te leiden dat bij een waterstand van 44 m + NAP, de afvoer 1.500 m³/s bedraagt. De reden voor het gebruik van deze relaties is voor de hand liggend. Er hoeft nu niet continu met meetapparatuur in de Maas worden gemeten om de afvoer te bepalen. Na eenmaal diverse metingen tijdens een hoge afvoergolf te hebben uitgevoerd, is het al mogelijk om een QH-relatie te construeren, mits er voldoende meetpunten verkregen zijn. De meetdata wordt vervolgens uitgezet op het xy-assenstelsel. Wanneer de curve tussen de punten kan worden getrokken, ontstaat een QH-relatie zoals gegeven in Figuur 3.1.



Figuur 3.1 Huidige QH-relatie Borgharen (1998) (Barneveld, 2004)

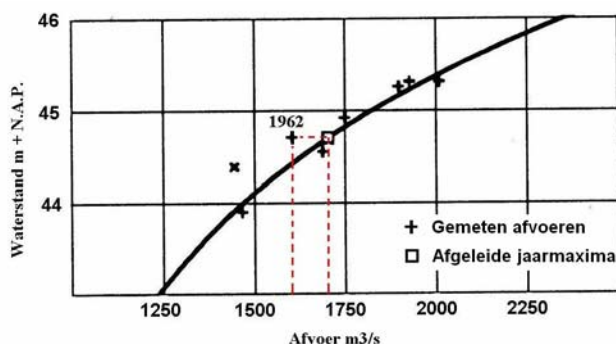
De doorwerking van de onzekerheden uit de eerste procestap 'Meting H en Q' kan nu worden toegelicht. De meetdata die gebruikt is voor het maken van de grafische voorstelling van de QH-relatie bevat de onzekerheden zoals bepaald in het vorige hoofdstuk. De onzekerheid in de meetdata wordt door de curve overgenomen omdat deze gebaseerd is op de metingen. Er kan gesproken worden van 'a priori' onzekerheid omdat deze aanwezig is voordat de QH-relatie gemaakt wordt. De bijkomende onzekerheden die tijdens het fabriceren van de QH-relatie op kunnen treden, komen in dit hoofdstuk aan de orde. In hoofdstuk 5 Net als in het vorige hoofdstuk worden de periodes onderscheiden om de analyse specifieker uit te kunnen voeren.

Voor de onzekerheidsanalyse is het van belang te weten in hoeverre de relatie een juiste waarde voor de afvoer geeft bij een gemeten waterstand. Deze is voor het grootste gedeelte afhankelijk van de kwaliteit, verifieerbaarheid en hoeveelheid van de metingen die er in gebruikt zijn. Het eerste aspect is in het vorige hoofdstuk al besproken. De nadruk ligt nu op de verificatie, het aantal meetpunten en de spreiding rond de gemaakte QH-curve.

Omdat dit onderzoek zich richt op de jaarmaxima wordt alleen het hogere afvoerbereik (>1.500 m³/s) van de QH-relatie beschouwd.

Tijdens bestudering van de QH-relaties rees de vraag of werkelijk alle jaarmaxima zijn bepaald uit gemeten waterstanden of uit afvoermetingen tijdens hoogwater. De QH-relatie zou in het tweede

geval niet voorkomen in de processtappen voor bepaling van de maatgevende afvoer, vandaar dat hier eerst helderheid moet over ontstaan. Volgens deelrapport 4 van het Boertien II onderzoek blijkt dat de historische reeksen van topafvoeren, die voor de frequentieanalyse gebruikt zijn, in beginsel zijn gebaseerd op afgeleide topafvoeren, daarmee doelend op de afleiding van de QH-relatie. Beschouwing van de QH-relatie met de daarbij behorende meetwaarden maakt duidelijk dat de jaarmaxima afgeleid zijn uit de gemeten waterstanden (Figuur 3.2).



Figuur 3.2 QH-relatie Borgharen 1958-1962

13-02-1962 00:00	778
14-02-1962 00:00	1652
15-02-1962 00:00	1452
16-02-1962 00:00	1152
17-02-1962 00:00	1267
18-02-1962 00:00	1322
19-02-1962 00:00	1125
20-02-1962 00:00	932

Tabel 3.1 Afvoeren bij Eijsden februari 1962

In Tabel 1 is een korte reeks met de hoogste dagafvoeren ofwel de hoogste afvoergolf van 1962 in Eijsden gegeven (11). Van Borgharen en St. Pieter blijkt dat de lijst met dagafvoeren op de online database pas vanaf het jaar 1974 beschikbaar is. Het jaarmaximum van de waterstand in Borgharen (44,78 m+NAP) blijkt volgens een andere online database (10) ook op 14 februari te zijn gemeten. Het meetpunt in Figuur 3.2 met daarboven '1962' is volgens het Boertien I rapport de enige afvoermeting van 1962 welke tijdens vrijwel dezelfde waterstand van 44,78 m+NAP is gemeten. Daardoor kan worden aangenomen dat deze op 14 februari is gemeten. De meetwaarde van $\approx 1.600 \text{ m}^3/\text{s}$ op de linker stippellijn is niet overgenomen in de lijst geregistreerde jaarmaxima van Borgharen. Het geregistreerde jaarmaximum van het hydrologische jaar 1961 is namelijk $1.705 \text{ m}^3/\text{s}$ dat overeenkomt met de rechter stippellijn in Figuur 3.2, de afgeleide afvoer uit de QH-relatie.

Dit bevestigt het feit dat de jaarmaxima niet afkomstig zijn van gemeten afvoeren maar afgeleid van de QH-relatie door gemeten topwaterstanden.

3.1.1 Veranderingen QH-relaties in de 20^e eeuw

QH-relaties moeten - om hun validiteit te behouden - periodiek worden geverifieerd vanwege het dynamische karakter van de rivierbodem veroorzaakt door natuurlijke processen en ingrepen in het stroomprofiel. Na een hoogwatersituatie kan vanwege het opgetreden extra sedimenttransport op de rivierbodem het dwarsprofiel veranderd zijn. Ingrepen boven- en benedenstrooms waarbij de geometrie van de rivier verandert, kunnen eveneens een doorwerking hebben op het sedimentatieproces van de bodem. Ook de uiterwaarden kunnen door sedimentafzetting enigszins van profiel veranderd zijn. Aangezien de waterstand voor afleiding in de QH-relatie ten opzichte van een vast punt (NAP) gemeten wordt, zal de relatie moeten worden aangepast als het dwarsprofiel verandert.

In de eerste helft van de 20^e eeuw hebben rivierwerken aan de Waalse Maas en de langdurige grindonttrekking gezorgd voor verandering in afvoerloop en waterstand. In de periode van 1935 tot 1955 is zelfs een bodemdaling opgetreden van 1,95m (zie Figuur 3.9). In de tweede helft van de 20^e eeuw zijn nog enkele grote rivieraanpassingen doorgevoerd. Deze hebben geleid tot waterstandverschillen tot enkele decimeters en hebben grote invloed gehad op de QH-relaties.

Binnen een bepaalde afstand hebben ingrepen benedenstrooms ook effect op de waterstand bovenstrooms, maar vanwege het relatief grote verhang van de Zuid Limburgse Maas en de daarmee gepaard gaande hogere stroomsnelheden is dat effect te verwaarlozen. Bovenstroomse ingrepen ten opzichte van Borgharen doen zich tegenwoordig nog zelden voor. Een overzicht van de belangrijkste veranderingen die invloed hebben gehad op de QH-relaties is weergegeven in bijlage 2.

3.1.2 Onzekerheden

De QH-relatie bestaat uit een vloeiende curve die zowel in het meetbereik bepaald wordt als daarbuiten. Dit laatste gebeurt door middel van extrapolatietechnieken of computermodellen. Niet alle meetpunten liggen precies op de lijn. De gemeten afvoeren liggen hoger of lager dan de afvoeren op de curve.

Verschillen tussen metingen en de QH-relatie kunnen ontstaan door 'fouten' in de metingen en 'fouten' in de QH-relatie:

1. Spreiding en onzekerheid in metingen Q en H. De toevallige fout en systematische fout in de meetdata veroorzaakt door het meetinstrument, de meetmethode of meetomstandigheden.
2. Vorm van de golf. Afhankelijk van de locatie en de hoeveelheid neerslag in de Belgische Ardennen zullen de zijrivieren het niet geborgen regenwater sneller of langzamer afvoeren naar de Maas. De tijdstippen waarop afvoertoppen van de zijrivieren uitkomen op de Maas, bepalen in grote mate de uiteindelijke vorm van de afvoergolf. Als het kort maar hevig regent in het stroomgebied, krijgt de golf een spitse vorm. De steilheid van het front van de golf staat in relatie met de voortplantingssnelheid van de golf. Dat heeft ook weer een (minimaal) effect op de stroomsnelheid. Niettemin kunnen kleine verschillen in stroomsnelheid tijdens hoge afvoeren grote verschillen in debiet veroorzaken. Hierdoor hebben niet alle topafvoeren een vergelijkbare topwaterstand. Op dit effect kan niet worden geanticipeerd als gebruik wordt gemaakt van een enkele QH-relatie.

Verder stijgt en daalt de waterstand bij een spitse golf erg snel waardoor de uiterwaarden maar kort voor aankomst van de golftop onder water komen te staan. De golf kan zich op dat moment over een breed rivierbed verspreiden en zakt een beetje in. De top van de golf wordt daardoor lager, ook wel 'topvervlakking' genoemd. Bij een stompe golf treedt bijna geen topvervlakking op omdat het water geleidelijk stijgt. Daardoor staan de uiterwaarden al geruime tijd onder water wanneer de top van de golf nog moet passeren (Rijkswaterstaat, 2006).

Dergelijke effecten hebben invloed op de stroomsnelheden tijdens het passeren van een hoogwatergolf. Voor preciezere afvoerbepaling zou de afhankelijkheid van de golfvorm moeten worden meegenomen door gebruikmaking van verschillende QH-relaties. Dit is tot op heden niet gebeurd waardoor bij enkele QH-relaties verschillende afvoermetingen bij gelijke waterstanden zichtbaar zijn. De QH-relatie heeft deze 'beperking' mee te nemen. De curve in de relatie is voor het grootste gedeelte een interpolatie van de gemeten en berekende afvoeren en tracht een voorstelling te geven van een gemiddelde afvoergolf.

3. Verschillen in snelheden bij gelijke waterstand als een hoogwatergolf passeert. De afvoer van een hoogwatergolf is over het algemeen hoger tijdens het toenemen van de waterstand dan tijdens de afname bij eenzelfde waterstand (Boiten, 1986). Dit wordt ook wel het hysteresis-effect genoemd.
- Voor Borgharen blijkt het hysteresis-effect een verwaarloosbare invloed te hebben vanwege het vrij grote bodemverhang. Het hysteresis-effect is uit te rekenen met de volgende formule (Jansen, 1994). Deze geeft het verschil tussen stijgende en vallende waterstanden.

$$Q - Q_s = \frac{Q_s}{2 \cdot i_b \cdot c} \frac{dh}{dt}$$

Q = debiet tijdens passage van de golf (m³/s)

Waarin: Q_s = debiet tijdens evenwichtssituatie (m³/s)

c = voortplantingsnelheid golf (m/s)

i_b = bodemverhang (-)

Invulling van de formule geeft aan dat het hysteresis-effect afneemt naarmate het bodemverhang i_b toeneemt. Voor de situatie Borgharen waar een bodemverhang zich voordoet van een halve meter per kilometer, resulteert dat in afvoerverschillen van hooguit enkele tientallen m³ per seconde. Dit komt weer overeen met waterstandverschillen van een paar centimeter. Het hysteresis-effect hoeft hierdoor niet worden meegenomen bij het bepalen van de afvoer-waterstandrelatie (Gerretsen, pers. comm. 2006).

4. Verjaring QH-relatie. Een QH-relatie wordt meestal voor enkele jaren gebruikt totdat er te veel verschil ontstaat tussen de gemeten waarden en de relatie. Kort voor het moment dat de QH-relatie gewijzigd wordt, zullen de geregistreeerde afvoeren de grootste verschillen vertonen. De actualiteit van de QH-relatie speelt daarom ook een rol voor de onzekerheidsbeoordeling.

Op grond van de door NUSAP ontwikkelde Pedigree Tabel wordt de onzekerheidsbeoordeling uitgevoerd voor de gekwantificeerde onzekerheid, gemarkeerd door de spreiding, en de gekwalificeerde onzekerheden, gemarkeerd door de empirische en methodische kwaliteit.

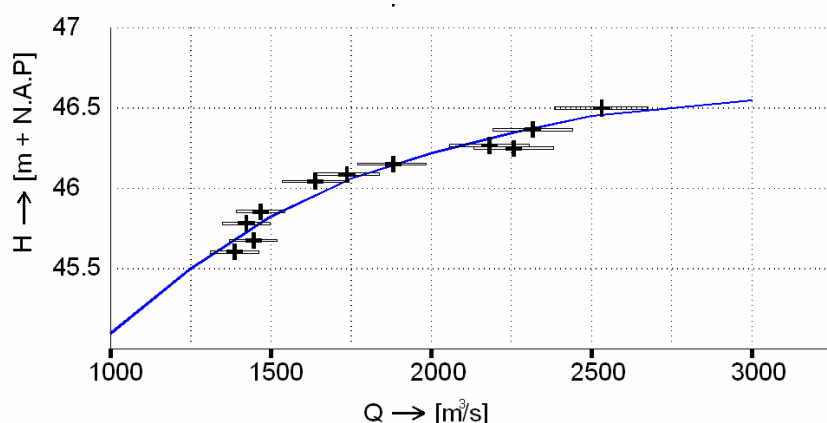
De spreiding wordt veroorzaakt door de onzekerheden van de meetinstrumenten (bepaald in hoofdstuk 2) en de spreiding van de meetpunten ten opzichte van de curve.

Van de QH-relaties die beschikbaar zijn gekomen voor dit onderzoek zijn van een beperkt aantal de afvoermetingen - waarop de relatie is gebaseerd - bekend. Waren alle metingen bekend en de daarbij behorende QH-curve, dan had voor elke QH-relatie een regressiecoëfficiënt uitgerekend kunnen worden welke in relatie staat met de onzekerheid. De originele QH-relaties die RWS-Limburg in de vorige eeuw heeft gemaakt zijn volgens een geïnterviewde ingenieur van RWS (Gerretsen, 2006) niet meer gearchiveerd. De QH-relaties van 1926 tot 1975 zijn afkomstig uit het rapport van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1993). De latere relaties komen uit het rapport van Barneveld (2004). Van de periode 1980 tot 1998 zijn geen relaties beschikbaar gekomen. Het gebrek aan de meetgegevens heeft een ongunstig effect op de beoordeling van de empirische kwaliteit. Voor een aantal perioden zijn vanwege de gebrekkige informatie aannames gedaan, gebaseerd op de laatste of daaropvolgende periode waarvan de grafieken samen met de meetpunten zijn afgebeeld.

Kwantificeerbare onzekerheden:

Spreiding door a priori onzekerheden

De spreiding van de parameters H en Q is in het vorige hoofdstuk al bepaald. In alle gevallen heeft de waterstandsmeting tijdens een hoogwatersituatie een onnauwkeurigheid die kleiner is dan 2%. De meetpunten die gebruikt zijn voor het fabriceren van de QH-relatie hebben daardoor maar een kleine onnauwkeurigheid op de y-coördinaat waterstand. In Figuur 3.3 gelijk aan de dikte van de horizontale lijn voor de toevallige fout van het meetpunt.



Figuur 3.3 Onzekerheidsmarges meetpunten met QH-relatie

De bij de waterstand behorende afvoer heeft een beduidend hogere spreiding. In de Figuur zijn de toevallige fouten van de afvoermetingen tot 1926 weergegeven, met een marge van ongeveer 10%.

Spreiding meetpunten ten opzichte van de curve

De spreiding van de metingen ten opzichte van de curve kan bepaald worden door de verschillen tussen de meetpunten en de curve af te lezen. Het gemiddelde verschil in het hoge afvoerbereik wordt uitgedrukt in een percentage.

Periode specifieke onzekerheden

Dit zijn onzekerheden die alleen in een bepaalde periode zijn voorgekomen en gekwantificeerd kunnen worden. Bijvoorbeeld voor de periode 1911-1932 waarin Belgische metingen een rol hebben gespeeld voor de Nederlandse afvoerbepaling. De verschillen tussen de Belgische en Nederlandse metingen zijn een bron van onzekerheid die is uit te drukken in een percentage. Voor een aantal perioden speelt bodemdaling ook een belangrijke rol.

Kwalificeerbare onzekerheden:

Empirische kwaliteit

De beoordeling wordt gedaan op basis van drie aspecten, weten:

1. dichtheid data;
2. meetomstandigheden;
3. verifieerbaarheid metingen.

Ad. 1 Van afvoeren die geregeld voorkomen zijn uiteraard meer meetgegevens voorhanden zodat de zekerheid rond die waarden hoger ligt. Van de opgetreden topafvoeren zijn maar weinig meetgegevens verkregen voor dit onderzoek waardoor de empirische kwaliteit van de hoogste afvoeren in de QH-relatie lager ligt. De dichtheid van de meetgegevens in het hoogste afvoerbereik in de QH-relatie bepalen de uiteindelijke NUSAP score. De Pedigree tabel maakt ook onderscheid in wel of geen directe metingen en de controleerbaarheid van de experimenten. Met deze twee aspecten hoeft bij de kwaliteitsbeoordeling van een regressie geen rekening te worden gehouden. De controleerbaarheid en (in)directe metingen zijn al in het vorige hoofdstuk geëvalueerd.

Ad. 2 De meetomstandigheden hebben betrekking op de locatie en de daarmee samenhangende uitvoerbaarheid van de metingen. In het vorige hoofdstuk is hier al op ingegaan door het onderscheid tussen de meetlocatie Maastricht en St. Pieter te beschrijven. De verwachting is dat van het meer natuurlijke dwarsprofiel in St. Pieter de meetdata meer spreiding zullen vertonen dan de meetdata afkomstig van metingen in Maastricht. Uit analyse van de meetpunten en de QH-relaties voor de periode 1960-1970 moet blijken of er daadwerkelijk verschillen zijn opgetreden.

Ad. 3 De verifieerbaarheid van de metingen is afhankelijk van het aantal hoge tot zeer hoge jaarmaxima die in een bepaalde periode zijn opgetreden. Met name voor het hoge afvoerbereik ($>2.000 \text{ m}^3/\text{s}$) in de QH-relatie is het van belang om veel meetgegevens te verkrijgen aangezien hier de grootste onzekerheden zitten. Wanneer kort na elkaar (tot 1 à 2 jaar) een aantal hoge hoogwaters zijn opgetreden, kunnen de meetgegevens elkaar enigszins aanvullen ter verificatie. Wanneer tijdens een periode maar één hoogwater is opgetreden, dan is het de vraag of de QH-relatie daarop wordt aangepast. Een groter aantal gegevens is meestal nodig ter bevestiging voor het wijzigen van de QH-relatie. Daardoor kan het afgeleide hoogste jaarmaximum op basis van de waterstand tijdens een dergelijke periode nogal afwijken van de resultaten van de afvoermeting. De QH-relaties uit een periode met maar een enkel extreem hoogwater krijgen een half punt aftrek voor de NUSAP beoordeling.

Methodische kwaliteit

De methodische kwaliteit betreft de volgende twee aspecten waarnaar een kwaliteitsbeoordeling wordt uitgevoerd.

1. werkwijze;
2. actualiteit QH-relatie.

Ad. 1 De werkwijze waarop de curve is aangepast aan de meetpunten en de wijze waarop de onbekende afvoeren - die buiten het meetbereik gevallen zijn - in de QH-relatie zijn bepaald. Over het geïnterpoleerde gedeelte van de QH-curve is de onzekerheid kleiner dan over het geëxtrapoleerde gedeelte. Bij een aantal QH-relaties is de curve 'doorgetrokken'. Beoordeling wordt alleen gedaan als van het geëxtrapoleerde gedeelte afvoeren zijn afgeleid.

Ad. 2 De actualiteit van de QH-relatie ofwel de periodieke aanpassing anticiperend op veranderingen van de rivier. Wanneer tijdens een periode met veel bodemdaling maar enkele QH-relaties zijn gebruikt, dan zijn de relaties niet actueel en kunnen voor een afwijkende afleiding zorgen.

3.1.3 Historische QH-relaties

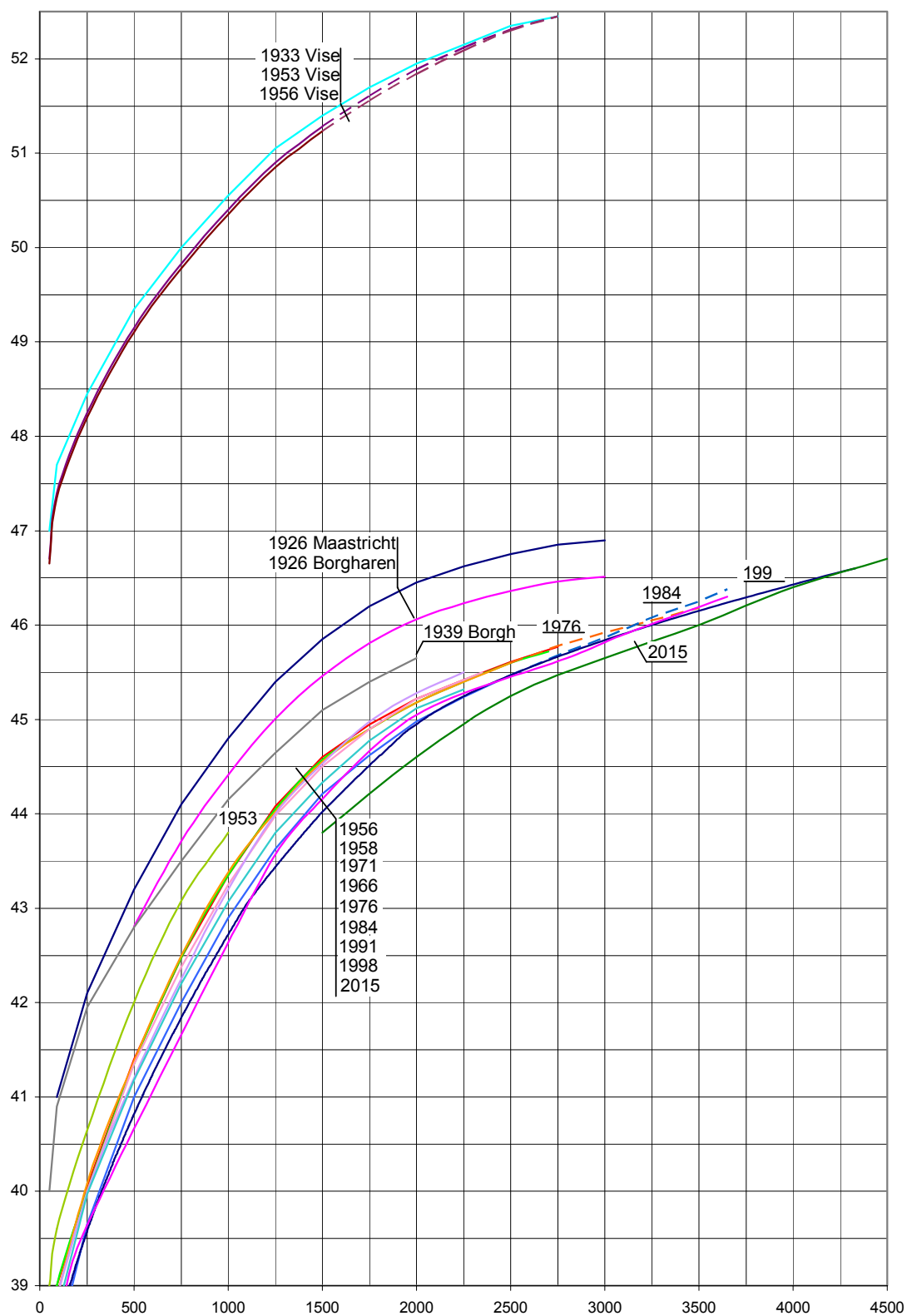
In de zes volgende paragrafen, overeenkomend met een aantal verschillende perioden, worden de QH-relaties geëvalueerd. De evaluatie geschiedt op basis van de rapporten voor de onderzoeken Boertien I (1993) en Boertien II (1994), en het later verschenen rapport van Barneveld (2004). De onderzoeken behorende bij de HR2001 en HR2006 hebben geen aandacht besteed aan de QH-relaties behalve voor de periode 1984-1987. Hier zijn achteraf wijzigingen doorgevoerd in de afgeleide afvoeren op basis van een nieuwe QH-relatie. Daarover meer in hoofdstuk 4.

Op de volgende pagina zijn alle historische en de meest recent gebruikte QH-relaties in één Figuur weergegeven om aan te geven in welke mate de QH-relaties aan veranderingen onderhevig zijn geweest. De relaties van Visé (laatste Belgische meetstation vóór de Nederlandse grens) zijn er aan toegevoegd omdat deze in de periode 1911-1932 gebruikt zijn voor afleiding van de Nederlandse afvoeren. De waterstanden zijn in de loop van de tijd gezakt maar de vorm van de curve is niet noemenswaardig veranderd. Daaruit kan worden afgeleid dat er geen ingrijpende veranderingen in het stroomprofiel bij Borgharen zijn geweest.

Vooraf in het hoogste afvoerbereik zijn de curven nauwelijks veranderd. Dat heeft drie oorzaken.

- Het zomerbed waarin de meeste (morfologische) veranderingen plaatsvinden tijdens hoge afvoeren heeft maar een klein aandeel ten opzichte van het winterbed.
- Voor hoge afvoeren is de waterstanddaling door daling van het zomerbed verkleind door capaciteitsvermindering van het winterbed. Dit is ontstaan door opslibbing van sediment, aanleg van kades, bebouwing en meer begroeiing.
- Het gebrek aan afvoermetingen voor extreem hoge afvoeren heeft belet dat de curve bijgesteld kon worden.

Vanwege het Grensmaasproject dat gepland is tussen 2006 en 2022 gaat de capaciteit ingrijpend veranderen. Door grootschalige uiterwaardontgraving op de nu nog kritieke plaatsen neemt de capaciteit beduidend toe. Tegenover meetstation Borgharen wordt de uiterwaard vanaf 2007 met $\pm 1,5$ m ontgraven. De verwachte QH-relatie voor het jaar 2015 laat zien dat deze ingrepen leiden tot een vergroting van ongeveer $250 \text{ m}^3/\text{s}$ van de afvoercapaciteit van de Maas bij Borgharen (Figuur 3.4).



Figuur 3.4 QH-relaties 1926 tot 2015.

(Ministerie van Verkeer en Waterstaat: onderzoek 'Toetsing uitgangspunten rivierdijkversterkingen:

Aanvullend rapport 1')

(Barneveld: 'QH-relaties Maas')

(Rijkswaterstaat : 'Controle Maas 2015'.)

3.2 Periode 1911-1932

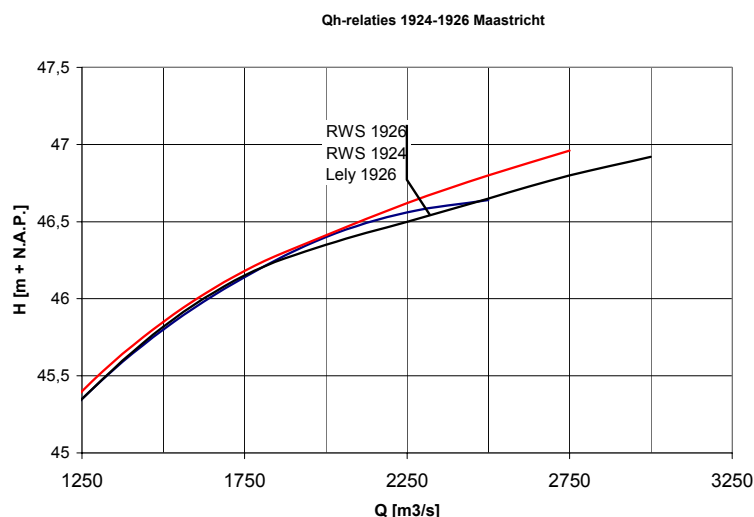
Inleiding

De jaarmaxima voor de periode 1911-1932 werden tijdens het Boertien I onderzoek nog afgeleid van de QH-relatie Borgharen-Visé opgesteld voor de periode 1933-1950 (zie §3.3). Voor het Boertien II onderzoek is een nieuwe QH-relatie voor de periode 1911-1932 opgesteld. Deze is sindsdien gebruikt voor de afgeleide jaarmaxima. De stokdrijvermetingen die in St. Pieter en Maastricht zijn uitgevoerd tussen 1917 en 1930 liggen aan deze nieuwe relatie ten grondslag. De analyse van de periode 1911-1932 gaat verder in op de afvoerkrommen opgesteld op basis van de metingen bij St. Pieter en Maastricht welke gebruikt zijn voor het Boertien II onderzoek.

Voor de periode 1924 t/m 1926 zijn op basis van de stokdrijvermetingen drie QH-relaties geconstrueerd waarvan de laatste uit 1926 is gemaakt door Lely. Voor afvoeren hoger dan $\pm 1.800 \text{ m}^3/\text{s}$ verschillen de relaties van Rijkswaterstaat aanzienlijk met die van Lely: Lely heeft hogere afvoeren bij dezelfde waterstanden aangehouden (Figuur 4.). Dit komt doordat de afvoer van Lely is samengesteld uit de afvoer in de Maas plus die over de Heugemse overlaat die een deel van de piekafvoer voor zijn rekening heeft genomen. Uit het onderlinge verschil is af te lezen dat de overlaat bij piekafvoeren ongeveer $250 \text{ m}^3/\text{s}$ moet hebben afgevoerd. De topafvoer van 1926 bestaat uit de afvoer van Maastricht ($2700 \text{ m}^3/\text{s}$) plus de afvoer van de Heugemse overlaat ($300 \text{ m}^3/\text{s}$). Beide afvoeren zijn afgeleid van de QH-relatie Maastricht voor het geëxtrapoleerde gedeelte, wat tevens blijkt uit een citaat van het Hoogwatersverslag, Rijkswaterstaat 1925/1926 (RWS, 1981):

“Te Maastricht is in de Maas een grootste afvoer gemeten op 31 December 1925 van $2508 \text{ m}^3/\text{s}$ bij een waterstand aan de hoofdsluis van $46.8 + m \text{ N.A.P.}$ De grootste gemeten afvoer van den Heugemischen overlaat bedraagt $260 \text{ m}^3/\text{s}$, welke hoeveelheid is gemeten op 2 Januari 1926 bij een waterstand aan de hoofdsluis van $45.85 m + \text{N.A.P.}$ Uit afvoerkrommen opgemaakt uit verschillende afvoermetingen voor de Maas bij km 14400 en van den Heugemischen overlaat in de doorlaatbrug in den weg Maastricht-Vaals, valt af te leiden, dat de hoogste afvoer van de Maas te Maastricht heeft bedragen op 1 januari 1926 bij een waterstand aan de hoofdsluis van $46,92 m + \text{N.A.P.}$ $2.700 \text{ m}^3/\text{s}$, en die van den Heugemischen overlaat $300 \text{ m}^3/\text{s}$, zoodat voor den grootste afvoer $3.000 \text{ m}^3/\text{s}$ kan worden aangenomen.”

In Figuur 3.7 is het meetpunt van $2.508 \text{ m}^3/\text{s}$ weergegeven waarna de QH-relatie is doorgetrokken.



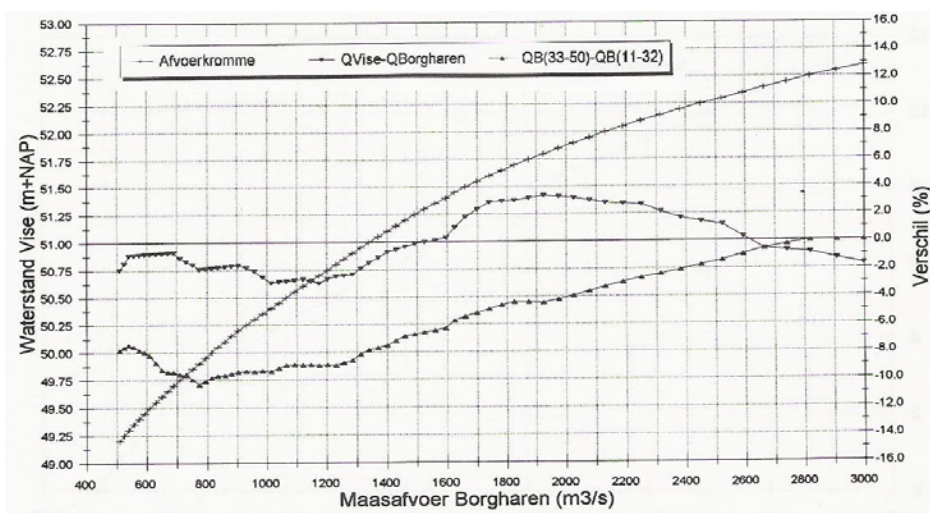
Figuur 3.5 QH relaties Maastricht 1924 en 1926 (RWS, 1993)

Analyse onzekerheden

Op de vraag in hoeverre de afvoer over de Heugemse overlaat nauwkeurig is bepaald, kan geen eenduidig antwoord gegeven worden omdat er geen informatie beschikbaar is over de gegevens waarop Lely zijn veronderstellingen heeft gebaseerd. Anderzijds is afvoerbepaling voor overlaten niet erg complex en kan met een enkele formule berekend worden.

In de Boertien I en II onderzoeken is hier verder geen aandacht aan besteed ondanks dat deze bepalend is voor de hoogte van enkele jaarmaxima. De onzekerheid over de grootte van de afvoercapaciteit van de Heugemse overlaat wordt vanwege het gebrek aan validatie in de Boertien I en II onderzoeken aangehouden op 10%. Dat is 10% voor afvoeren tussen 0 en 300 m³/s bij topafvoeren van de Maas hoger dan 1800 m³/s.

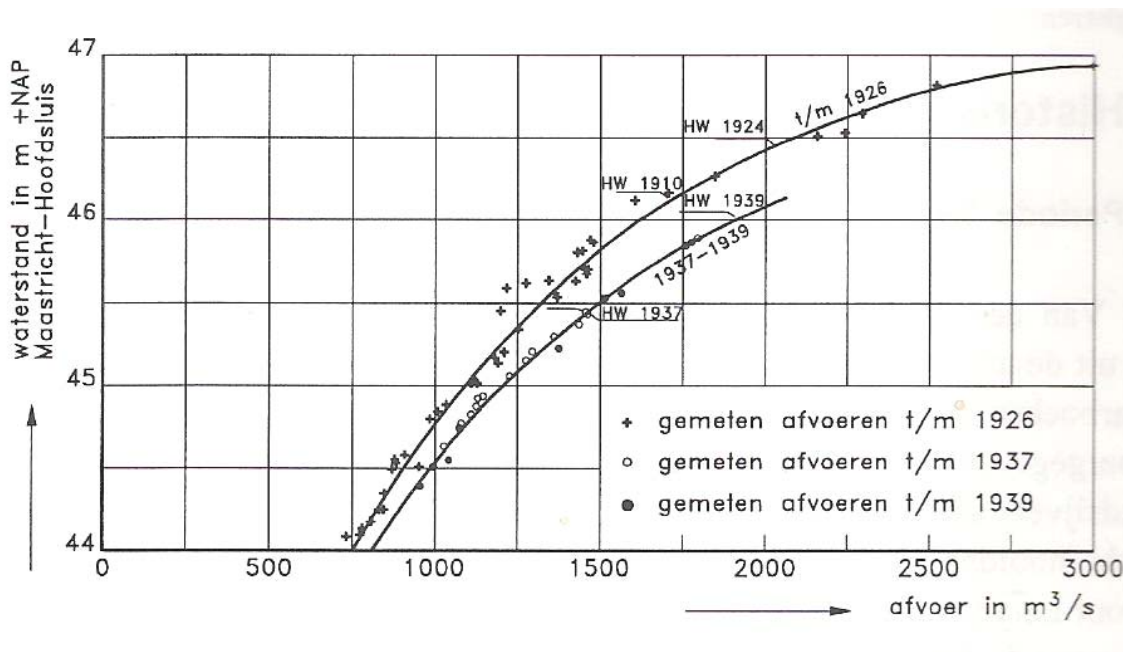
Tussen de Belgische en Nederlandse meetmethoden en interpretaties van waterstanden en afvoeren bestonden begin vorige eeuw grote verschillen. Volgens twee geïnterviewde onderzoekers (Gerretsen 2006, Torfs 2006) en resultaten uit Deelrapport 4 van het Boertien II onderzoek hadden Belgische en Nederlandse metingen tussen 1911 en 1932 verschillen van wel 100 tot 200 m³/s tijdens topafvoeren. De grensoverschrijdende betrekkingen waren niet zover ontwikkeld zodat geen overeenstemming in meetmethoden is ontstaan. België heeft een langere meethistorie dan Nederland maar dat zegt nog niet alles over de kwaliteit van de metingen. Over de kwaliteit van de verschillende resultaten tussen België en Nederland kan volgens de geïnterviewden geen uitsluitsel gegeven worden. De oplossing volgens het Boertien II onderzoek om hiermee om te gaan lijkt het meest voor de hand liggend. Kort gezegd betekent dat vertrouwen op de Belgische metingen met enige aanpassingen achteraf, gebaseerd op Nederlandse metingen. Vanwege de grote verschillen tussen de metingen moet ten aanzien van dit onderzoek een extra onzekerheid bij de geregistreerde jaarmaxima aangenomen worden. De onzekerheid is in principe gelijk aan het verschil tussen de grensoverschrijdende metingen. Verschillen van 100 tot 200 m³/s voor afvoeren tot 2.600 m³/s leiden tot een extra onzekerheid van ± 8%. Dat is beduidend meer dan de 3% zoals in het onderzoek van Boertien II is berekend, zoals weergegeven in Figuur 3.6 waar de middelste lijn het procentuele verschil tussen de Belgische en Nederlandse QH-relatie geeft. Opvallend is dat voor de extreme afvoeren juist meer



Figuur 3.6 QH-relatie Borgharen 1911-1932 (RWS, 1994)

conformiteit bestaat. In Figuur 3.6 staat de nieuwe QH-relatie voor 1911-1932 afgebeeld en het procentuele verschil met de eerder gebruikte relatie 1933-1950 (onderste lijn). De berekening is gebaseerd op de oude minus de nieuwe relatie. Het negatieve percentage maakt duidelijk dat de nieuwe QH-relatie hogere afvoeren geeft dan de eerder gebruikte relatie.

Van de periode 1910 tot en met 1939 zijn de gemeten afvoeren weergegeven in Figuur 6. Daartussen is de curve getrokken die met behulp van regressieanalyse is bepaald. Bij enkele waterstanden zijn grote verschillen in afvoer gemeten. Vooral bij 45,7 m + NAP zijn verschillen gemeten van wel 250 m³/s. Tegenwoordig kunnen dergelijke verschillen optreden door het stuwbeheer. De stuw Borgharen bestond nog niet en ook in België duurde het tot 1940 voordat de eerste stuw in Monsin gebouwd werd (Berger, 1992). De afvoerverschillen kunnen te maken hebben met de overgangssituatie van het overlopen van zomerbed naar winterbed. De meetpunten en de lijn vertonen verschillen van gemiddeld 75 m³/s. De onzekerheid voor het hogere afvoerbereik komt overeen met $\pm 4\%$.



Figuur 3.7 QH-relaties op basis van stokdrijvermetingen te Maastricht. (RWS, 1993)

Kwantificeerbare onzekerheden

Spreiding door a priori onzekerheden

- Waterstandsmeting. In deelverslag 1 'Meting H en Q' is de foutmarge van de peilschaal geschat op 3 centimeter. Tijdens hoogwatersituaties staat 3 cm waterstandsverschil gelijk aan hooguit 50 m³/s afvoerverschil. Dit komt overeen met 2% onzekerheid bij een extreme afvoer.
- Meting dwarsprofiel. Aangezien in Maastricht de meeste afvoermetingen zijn gedaan waar sprake is van een bijna vierkant dwarsprofiel, wordt geen extra marge onzekerheid toegevoegd. In hoofdstuk 1 paragraaf 2.4 is reeds toegelicht dat meetfouten van enkele centimeters een verwaarloosbaar effect hebben op de oppervlakte van het dwarsprofiel. Met name tijdens hoogwatersituaties in Maastricht.
- Meetapparatuur. De stokdrijver die destijds is gebruikt voor stroomsnelheidsmetingen heeft door zijn vele beperkingen een onzekerheid van rond de 10% (zie Hoofdstuk 2). De stokdrijvermetingen van Maastricht hebben weliswaar alleen gediend ter ondersteuning van het vervaardigen van een afgeleide $Q_{\text{visé}}-Q_{\text{Borgharen}}$ relatie, maar hebben juist voor de hogere afvoeren een groter aandeel vanwege de beperkt uitgevoerde Belgische hoogwatermetingen.

Spreiding meetpunten ten opzichte van de curve

- Afwijking metingen en QH-curve: 4%.

Spreiding door periode specifieke onzekerheden

- Afvoer over de Heugemse overlaat: De Heugemse overlaat trad in werking bij afvoeren hoger dan $1.800 \text{ m}^3/\text{s}$. De jaarmaxima van 1915, 1919, 1924 en 1925 (hydrologische jaren) zijn allen hoger dan deze afvoer en hebben onder invloed gestaan van de overlaat. De afvoer over de overlaat bevat een onzekerheid van 10%. Dit leidt voor de betreffende jaarmaxima gebaseerd op afvoer van Maastricht + Heugemse overlaat tot een extra onzekerheid. Vanwege de relatief kleine invloed van de overlaat in verhouding met de totale afvoer komt het extra onzekerheidspercentage te liggen op 1%.
- Verschillen in resultaten tussen Belgische en Nederlandse metingen. Deze onzekerheid kan voor afvoeren tot $2600 \text{ m}^3/\text{s}$, 8% hoog zijn.

Kwalificeerbare onzekerheden

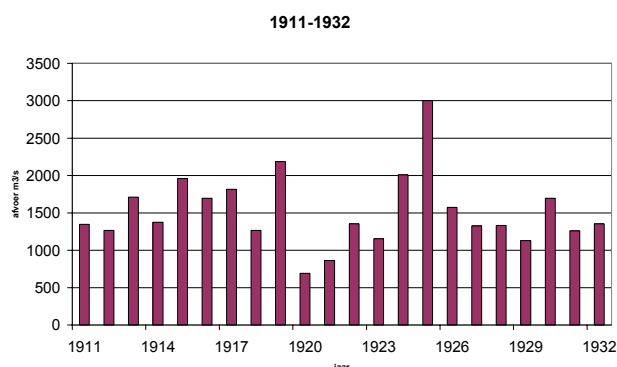
Empirische kwaliteit

Dichtheid data: Tot afvoeren van $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$ is de dichtheid van de meetpunten in de QH-relatie vrij hoog maar daarboven zijn maar negen metingen weergegeven. In de QH-relatie van 1926 zijn vier metingen boven de $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ gegeven terwijl er twee geregistreerde jaarmaxima zijn.

Analyse van de vorm van de afvoergolf van 1926 (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1993) wijst uit dat zes dagen lang een afvoer hoger dan $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ heeft opgetreden. Het is mogelijk dat meerdere metingen zijn uitgevoerd tijdens deze afvoergolf wat verklaart dat er meer meetpunten zijn dan jaarmaxima. Desondanks is de meetdichtheid voor het hogere afvoerbereik erg laag wat negatief uitpakt voor de empirische kwaliteit van de QH-relatie. De empirische kwaliteit komt qua Pedigree omschrijving overeen met: "met enige kennis gemaakte schattingen, heel indirecte benaderingen, vuistregel schatting", score is 3 en "Historische/veldgegevens, ongecontroleerde experimenten, klein aantal directe metingen, $n < 50$ ", score is 1 maar voldoet niet aan de omschrijving van de 2^e score (gemodelleerde gegevens, indirecte maten, handboek schattingen). De Pedigree score van de empirische kwaliteit komt vanwege de ligging tussen score 1 en 3, uit op 2..

Meetomstandigheden: Hoge afvoeren werden in de beginperiode verkregen door met stokdrijvers in Maastricht te meten. De locatie was vanwege het vrijwel vierkante dwarsprofiel gunstig voor het interpreteren van de meetdata. Hierdoor wordt een half punt bij de score van de datadichtheid opgeteld.

Verifieerbaarheid jaarmaxima: Als Figuur 3.8 wordt beschouwd, dan valt op dat er tussen de hoogst en laagst gemeten afvoer grote verschillen bestaan. De belangrijkste afvoer van deze periode, de extreme afvoer van 1926, heeft totaal geen verifieerbaarheid met eerder opgetreden jaarmaxima. Voor een deel hangt de beoordeling van de datadichtheid samen met de verifieerbaarheid van de afvoeren. Maar een hoge datadichtheid kan veroorzaakt zijn door meerdere metingen tijdens één afvoergolf. Zodoende blijft er een gebrek aan verificatie bestaan. Wanneer een paar jaar voor 1926 een extreme afvoer met een afwijkende golfvorm had opgetreden, dan had wellicht de QH-relatie een afwijkende vorm gekregen aangezien deze tussen de meetwaarden wordt getrokken. Vanwege het gebrek aan verificatie verdient deze periode een negatieve score van een punt. De empirische kwaliteit komt daardoor op een Pedigree score van 1,5.



Figuur 3.8 Jaarmaxima hydrologische jaren 1911-1932

Methodische kwaliteit

Werkwijze: De QH-relatie van de periode 1911-1932 bestaat uit een interpolatie van de meetgegevens tot $2.508 \text{ m}^3/\text{s}$, de hoogst gemeten afvoer tijdens het extreme hoogwater van 1926. De curve is na de gemeten afvoer van $2.508 \text{ m}^3/\text{s}$ doorgetrokken tot $3.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Het fabriceren van QH-relaties gebeurt tot op heden door de afvoermetingen op grafiekpapier te zetten en daar met de hand een relatie door trekken. Dat gebeurt vooral met rivierkundig inzicht (Barneveld, pers. comm. 2006). De methode voor het maken van QH-relatie is in 90 jaar ongewijzigd gebleven. De Pedigree tabel geeft de volgende omschrijving: "aanvaardbare methode, die bekend is binnen de discipline." De score is 3.

Actualiteit QH-relatie: Veranderingen in de geometrie van de rivier waarvan bodemdaling de belangrijkste component is, hebben in deze periode geen zichtbare invloed gehad op de waterstand. Bodemdaling trad pas op na 1940 (zie paragraaf 3.3). Er is in het onderzoeksrapport Boertien I tevens verondersteld dat de bodem in Visé - waar de waterstanden zijn gemeten - tot 1950 constant is. Met veranderingen in de geometrie van de rivier hoeft voor deze periode geen rekening te worden gehouden. Van de Borgharen-Visé QH-relaties die voor deze periode zijn gebruikt voor het afleiden van de topafvoeren kan worden aangenomen ze voldoende actueel zijn geweest. Het verminderen van de Pedigree score blijft daardoor overbodig.

3.3 Periode 1933-1950

Inleiding

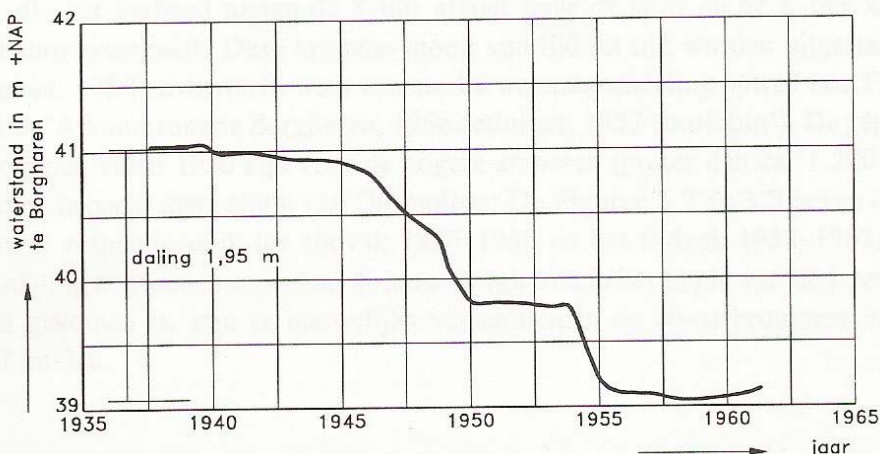
Voor deze periode is gebruik gemaakt van een QH-relatie die het verband weergeeft tussen de waterstand te Visé en de afvoer over de stuw te Borgharen. Vanwege de sterke bodemdaling bij Borgharen door grindbaggerwerken kon geen betrouwbare afvoer-waterstandsrelatie bepaald worden. In Visé is de bodem van de rivierbedding het meest constant gebleven zodat ter plaatse de waterstandsmetingen zijn uitgevoerd.

De afvoer te Borgharen werd voor situaties met gesloten stuw ($Q < 1.250 \text{ m}^3/\text{s}$) afgeleid van ijkgrafieken. Hogere afvoeren zijn met stokdrijvers in Maastricht gemeten. Van afvoergolven tussen 1924 en 1952 zijn de gemeten waterstanden van Visé, Borgharen en tussenliggende locaties in Tabel 3.2 weergegeven. Voor hoge afvoergolven blijkt het effect van bodemdaling lager te zijn dan voor lage afvoeren. Bij St. Pieter en Borgharen is de waterstand met ongeveer 40 tot 80 cm gedaald, terwijl de bodem in die periode met ongeveer 1,5 m is gedaald (Figuur 3.9). Het volume van het zomerbed is relatief klein ten opzichte van het volume van het winterbed vandaar dat het effect van bodemdaling in het zomerbed kleiner is voor hoge afvoergolven. Desalniettemin zijn de verschillen te groot om de waterstandsmetingen van Borgharen te gebruiken.

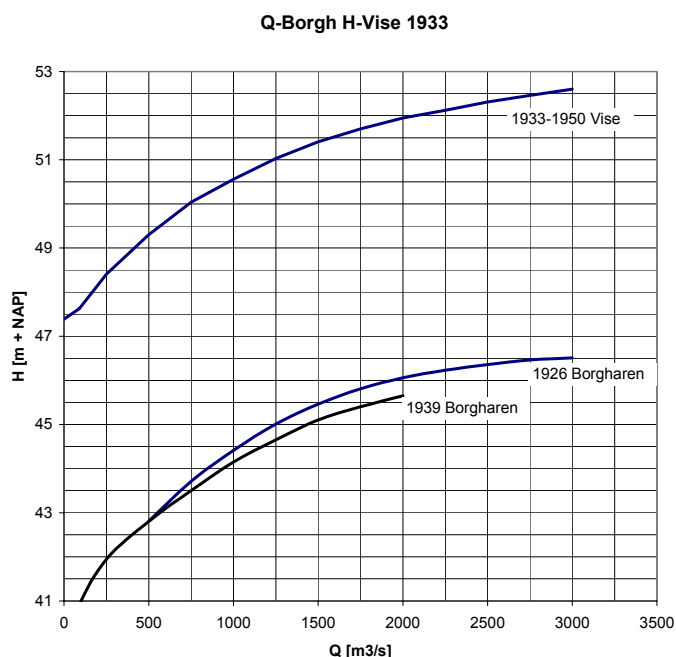
	Km raai	Waterstanden in m + NAP			
		4-11-1924	1-1-1926	29-11-1939	22-12-1952
Vise	0.400	51.85	52.60	52.00	52.00
Eijsden	4.475	-	50.74	50.06	49.64
St. Pieter	9.455	48.36	49.16	47.64	47.51
Maastricht	13.905	46.44	46.92	46.00	46.03
Borgharen	15.460	45.80	46.50	45.54	45.42
Debiet		1.930 m^3/s	3.000 m^3/s	1.987 m^3/s	2.000 à 2.020 m^3/s

Tabel 3.2 Waterstanden aan de hoofdpeilschalen gedurende de hoogwaterperioden in 1924, 1926, 1939 en 1952 (RWS, 1993)

Dat bodemdaling heeft opgetreden wordt duidelijk als de gefabriceerde - maar niet gebruikte - QH-relaties van Borgharen voor de perioden 1926 en 1939 met elkaar worden vergeleken. Deze zijn in Figuur 3.10 afgebeeld samen met de gebruikte QH-relatie van Visé. In de periode 1940-1955 is de bodem bij Borgharen met 1,95m gedaald. Figuur 3.9 uit het Boertien I onderzoek (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1993) geeft de daling van de waterstanden weer over het tijdvak 1935-1960 bij een afvoer van $100 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figuur 3.9 Verloop van waterstanden te Borgharen-beneden bij afvoer van $100 \text{ m}^3/\text{s}$ (RWS, 1993)



Figuur 3.10 QH relaties Borgharen en Visé (RWS, 1993)

Analyse onzekerheden

De methode die door Rijkswaterstaat is gehanteerd om het effect van bodemdaling geen invloed te laten hebben op de afvoerbepaling, is met de gefabriceerde QH-relatie van Visé veilig te noemen. Wanneer een QH-relatie met de waterstanden van Borgharen was gebruikt, dan had deze regelmatig bijgesteld moeten worden.

Ten opzichte van de vorige periode is nu geen gebruik meer gemaakt van verificatie van de afvoergegevens uit België. Alle hogere afvoeren in de afvoerkromme zijn gebaseerd op stokdrijvermetingen uitgevoerd bij St. Pieter en Maastricht. Uit het rapport 'overzicht afvoerbepaling te Borgharen c.q. Maastricht' van Van Leeuwen (1981) valt niet op te maken of de Heugemse overlaat nog een belangrijke rol heeft gespeeld bij de afvoerbepaling in deze periode. Uit het proefschrift van Berger (1992) blijkt dat het overstromingsgebied in 1932 achter de overlaat gedeeltelijk is afgedamd. De Heugemse overlaat is volledig afgesloten in 1973 (Tienjarig Overzicht 1971-1980, RWS) maar heeft tot die tijd nog wel gefunctioneerd. De afvoeren zijn gedurende de periode 1933-1950 niet hoger dan 2.000 m³/s waardoor de Heugemse overlaat waarschijnlijk niet in werking is getreden.

In de vorige periode is aangetoond dat grote verschillen tussen de Nederlandse stokdrijvermetingen en de Belgische Ott-molenmetingen op hebben kunnen treden. Het is aannemelijk dat dezelfde verschillen ook in deze periode aanwezig zijn. De beschikbare literatuur voor dit onderzoek kan daar geen onomstreden bewijzen voor leveren. Desondanks kan aangenomen worden dat verschillen tot 8% zijn blijven bestaan. De enige data die beschikbaar is gekomen over de metingen in de periode 1933-1950 zijn weergegeven in de afvoerkromme van 1939 zoals afgebeeld in Figuur 3.6. De curve is verder niet gebruikt maar geeft wel inzicht in de spreiding van de afvoermetingen die gebruikt zijn voor het maken van de QH-relatie van Borgharen-Visé. De hoogste gemeten afvoer deze periode was tijdens het hoogwater van 1939 (1.900 m³/s) waarvan maar één meetpunt gegeven is. Verder zijn nog drie metingen verricht tijdens de hoogwatergolf van 1937. Bestudering van de verschillen tussen de gemeten afvoeren en de curve geeft afvoerverschillen van gemiddeld 20 m³/s overeenkomend met een onzekerheidspercentage van ± 1%.

Kwantificeerbare onzekerheden

Spreiding door a priori onzekerheden

- Waterstandsmeting: In deelverslag 1 is de foutmarge van de peilschaal geschat op 3 centimeter. Tijdens hoogwatersituaties staat 3 centimeter waterstandsverschil tot maximaal 50 m³/s afvoerverskil. Dit komt overeen met 2% onzekerheid bij een extreme afvoer.
- Meting dwarsprofiel: Hier geldt hetzelfde als besproken voor de periode 1911-1932. Vanwege de verwaarloosbare invloed wordt deze niet meegenomen.
- Meetapparatuur: De stokdrijver heeft door zijn vele beperkingen een onzekerheid van rond de 10% (zie deelverslag 2).

Spreiding meetpunten ten opzichte van de curve

- Afwijking metingen en QH-curve: 1%.

Spreiding door periode specifieke onzekerheden

- Verschillen in resultaten tussen Belgische en Nederlandse metingen: 8%

Kwalificeerbare onzekerheden

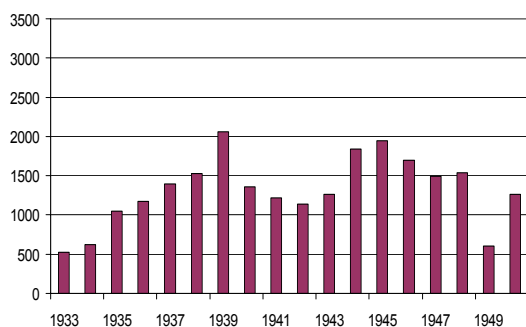
Empirische kwaliteit

Dichtheid data: De dichtheid van meetgegevens in het hogere afvoerbereik is niet erg groot. Voor de jaren 1940-1950, waarvan geen gegevens beschikbaar zijn gekomen, kan worden aangenomen dat er vergelijkbare resultaten zijn verkregen. De gegevens zijn indirect, want overgenomen van Visé en gemodelleerd vanwege de vertaling naar de toestand bij Borgharen. De overeenkomstige beoordeling volgens NUSAP is: "gemodelleerde gegevens, indirecte maten, handboek schattingen.", score is 2.

Meetomstandigheden: Van het meetstation Visé is praktisch niets bekend. Daardoor kan geen duidelijke uitspraak gedaan worden over de kwaliteit van de waterstandmetingen die daar zijn uitgevoerd. Er kan worden aangenomen dat in Visé peilschalen zijn gebruikt voor waterstandsmetingen zoals ook in Nederland deze periode zijn gebruikt. Waterstandsmetingen met behulp van peilschalen ondervinden over het algemeen weinig invloed van de omgeving vanwege de eenvoud die ermee gepaard gaat. Er wordt vanwege deze omstandigheid een neutrale waardering ofwel '0' aan de empirische kwaliteit toegevoegd.

De afvoermetingen werden net als de vorige periode in Maastricht uitgevoerd. De gunstige meetlocatie zorgt voor bijtelling van een half punt bij de score voor de empirische kwaliteit.

Verifieerbaarheid jaarmaxima: In deze periode is de hoogste afvoer opgetreden in 1939 met in 1944, 1945, 1946 vergelijkbare afvoeren. Over de laatste drie bestaat daardoor een redelijk goede verifieerbaarheid. De afvoer van ongeveer 2.000 m³/s in 1939 trad op na een periode van 13 jaren waarvan de hoogste afvoer 1.500 m³/s was en het gemiddelde op 1.100 m³/s. Vanwege de matige verifieerbaarheid van de topafvoer uit deze periode wordt een half punt in mindering gebracht op de score voor de empirische kwaliteit.



Figuur 3.11 Jaarmaxima hydrologische jaren 1933-1950

Methodekwaliteit

Werkwijze: Het gebruik van de waterstanden bij Visé en de daaraan gerelateerde afvoeren bij Borgharen is voor deze periode een goede keus geweest, omdat de waterstandsmetingen bij Borgharen onder invloed hebben gestaan van bodemdaling. Was uitgegaan van waterstandsmetingen bij Borgharen dan had de QH-relatie na 1945 ongetwijfeld zeer regelmatig gewijzigd moeten worden. In de periode hierna is wel gekozen voor waterstandsmetingen bij Borgharen, wat achteraf gezien een niet zo gelukkige beslissing was getuige de lange lijst van gebruikte afvoerkrommen (zie Tabel 3.3). De toegepaste methode wordt als zijnde adequaat beoordeeld. De werkwijze zoals is aangenomen door Rijkswaterstaat om te kiezen voor de samengestelde QH-relatie Borgharen- Visé verdient volgens de Pedigree tabel een score van 2,5. De methode lijkt betrouwbaar maar is niet bekend binnen de discipline. Vandaar de ligging tussen de omschrijvingen: "betrouwbare methode, die bekend is binnen de discipline." en "aanvaardbare methode, maar beperkte consensus op betrouwbaarheid."

Actualiteit QH-relatie: Het is niet bekend hoeveel QH-relaties er in Visé voor de periode 1933-1950 zijn gebruikt. Aanpassing is natuurlijk pas gewenst wanneer merkbare verschillen ontstaan vanwege een veranderend dwarsprofiel. Volgens het rapport van het Boertien I onderzoek was van bodemdaling in Visé geen sprake. Over de uiterwaarden in Visé is verder niet gesproken, ondanks dat deze tijdens hogere afvoeren een primaire rol spelen ten opzichte van het zomerbed. Vanwege het ontbreken van een analyse van het winterbed in Visé bestaat geen zekerheid over de aanname dat de uiterwaarden een ondergeschikte rol hebben gespeeld. Vanwege deze onzekerheid blijft de score van 2,5 gehandhaafd.

3.4 Periode 1951-1970

Inleiding

In 1950 is de bodemdaling bij Borgharen tot stilstand gekomen maar is bij Visé juist in gang gezet. Tot 1953 is nog gebruik gemaakt van de relatie van Borgharen-Visé maar sindsdien is overgestapt op een QH-relatie voor Borgharen. In 1954 bleek de bodemdaling beneden de stuw van Borgharen opnieuw in gang zijn gezet maar was van korte duur aangezien de bodem na 1956 weer gestabiliseerd is. In Figuur 9 is zichtbaar dat er behoorlijke bodemdaling is opgetreden tussen 1953 en 1956 maar ná 1956 vrijwel gelijk is gebleven. Desondanks leidde het onherroepelijk tot het regelmatig moeten vernieuwen van de QH-relatie. Tabel 3.3 geeft een overzicht van de QH-relaties die gebruikt zijn tussen 1950 en 1970. In de periode 1951-1960 zijn in totaal zestien QH-relaties gebruikt terwijl in de periode 1961-1970 drie QH-relaties zijn gebruikt (Tienjarig Overzicht 1961-1970).

Voor de QH-relatie Borgharen is gedeeltelijk gebruik gemaakt van de berekende afvoer over de stuw en de gemeten afvoeren bij Maastricht voor respectievelijk de afvoeren onder en boven $\pm 1.200 \text{ m}^3/\text{s}$. De afvoeren zijn vervolgens vertaald naar de waterstanden beneden de stuw Borgharen. Na 1956 is overgestapt van de stokdrijver naar de Ott-molen voor de stroomsnelheidsmetingen. Dat heeft een

duidelijke verbetering teweeggebracht in de betrouwbaarheid van de meetresultaten en uiteindelijk voor de onzekerheidsbeoordeling.

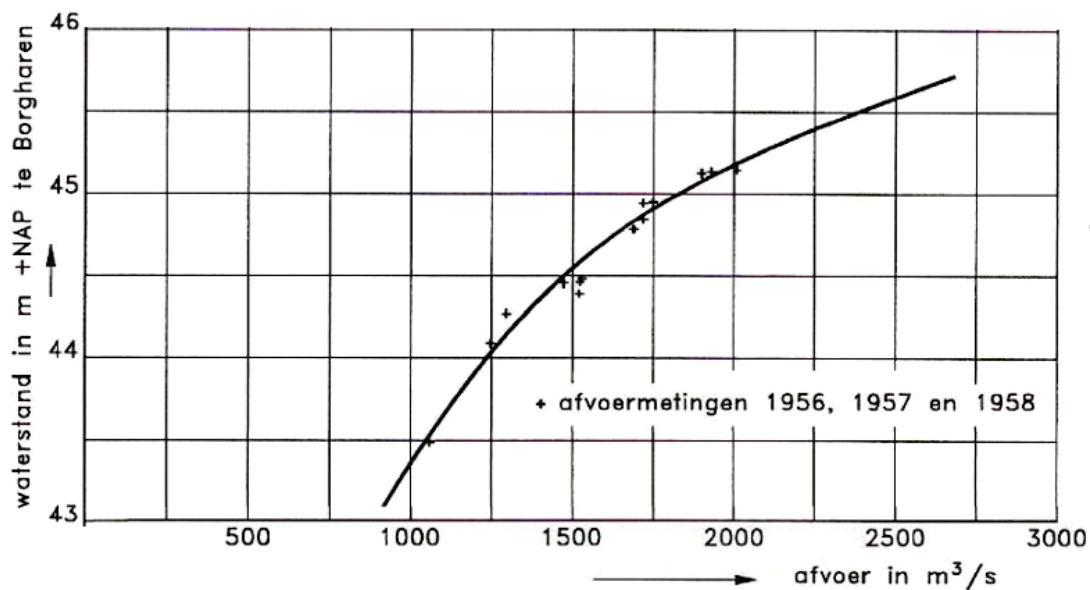
Analyse onzekerheden

Voor deze periode zijn de meetpunten weergegeven in Figuur 3.12. Er is tevens geëxtrapoleerd voor de hogere afvoeren tussen de 2000 m³/s en 2700 m³/s maar daarvan is verder geen gebruik gemaakt aangezien de jaarmaxima niet hoger zijn dan ± 2000 m³/s.

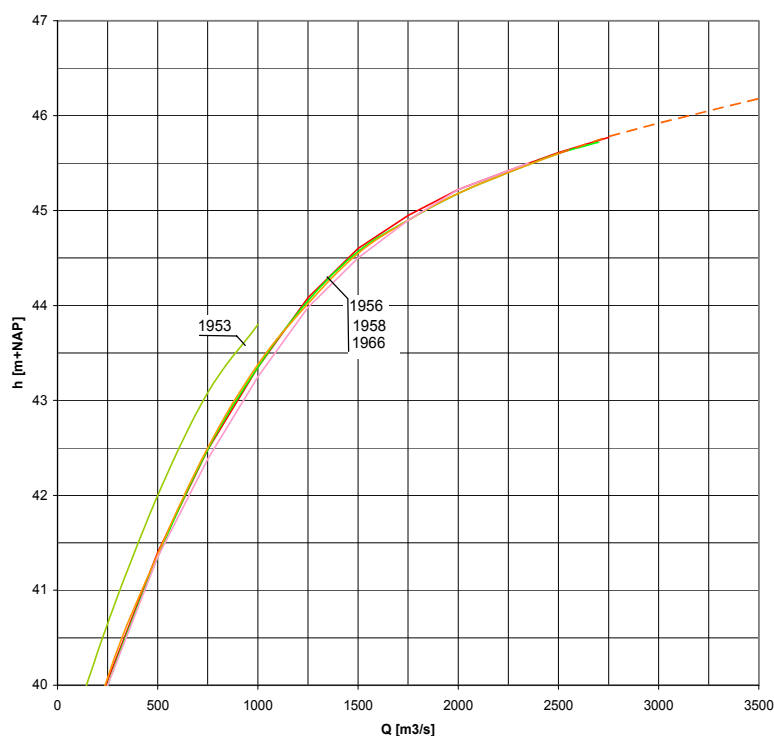
De meetpunten verkregen met Ott-molenmetingen vertonen kleine afwijkingen van de curve. Deze periode heeft geen uitschieters in hoge afvoeren gekend en de zeven hoogste jaarmaxima zijn bijna allen gelijk. Dit verhoogt de verifieerbaarheid van deze afvoeren waardoor de empirische kwaliteit verbeterd is ten opzichte van de voorgaande periode. Sinds het meten met de Ott-molen is de spreiding van de meetdata rond de curve niet per definitie kleiner geworden. Waarschijnlijk is de invloed van de golfvorm (verschillende afvoeren bij gelijke waterstanden) groter dan het verschil in onnauwkeurigheid tussen de stokdrijver en de Ott-molen.

De spreiding van de meetdata rond de curve is zeer waarschijnlijk verder te reduceren door gebruikmaking van specifieke golfvorm-afhankelijke QH-relaties. De spreiding rond het meetpunt van een Ott-molen meting is daarentegen wel kleiner geworden. De stokdrijver heeft een toevallige fout van 10%, de Ott-molen heeft een toevallige fout 5%.

De piekafvoeren boven de 1500 m³/s liggen hooguit 20 à 30 m³/s verwijderd van de curve, gelijk aan een onzekerheid van ± 2%



Figuur 3.12 QH relatie 1958 op basis van Ott-molenmetingen (RWS, 1993)



Figuur 3.13 QH relaties 1953 t/m 1966 (RWS, 1993)

1953
Sept 1954
Okt 1954
Nov 1954
Dec 1954
Jan 1955
Jan/mei 1955
Apr/juli 1955
Jun/sept 1955
Nov/dec 1955
1956
Apr 1958
1958
Mei/juni 1959
Juli/sept 1959
Okt 1959
Juni 1961
1965
1966
1971

Tabel 3.3 Overzicht gebruikte QH-relaties Borgharen-beneden 1953 t/m 1971 (RWS, 1981).

In 1954 en 1955 zijn maar liefst negen QH-relaties geproduceerd om de bodemdaling bij te houden. Vanwege het hoge aantal mag verondersteld worden dat het effect van bodemdaling op de waterstanden voldoende meegenomen is in de QH-relaties. Zonder deze tijdelijke aanpassingen hadden aanzienlijke fouten in de jaarmaxima opgetreden.

De meetlocatie voor hoge afvoeren in de binnenstad van Maastricht is in 1965 opgeheven waarna is overgestapt op het meten bij St. Pieter. In de inleiding van dit hoofdstuk is gesuggereerd dat de meetlocatie Maastricht een beter interpreteerbaar stroomgedrag heeft dan St. Pieter. Dat zou zich vervolgens kunnen uiten in meer spreiding van de meetdata voor de perioden na 1965. Er zijn van de periode kort na 1965 helaas geen meetgegevens ter beschikking gekomen waardoor geen goed vergelijk mogelijk is. Wat opvalt is dat de QH-relaties nauwelijks veranderd zijn voor het hoogste afvoerbereik. De grote gelijkens tussen de QH-relatie van 1958 en 1966 maakt duidelijk dat de gewijzigde meetlocatie niet per sé heeft geleid tot verschillende resultaten van afvoermetingen.

Kwantificeerbare onzekerheden

Spreiding door a priori onzekerheden

- Waterstandsmeting. In deelverslag 1 is de foutmarge van de peilschaal geschat op 3 centimeter. Tijdens hoogwatersituaties staat 3 centimeter waterstandsverschil tot maximaal 50 m³/s afvoerverschil. Dit komt overeen met 2% onzekerheid bij een extreme afvoer.
- Meting dwarsprofiel. Er is uit voorgaande analyse niet gebleken dat vanwege het non-uniforme dwarsprofiel bij St. Pieter rekening moet worden gehouden met een extra onzekerheid.

- Meetapparatuur. De Ott-molen die gedurende deze periode voor 75% van de tijd is gebruikt heeft een onzekerheid van rond de 5% (zie deelverslag 2). Tengevolge van de stokdrijver die de eerste vijf jaren nog is gebruikt wordt 2% onzekerheid toegevoegd, wat het totaal brengt op 7%.

Spreiding meetpunten ten opzichte van de curve

- Afwijking metingen en QH-curve: 2%.

Spreiding door periode specifieke onzekerheden

- Bodemdaling: Is goed bijgehouden dus wordt niet meegenomen als zijnde een extra onzekerheid.

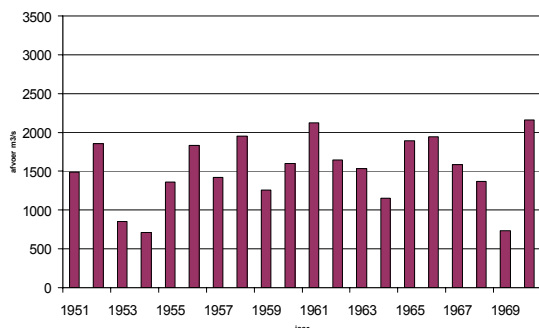
Kwalificeerbare onzekerheden

Empirische kwaliteit

Dichtheid data: De dichtheid van de meetpunten in het hoge afvoerbereik is gemiddeld. Niet alle jaarmaxima zijn afgebeeld omdat alleen de afvoeren tot 1958 zijn weergegeven. In het Boertien I rapport is nog een QH-relatie van 1966 weergegeven zonder meetpunten, met daarbij de vermelding dat deze gebaseerd is op een afvoermeting van 1965. In het RWS rapport (Leeuwen, 1981) is deze relatie ook afgebeeld waarop vrij onduidelijk een aantal punten zijn weergegeven rond de 2.200 m³/s precies op de lijn. Dit lijkt echter onwaarschijnlijk als blijkt dat het geregistreerde jaarmaximum van 1965 op 1.892 m³/s ligt. Uit de literatuur wordt opgemaakt dat na 1958 nauwelijks meetgegevens beschikbaar zijn gekomen voor het vaststellen van de QH-relatie. De empirische kwaliteit voor de periode 1951-1958 komt overeen met de twee omschrijvingen in de Pedigree tabel: "Historische/veldgegevens, ongecontroleerde experimenten, klein aantal directe metingen.", score is 3 en "gemodelleerde gegevens, indirecte maten, handboek schattingen.", score is 2. Voor de periode 1959-1970 is de empirische kwaliteit te omschrijven als: "met enige kennis gemaakte schattingen, heel indirecte benaderingen, vuistregel schatting", score is 1. De uiteindelijke score is $(3+2+1)/3 = 2$

Meetomstandigheden: De overstap naar meetlocatie St. Pieter heeft na analyse van de QH-relaties niet geleid tot negatieve effecten op de uitvoering van de metingen. De zo gunstige omstandigheden zoals in Maastricht worden in St. Pieter echter niet gerealiseerd. Er wordt om deze reden geen extra score toegekend.

Verifieerbaarheid jaarmaxima: Van de jaarmaxima deze periode ligt 60% tussen de 1.500 en 2.000 m³/s. Daardoor is een ruime hoeveelheid aan vergelijkbare afvoeren opgetreden ten gunste van de afleiding van de QH-relatie. Maar vanwege het beperkt aantal meetgegevens ter controle van de QH-relatie is er geen aanleiding om hiervoor een scoreverhoging in te calculeren.



Figuur 3.14 Jaarmaxima hydrologische jaren 1951-1970

Methodische kwaliteit

Werkwijze: Bestudering van de QH-relatie met de afvoermetingen van 1956, 1957 en 1958 geeft aan dat alle opgetreden jaarmaxima zijn gemeten. De overige jaarmaxima in de periode 1950-1970 zijn niet of nauwelijks hoger. De QH-relatie heeft een geëxtrapoleerd gedeelte voor de afvoeren boven de 2.000 m³/s maar hiervan zijn geen afvoeren afgeleid. De methode van het extrapoleren hoeft daarom niet te worden beoordeeld. Het geïnterpoleerde gedeelte van de QH-relatie op het bereik van de meetpunten ziet er voor de periode 1956-1958 aannemelijk uit mede omdat de meetpunten weinig spreiding vertonen. De methode wordt volgens de Pedigree tabel omschreven als “betrouwbare methode, die bekend is binnen de discipline.”, score is 3

Actualiteit QH-relatie: De actualiteit van de relaties is voor deze periode kritisch in verband met het dalen van de bodem. Rijkswaterstaat heeft door het geregeld uitvoeren van metingen geconstateerd dat regelmatige vernieuwing van de QH-relaties noodzakelijk was tengevolge van bodemdaling. Het grote aantal gebruikte QH-relaties deze periode maakt duidelijk dat er serieus is omgesprongen met het nauwkeurig afleiden van de afvoeren. Overigens is alleen gedurende de periode 1950-1956 bodemdaling opgetreden. Na 1956 is de bodem vrijwel gelijk gebleven (Figuur 3.9). Hierdoor wordt besloten om de actualiteit niet van invloed te laten zijn op de methodische kwaliteit.

3.5 Periode 1971 -1987

Inleiding

In de periode van 1971 tot 1987 zijn als gevolg van kleinschalige grindonttrekkingen, waterstandsdingen van enkele decimeters bij eenzelfde afvoer opgetreden in de Maas. Citerend uit het naslagwerk ‘Tienjarig Overzicht 1971-1980’ is de bodem tussen 1973 en 1984 geleidelijk gedaald met ongeveer een halve meter. Overige kenmerkende gebeurtenissen deze periode zijn de inwerkingtreding van de peilschrijver in 1975 en de hoge zomerafvoer van 1980. Deze afvoer werd in eerste instantie ruimschoots boven de werkelijke waarde afgeleid omdat de begroeide uiterwaarden voor meer opstuwing zorgde waardoor een hogere waterstand optrad dan bij een vergelijkbare winterafvoer. Hieruit blijkt wel dat het omgaan met een enkele QH-relatie voor verkeerde inschattingen kan zorgen. De hogere waterstand resulteerde in een afvoeroverschatting van ongeveer 500 m³/s. De afvoer is later door Rijkswaterstaat gehomogeniseerd naar de wintersituatie.

Analyse Onzekerheden

Van deze periode zijn maar enkele meetgegevens beschikbaar gekomen die gezamenlijk met de QH-relaties zijn weergegeven. De dichtheid van de metingen wordt daarom overgenomen van de vorige periode. In de periode 1971-1980 zijn zes QH-relaties gebruikt, zoals weergegeven in Tabel 3.4. Voor dit onderzoek zijn alleen de relaties van 1971, 1976 en 1984 beschikbaar gekomen uit het aanvullend rapport 1 van het Boertien I onderzoek.

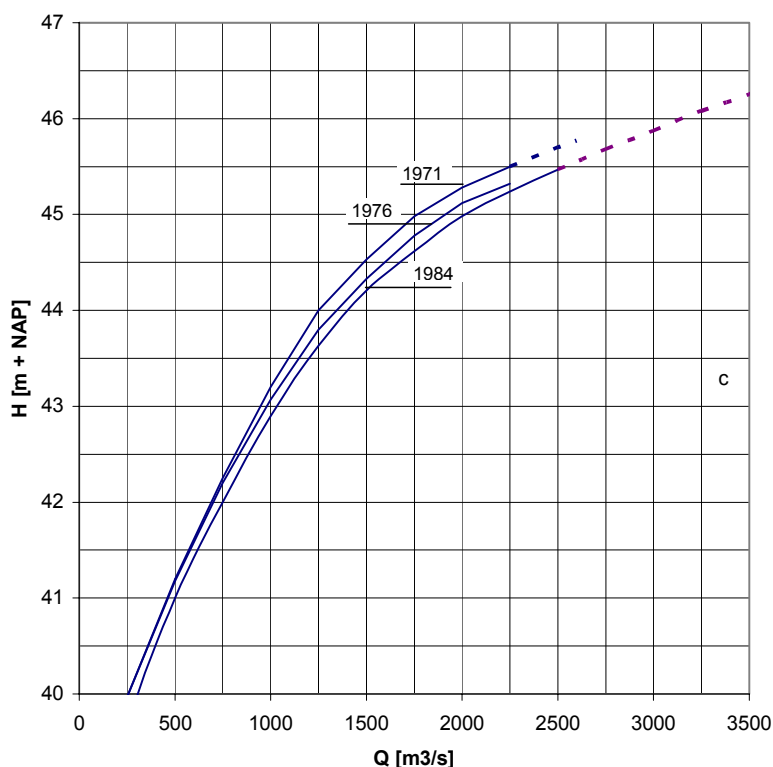
1971-1974	1978
1975-1976	1979
1977	1980

Tabel 3.4 Overzicht gebruikte QH-relaties in de periode 1971-1980 (RWS, 1980)

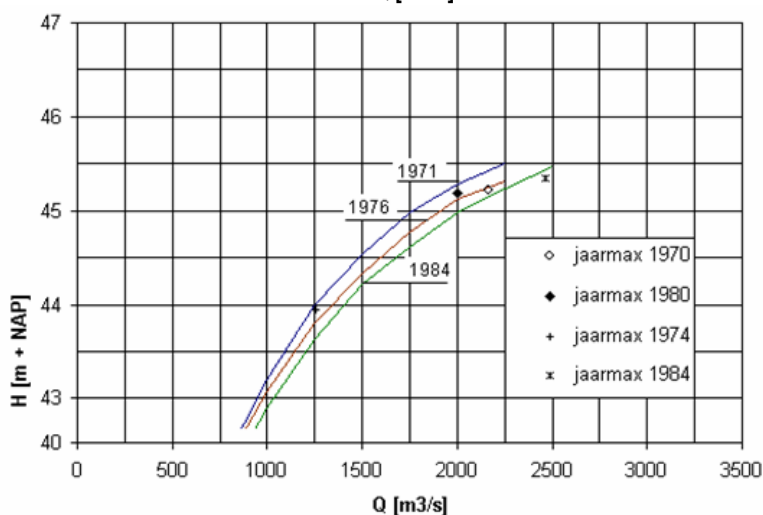
Als de verschillende QH-relaties in Figuur 3.15 worden beschouwd dan is de invloed van grindonttrekkingen duidelijk merkbaar. In tegenstelling tot de periode 1954-1955 zijn nu geen extra QH-relaties gefabriceerd tijdens de bodemdaling. In de periode 1971-1976 zijn twee QH-relaties gemaakt terwijl de bodem ongeveer 25 cm is gedaald. Behalve van het jaarmaximum van 1970 zijn de jaarmaxima deze periode niet boven de 1.300 m³/s uitgekomen. De lagere jaarmaxima worden door de QH-relatie zonder veel onzekerheden voorgesteld. Tussen de relatie van 1971 en 1976 bij een gemiddelde afvoer van 1.200 m³/s zit een afvoerverschil van ongeveer 50 m³/s. Rekening

houdend met de twee gebruikte relaties blijft er nog een 'fout' over van 25 m³/s, dat is 2% van de gemiddelde afvoer. Van het jaarmaximum 1970 bestaat een grotere onzekerheid. Opvallend is dat de topafvoer van 1970 (2.165 m³/s, zwarte punt in Figuur 3.16) op de curve van 1976 ligt in plaats van de curve van 1971. Deze afvoermeting bevestigt het gevolg van het niet actueel houden van de QH-relaties. Gezien deze bevindingen wordt een onzekerheid in rekening gebracht overeenkomend met het procentuele verschil tussen de afvoerkrommen van 1971 en 1976, resulterend in 5% onzekerheid. Tussen de relatie 1976 en 1984 zit een vergelijkbare bodemdaling maar het is gegeven (RWS, 1980) dat van 1976 tot en met 1980 elk jaar de QH-relatie vernieuwd is. Door de tijdige actualisering van de QH-relatie wordt voor de periode 1976-1980 geen rekening gehouden met onzekerheden ten gevolge van bodemdaling. Voor de gehele periode 1970-1987 wordt met een gemiddelde onzekerheid van 3% rekening gehouden door bodemdaling.

QH relatie 1971-1976-1984 Borgharen



Figuur 3.15 QH relaties 1971, 1976 en 1984.



Figuur 3.16 Jaarmaxima en QH-relaties 1971-1984

Kwantificeerbare onzekerheden

Spreiding door a priori onzekerheden

- Waterstandsmeting. In hoofdstuk 2 is de foutmarge van de peilschaal geschat op 1 centimeter, overeenkomstig met 1% onzekerheid.
- Meting dwarsprofiel. Geen toegevoegde onzekerheid (zie § 3.4)
- Meetapparatuur. De Ott-molen die gedurende deze periode is gebruikt heeft een onzekerheid van rond de 5%.

Spreiding meetpunten ten opzichte van de curve

- Afwijking metingen en QH-curve: 2%.

Spreiding door periode specifieke onzekerheden

- Bodemdaling: 3%

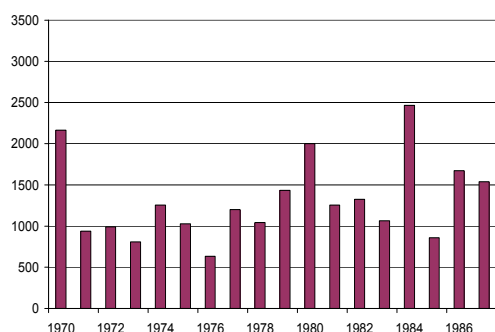
Kwalificeerbare onzekerheden

Empirische kwaliteit

Dichtheid data: Van de dichtheid van meetgegevens verkregen tijdens Ott-molenmetingen op de Maas kan geen gefundeerde uitspraak gedaan worden vanwege de beperkte gegevens uit het Boertien I rapport. De periode heeft drie noemenswaardig hoge afvoeren. Alleen van de zomerafvoer van 1984 zijn de meetpunten gegeven in het Boertien I rapport. De metingen zijn echter niet representatief voor de op winterafvoeren gebaseerde QH-relatie. De dichtheid van de meetgegevens in het hoge afvoerbereik van de QH-relaties is daardoor onbekend. De enige vermelding over de metingen is dat de QH-relatie van 1976 is gebaseerd op molenmetingen gedurende de periode 1971-1975. Vanwege het ontbreken van de meetgegevens wordt een lage NUSAP score toegekend, overeenkomend met: "gemodelleerde gegevens, indirecte maten, handboek schattingen.", score is 2.

Meetomstandigheden: De meetlocatie St. Pieter is onveranderd gebleven ten opzichte van de vorige periode. Er hoeft geen extra score te worden toegekend.

Verifieerbaarheid jaarmaxima: De topafvoeren deze periode zijn met een interval variërend van 4 tot 10 jaar opgetreden. Door bodemdaling is het niet mogelijk om de afvoeren vóór 1970 te gebruiken ter verificatie. Bovendien is de afvoer van 1980 een zomerafvoer. Het afgeleide hoogwater van 1984 is dus nauwelijks verifieerbaar geweest met eerder opgetreden afvoeren. De verifieerbaarheid scoort laag waardoor een score van -0,5 wordt verrekend.



Figuur 3.17 Jaarmaxima 1971-1987

Methodische kwaliteit

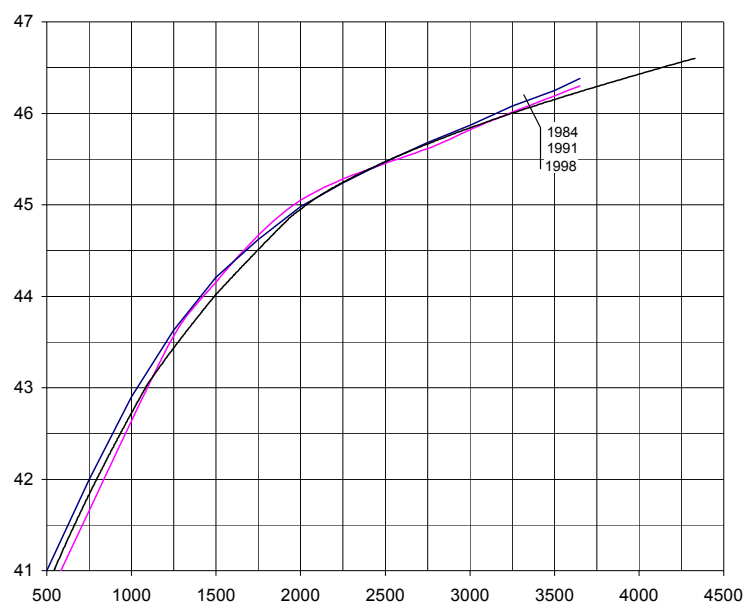
Werkwijze: De QH-relaties die zijn weergegeven in het Boertien I rapport (Figuur 3.15) hebben buiten het geïnterpoleerde gebied nog een extrapolatie ondergaan (stippellijnen). Voor de relatie van 1971 en 1984 begint de extrapolatie voorbij de jaarmaxima van 1970 en 1984. Daaruit kan worden afgeleid dat geen gebruik is gemaakt van het geëxtrapolerde gedeelte. De relatie van 1976 is gebruikt voor een aantal betrekkelijk lage jaarmaxima. Voor deze relatie kan worden uitgegaan van een geïnterpoleerde curve. De methodische kwaliteit verdient volgens de Pedigree tabel een score van 3, overeenkomend met de omschrijving: "betrouwbare methode, die bekend is binnen de discipline."

Actualiteit QH-relatie: De actualiteit scoort laag vanwege het matig bijhouden van bodemdaling. De methodekwaliteit krijgt daardoor een score van -0,5 toegekend.

3.6 Periode 1988 - 2000

Inleiding

In deze periode zijn twee zeer hoge hoogwaters opgetreden, namelijk in 1993 en 1995. De QH-relatie die in 1991 is opgesteld, is belangrijk voor de vaststelling van deze twee extreme afvoeren.



Figuur 3.18 QH relaties 1984, 1991 en 1998

Een korte blik op de QH-relaties van 1984, 1991 en 1998 (Figuur 3.18) maakt duidelijk dat deze nauwelijks zijn veranderd in veertien jaar tijd. Boven afvoeren van 2.000 m³/s zijn praktisch geen wijzigingen doorgevoerd. De metingen die Rijkswaterstaat heeft uitgevoerd tijdens de hoogwaters van 1993 en 1995 gaven blijkbaar geen grote afwijkingen ten opzichte van de bestaande QH-relatie. Mogelijk omdat er gedurende deze periode geen ingrepen zijn uitgevoerd die effect hebben op hoge tot extreem hoge afvoeren. Voor afvoeren lager dan 2.000 m³/s is een daling in de waterstand zichtbaar. De daling is veroorzaakt door de compensatiemaatregelen ten behoeve van het Deltaplan grote Rivieren (DGR). Voor deze periode zijn geen meetgegevens bekend waardoor analyse alleen uitgevoerd kan worden op basis van de gegeven afvoerrelaties.

Analyse onzekerheden

In hoeverre de QH-relatie van 1991 een goede benadering heeft gegeven voor de extreem hoge afvoeren van 1993 en 1995 is niet zuiver in te schatten. Na de hoogwaters van 1993 en 1995, de aanleg van kades en compensatiemaatregelen is in 1998 een nieuwe QH-relatie gemaakt. Het afvoerbereik waartussen de twee piekafvoeren liggen - 2.250 tot 3.000 m³/s - heeft hetzelfde verloop als de oude relatie. Hieruit kan afgeleid worden dat de QH-relatie van 1991 de jaarmaxima goed heeft voorgesteld, aangezien de QH-relatie van 1998 die gemaakt is na de hoogwatermetingen in 1993 en 1995, als representatief kan worden beschouwd. De waardering ten aanzien van de NUSAP onzekerheidsbeoordeling wordt vanwege de minimale verschillen en gelijke meetomstandigheden overgenomen van de voorgaande periode.

Kwantificeerbare onzekerheden

Spreiding door a priori onzekerheden

- Waterstandsmeting. In hoofdstuk 2 is de foutmarge van de peilschaal geschat op 1 centimeter, overeenkomstig met 1% onzekerheid.
- Meting dwarsprofiel. Geen toegevoegde onzekerheid (zie § 3.4)
- Meetapparatuur. De Ott-molen die gedurende deze periode is gebruikt heeft een onzekerheid van rond de 5%.

Spreiding meetpunten ten opzichte van de curve

- Afwijking metingen en QH-curve: 2%.

Spreiding door periode specifieke onzekerheden

- Uit de QH-relaties valt af te leiden dat er geen bodemdaling is opgetreden gedurende deze periode. Er hoeft daardoor geen onzekerheidspercentage worden toegevoegd

Kwalificeerbare onzekerheden

Empirische kwaliteit

Omdat van deze periode geen meetgegevens beschikbaar zijn gekomen wordt aangenomen dat de dichtheid van de meetgegevens gelijk is met de voorgaande periode. De beoordeling van de empirische kwaliteit wordt overgenomen van de periode 1971-1987. De score komt daardoor op 2. Overeenkomend met de twee NUSAP omschrijvingen: "Historische/veldgegevens, ongecontroleerde experimenten, klein aantal directe metingen." en "gemodelleerde gegevens, indirecte maten, handboek schattingen."

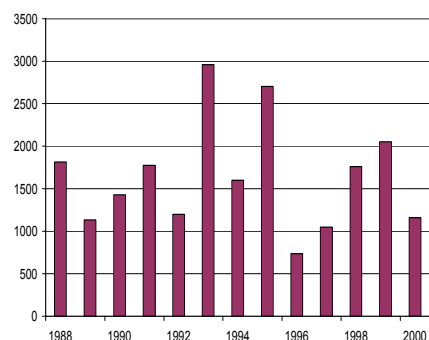
Meetomstandigheden: Uit een interview met dhr. Tekstra van RWS-Limburg is over de hoogwatermetingen tijdens deze periode het volgende verteld:

In 1993 en 1995 is in St. Pieter gemeten met Ott-molens, en in 1995 ook in Ravenstein. In St. Pieter is aan de linkeroever op een hoge dijk gemeten. Aan de rechteroever kon een gedeelte gemeten worden en het overblijvende gedeelte is geschat. In Ravenstein is het gedeelte aan de rechteroever helemaal gemeten inclusief uiterwaarden, aan de linkeroever is een gedeelte van de uiterwaarden gemeten en het overblijvende deel geschat.

Gezien de schattingen die gedaan zijn voor de stroomsnelheid kan worden aangenomen dat de meetomstandigheden niet optimaal zijn geweest. De waterstandmetingen in Ravenstein blijken met geïmproviseerde peilschalen te zijn uitgevoerd welke zo dik waren dat opstuwung van het water rond de peilschaal voor twijfel zorgde over de aflezing. Vanwege het moeten afwijken van de standaard procedures voor de metingen wordt voor deze periode een score van -0,5 toegekend.

Verifieerbaarheid jaarmaxima: Het optreden van extreme afvoeren kort na elkaar is gunstig voor de verificatie van de meetresultaten en zo ook de QH-relaties. Was alleen in 1995 een extreme afvoer opgetreden, dan had over de hoogte ervan meer onzekerheid bestaan. Vanwege de kortstondig

opvolgende piekafvoeren is een redelijke verificatie van het hoge afvoerbereik in de QH-relaties ontstaan. Niettemin zijn vanwege de afwijkende meetomstandigheden de meetresultaten niet zonder meer te gebruiken voor verificatie. Voor deze periode wordt daarom geen extra score toegekend.



Figuur 3.19 Jaarmaxima 1988-2000

Methodische kwaliteit

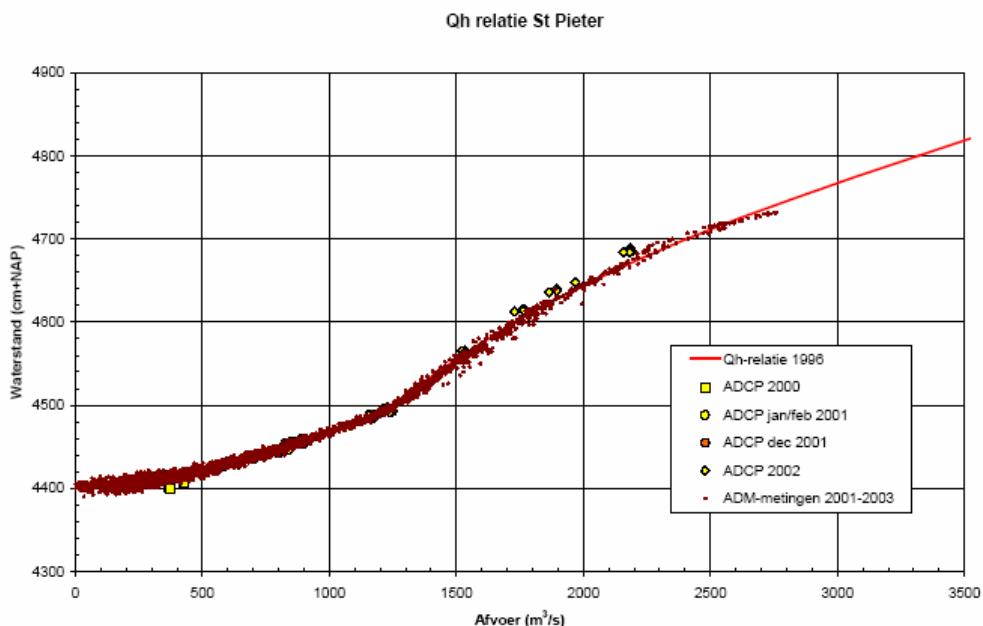
Werkwijze: Door het ontbreken van meetgegevens afgebeeld in de QH-relaties is het niet mogelijk iets te zeggen over het geïnterpoleerde ofwel het geëxtrapoleerde gedeelte. De werkwijze wordt daarom als neutraal beoordeeld overeenkomend met de NUSAP omschrijving: “betrouwbare methode, die bekend is binnen de discipline.”, score is 3

Actualiteit QH-relatie: Aangezien de relaties nauwelijks zijn veranderd deze periode, heeft het dwarsprofiel bij St. Pieter vrijwel geen veranderingen ondergaan. Zelfs op basis van de drie QH-relaties – waarschijnlijk zijn er meer gebruikt – kan worden geconcludeerd dat deze voldoende actueel zijn geweest voor afleiding van de afvoeren. Wat betreft de actualiteit hoeft geen score in mindering te worden gebracht.

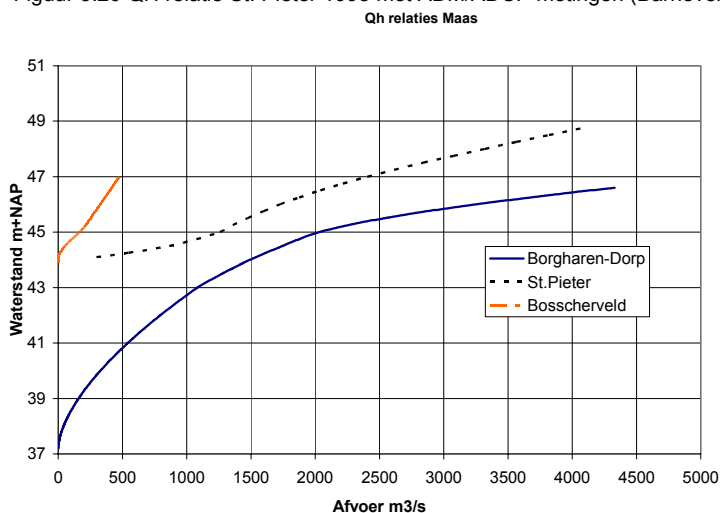
3.7 Periode vanaf 2000

Voor beoordeling van de huidige QH-relatie is gebruik gemaakt van het rapport “QH-relaties Maas” (Barneveld, 2004). De QH-relaties sinds 2000 worden niet meer gecontroleerd door middel van Ottmolenmetingen maar met de ADCP en de ADM. De relatie is opgemaakt in 1998 en sindsdien ongewijzigd gebleven. ADCP en ADM-metingen hebben aangetoond dat de afvoeren behorende bij de waterstanden nog steeds overeenkomen. Dit heeft ook te maken met het beëindigen van grindonttrekkingen in de Maas sinds de jaren negentig.

Het gebruik van de digitale/akoestische apparatuur heeft de empirische kwaliteit van de QH-relaties aanzienlijk verbeterd doordat tijdens een meetcampagne een veelvoud aan meetgegevens verkregen wordt die ter controle van de QH-relatie kunnen worden gebruikt. In 2001 en 2002 zijn hoge afvoergolven (Tabel 3.5) gepasseerd waardoor over een vrij groot afvoerbereik door de meetdienst van Rijkswaterstaat meetdata is verkregen. Figuur 3.21 geeft de meetpunten verkregen door de ADM tezamen met de QH-relatie van St. Pieter weer.



Figuur 3.20 QH relatie St. Pieter 1998 met ADM/ADCP metingen (Barneveld, 2004)

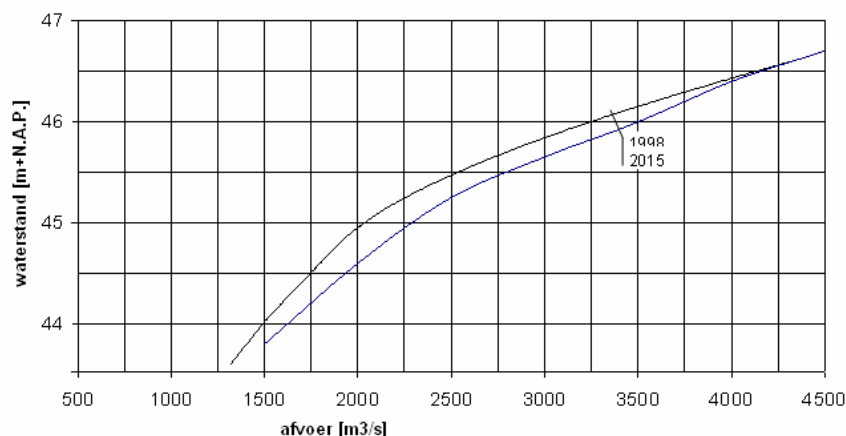


Jaar	Afvoer (m³/s)
2000	1.830
2001	2.226
2002	2.547
2003	1.209
2004	1.079

Tabel 3.5 Jaarmaxima 2000-2004

Figuur 3.21 QH relaties overlaat Bosscherveld, St. Pieter en Borgharen (Barneveld, 2004)

Het verschil in het verloop voor de afvoeren tot 1.200 m³/s van de QH-relaties Borgharen en St. Pieter (Figuur 3.22) wordt veroorzaakt doordat de waterstanden bij St. Pieter onder invloed staan van de stuw Borgharen die bij 1.200 m³/s wordt opgezet. De waterstanden van Borgharen worden benedenstrooms van de stuw gemeten en staan daardoor niet onder invloed van de stuw.



Figuur 3.22 QH relatie 1998 en berekende QH relatie 2015 ivm Maaswerken

(Barneveld, 2004)
(RIZA. Controle Maas 2015, 2006)

Voor het Grensmaasproject dat start in 2007 staan uiterwaardontgravingen gepland, ook tegenover het DNM-meetstation Borgharen. Wat voor gevolgen dit voor de QH-relatie gaat geven is inmiddels met modellen gesimuleerd. Figuur 3.20 geeft de huidige QH-relaties met de resultaten van de voorspelde QH-relatie van 2015, ontwikkeld met behulp van een hydrodynamisch model.

Kwantificeerbare onzekerheden

Spreiding door a priori onzekerheden

- Waterstandsmeting. In hoofdstuk 2 is de foutmarge van de DNM geschat op 1 centimeter, overeenkomend met 1% onzekerheid.
- Meting dwarsprofiel. Geen toegevoegde onzekerheid (zie § 3.4)
- Meetapparatuur. De ADCP die gedurende deze periode is gebruikt heeft een onzekerheid van rond de 5%.

Spreiding meetpunten ten opzichte van de curve

- Figuur 21 geeft de metingen van de ADM en de ADCP weer, die tijdens hoogwaters tussen 2000 en 2003 zijn verkregen. De ADM metingen zijn bruikbaar voor afvoeren onder de 2.400 m³/s (zie § 2.3), daarboven is de ADCP apparatuur meer geschikt. In 2002 is nog een zeer hoog jaarmaximum opgetreden waarvan in het QH-rapport (Barneveld, 2004) geen vermelding is gegeven over metingen met de ADCP. De toevallige fout van de ADCP is vergelijkbaar met de metingen uit de Ott-molen periode. Afwijkingen rond de curve liggen tussen de 20 en 30 m³/s waardoor de onzekerheid uitkomt op 1%. Eerder onderzoek (Rijkswaterstaat, 2003c) wees eveneens uit dat met een onzekerheid van 1% rekening moet worden gehouden.

Spreiding door periode specifieke onzekerheden

- Over de effecten van de ingrepen voor het Grensmaasproject is nog niets bekend. Over periode specifieke onzekerheden kan tot dusver geen uitspraak worden gedaan.

Kwalificeerbare onzekerheden

Empirische kwaliteit

- Figuur 3.21 waarin de QH-relatie met de ADM en ADCP meetresultaten is weergegeven, maakt duidelijk dat er ten opzichte van voorgaande periode grote vooruitgang is geboekt wat betreft de empirische kwaliteit. De beoordeling volgens NUSAP is bijna het maximale, ware het niet dat de ADM metingen ongecontroleerd zijn en de ADCP niet het gehele dwarsprofiel meet. Daardoor ligt de beoordeling tussen: "gecontroleerde experimenten & groot aantal directe metingen", score is 4 en "Historische/veldgegevens, ongecontroleerde experimenten, klein aantal directe metingen", score is 3. De uiteindelijke score is 3,5

- Meetomstandigheden: De ADM is een permanent geïnstalleerd meetstation dat door zijn geijkte opstelling onder goede omstandigheden metingen kan verrichten. De ADCP is gemonteerd op een goed manoeuvreerbaar meetschip (Figuur 2.14) uitgerust met GPS. Het meten is ten opzichte van de Ott-molenmetingen beter uitvoerbaar en evenwichtiger geworden waardoor 0,5 punt extra wordt toegekend.
- Verifieerbaarheid jaarmaxima: Net als in de vorige periode zijn twee hoge afvoerenpieken kort na elkaar opgetreden ten gunste van de verificatie van de QH-relatie.

Methodische kwaliteit

- Werkwijze: Volgens Barneveld (pers. comm. 2006) is in het extrapolatiegebied met een machtsfunctie gewerkt om de fysica er enigszins in te houden. De QH-relatie uit 1998 is in hetzelfde rapport getoetst aan de hand van ADM- en ADCP-metingen en een balansvergelijking. Door het ingaande debiet van St. Pieter en de Jeker te verminderen met het debiet van de Bunde, Smeermaas, overlaat Bosscherveld en Borgharen Dorp kan de balansfout worden berekend. Op basis van de balansberekening en controlemetingen werd aanbevolen om de QH-relatie van 1998 niet aan te passen. Er is voorgesteld om het profiel van het meetkruis behorende bij de ADM (zie § 2.3) te controleren en de balansberekeningen opnieuw uit te voeren. Met het gebruik van drie toetsingsmethoden (ADM, ADCP en balansvergelijking) verdient de methodische kwaliteit een score van 3 overeenkomend met de NUSAP omschrijving: "betrouwbare methode, die bekend is binnen de discipline."
- Actualiteit QH-relatie: Zoals het voorgaande gesteld, kan worden geconcludeerd dat de actualiteit van de QH-relatie 1998 goed is geweest. Wat betreft de actualiteit hoeft geen score in mindering te worden gebracht.

3.8 Overzicht beoordeling onzekerheden

Volgens het RIZA ligt de onzekerheid van QH-relaties tussen de 5 à 10%. Deze komt bij benadering overeen met de minimale gekwantificeerde onzekerheid in dit onderzoek. De uitgebreide analyse van meetinstrumenten, en periode specifieke onzekerheden heeft ertoe geleid dat er nog een ruime hoeveelheid aan onzekerheden bovenop komen. Hoe groot de voortgeplante onzekerheid van de QH-relatie is blijkt uit de analyse naar de voortplanting van de onzekerheden in paragraaf 6.1.

In het Boertien I onderzoek uit 1993 werd overigens geconcludeerd dat de QH-relaties na 1957 voldoende betrouwbaar zijn geweest. Daarmee wordt indirect gesuggereerd dat het gebruiken van de afgeleide jaarmaxima uit de periode 1911-1956 tot weinig betrouwbare resultaten zal leiden. In het volgende hoofdstuk wordt verder ingegaan op de serie jaarmaxima.

Gekwalificeerde onzekerheden	1911	1918	1933	1951	1956	1965	1971	1975	1988	2000
	1917	1932	1950	1955	1964	1970	1974	1987	1999	2003
Meting	10%	10%	10%	10%	5%	5%	5%	5%	5%	4%
Periode	13%	13%	9%	2%	2%	2%	5%	5%	2%	1%
Gekwantificeerde onzekerheden										
empirisch	1.5	1.5	2	2	2	2	1.5	1.5	1.5	4
methodisch	3	3	2.5	3	3	3	2.5	2.5	3	3

Tabel 3.6 Overzicht beoordeling gekwantificeerde en gekwalificeerde onzekerheden QH-relaties.

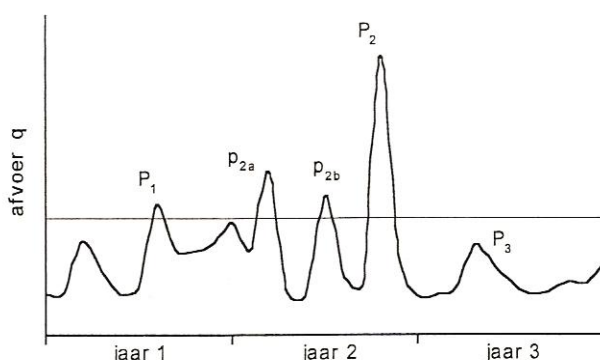
4. Tijdserie Hoge Q

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de series jaarmaxima die door zowel de Rijkswaterstaat onderzoeken als de alternatieve onderzoeken zijn gebruikt als basis voor de statistische berekeningen. De analyse is gefocust op de verschillende methoden om de tijdserie samen te stellen. De rapportages behorende bij de verschillende onderzoeken geven allemaal een goed inzicht in beweegredenen achter de keuzes voor het wel of niet corrigeren of uitbreiden van de tijdserie met hoge afvoeren. Voor alle onderzoeken wordt eenzelfde analyseopzet toegepast bestaande uit een inventarisatie van de basismetreeks, toegevoegde historische gegevens, correcties die uitgevoerd zijn op de meetreeks en een beoordeling van de onzekerheden.

4.1.2 Gebruikte basismetreeks

De basismetreeks bestaat uit de jaarmaxima die door Rijkswaterstaat geregistreerd zijn vanaf 1911. Sinds 1911 zijn van elk jaar de jaarmaxima beschikbaar en wordt in dit onderzoek vanwege zijn continuïteit gezien als de basismetreeks. Alle onderzoeken die in deze studie worden geanalyseerd maken gebruik van deze meetreeks, zij het van andere omvang en met eigen aanpassingen. Er wordt in de onderzoeken onderscheid gemaakt tussen jaarmaxima en afvoerpieken. De reeks jaarmaxima bestaat uit een enkele topafvoer per jaar, de reeks afvoerpieken betreft alle topafvoeren van een jaar die boven een drempelwaarde liggen. Figuur 4.1 geeft schematisch de verschillen tussen jaarmaxima en afvoerpieken.



Figuur 4.1 Jaarmaxima en afvoerpieken (Klunhaar, 2003)

De reeks jaarmaxima bevat de toppen P_1 , P_2 en P_3 , terwijl de reeks afvoerpieken de toppen P_1 , P_2 , P_{2a} en P_{2b} bevat. Er bestaat geen directe voorkeur voor één van de twee reeksen. Een aantal voor- en nadelen van beide afvoerreeksen zijn:

- De onafhankelijkheid van de reeks jaarmaxima is eenvoudiger te garanderen (Klunhaar, 2003). Een tweede piekafvoer kort na een eerder opgetreden piekafvoer met dezelfde hoeveelheid neerslag in de Ardennen kan vanwege de nog verzadigde uiterwaarden een hogere golftop krijgen. Desondanks is vanwege de snelle respons van de rivierafvoer op neerslag de onafhankelijkheid van opeenvolgende pieken binnen korte tijd wel bereikt. Tijdens het Boertien I onderzoek is voor vaststelling van de reeks afvoerpieken gekozen voor een zichtduur van 8 dagen.
- De reeks afvoerpieken sluit de laagste minder betekenisvolle afvoeren voor de frequentieanalyse uit.
- De reeks jaarmaxima heeft een betere overeenstemming met de herhalingsperiode waarin de maatgevende afvoer wordt uitgedrukt. De additionele eenheid van de jaarmaxima is een jaar,

evenals de eenheid van de herhalingstijd. De eenheid van de afvoerpieken is niet per heel jaar maar per zichtduur. In de praktijk wordt dit opgelost door die ondergrens te kiezen waarbij het aantal afvoerpieken gelijk is aan het aantal jaren van de reeks jaarmaxima.

- Maar een beperkt aantal kansverdelingfuncties (voor de geëvalueerde onderzoeken in deze studie alleen de Exponentiele verdeling) heeft een goede aanpassing op de reeks afvoerpieken. Voor de reeks jaarmaxima is het mogelijk meerdere kansverdelingfuncties goed te fitten. In hoofdstuk 5 wordt daar uitgebreider op ingegaan. Met meer verschillende berekeningsresultaten wordt de definitieve keuze voor de maatgevende afvoer beter onderbouwd.

Zowel de RWS-onderzoeken als de alternatieve onderzoeken maken gebruik van de reeksen jaarmaxima en afvoerpieken.

De meetserie jaarmaxima bestaat uit de hoogste afvoeren van alle hydrologische jaren. Een hydrologisch jaar loopt van 1 oktober tot en met 30 september van het daar opvolgende jaar. Omdat extreme afvoeren vrijwel altijd in de winter optreden wordt met gebruik van een hydrologisch jaar voorkomen dat twee pieken uit dezelfde hoogwaterperiode als jaarmaximum worden aangewezen. Bijvoorbeeld de hoogwatergolf van 1926: deze bereikte op 1 januari zijn top maar had op 31 december het jaarmaximum van het 'gregoriaanse jaar' 1925 ook te pakken. Was geen rekening gehouden met hydrologische jaren, dan waren in 1925 én 1926 twee zeer extreme hoogwaters geregistreerd. De hoogwatergolf van 1 januari 1926 behoort bij het hydrologische jaar 1925.

4.1.3. Toegevoegde historische afvoergegevens

De twee alternatieve onderzoeken Gerretsen en Klunhaar hebben de basismetreeks uitgebreid met nog oudere gegevens. Door het betrekken van nog oudere data wordt het doen van een uitspraak over de maatgevende afvoer vanuit statistisch oogpunt beter onderbouwd. Het verlengen van de basismetreeks geeft een betere basis voor het doen van een schatting behorende bij een overschrijdingskans van eens in de 1.250 jaar. Uiteraard zijn er ook niet-statistische redenen om wel of juist niet te kiezen voor uitbreiding met oudere gegevens. Bij de beoordeling van de onzekerheden wordt daar verder op ingegaan. De gegevens van vóór 1911 bestaan niet uit een verzameling van opeenvolgende jaarmaxima zoals de basismetreeks. Alleen de hoge tot zeer hoge afvoeren zijn geregistreerd. In de RWS-studie Boertien II en de HR 2001 is onderzoek uitgevoerd naar toevoeging van oudere registraties, maar verder niet gebruikt voor het berekenen van de maatgevende afvoer. Desondanks wordt ook hiernaar een analyse uitgevoerd omdat het motief achter de gemaakte keuze interessant is voor de beoordeling van de alternatieve onderzoeken.

4.1.4 Correcties afvoergegevens

Omdat de Maas in het verleden veel geometrische veranderingen heeft ondergaan en omdat er verschillende methoden van afvoermetingen zijn geweest, is de verkregen data niet homogeen. Om de data te homogeniseren hebben de RWS-onderzoeken correcties doorgevoerd op de afvoerdata van de Maas. Een voorbeeld is het hoogwater van 1926 waarvoor destijds een afvoer was berekend van 3.000 m³/s. Gecorrigeerd naar de huidige situatie zou de afvoer 3.175 m³/s zijn omdat capaciteitsvergrotingen van de Waalse Maas voor een grotere voortplantingssnelheid en geringe golfdemping hebben gezorgd (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1994).

4.1.5 Beoordeling onzekerheden

De hiervoor genoemde aspecten zullen allemaal beoordeeld worden op de aanwezigheid van onzekerheden. De afvoeren behorende bij de basismetreeks zijn allemaal afgeleid van QH-relaties waarvan in het vorige hoofdstuk de gekwantificeerde en gekwalificeerde onzekerheden zijn bepaald. De onzekerheid van de afgeleide afvoeren bestaat namelijk uit een combinatie van de onzekerheden van de waterstandsmeting, afvoermetingen en de QH-relatie. De relatie van deze parameters is reeds toegelicht in de paragraaf 1.1. De mate waarin de onzekerheden doorwerken is bepaald in een apart hoofdstuk over de voortplanting van de onzekerheden (paragraaf 6.1). De onzekerheid door correcties op de jaarmaxima is niet zomaar in een percentage uit te drukken omdat niet alle analyseresultaten en rapportages waarop de correcties zijn gebaseerd beschikbaar zijn gekomen voor dit onderzoek. De grootte van de correcties is wel bekend en kan in relatie tot de originele waarde worden uitgedrukt in een percentage. Het is daarmee geen onzekerheidspercentage maar de kwalitatieve beoordeling helpt daarbij om een indicatie te geven van de zekerheid rond de correcties.

De kwalitatieve onzekerheidsbeoordeling wordt gedaan door middel van een beoordeling naar de empirische kwaliteit en de methodische kwaliteit.

- De beoordeling van de empirische kwaliteit van de basismetreeks hoeft niet voor elk onderzoek apart te worden uitgevoerd omdat zij allen gebruik maken van de door Rijkswaterstaat geregistreerde jaarmaxima. Voor de onderzoeken Boertien I, II, HR2001 en de alternatieve onderzoeken van Gerretsen en Klunhaar geldt de beoordeling tot het jaar 2000 aangezien de gebruikte reeksen afvoeren van 1993 tot 1999 gebruikt zijn. Alleen voor de HR 2006 wordt de beoordeling van na 2000 toegevoegd. Tabel 4.1 met de NUSAP beoordelingen is overgenomen uit hoofdstuk 6. Voor de bepaling van deze scores wordt verwezen naar paragraaf 6.1.2.

	1911	1918	1933	1951	1956	1965	1971	1975	1988	2000
	1917	1932	1950	1955	1964	1970	1974	1987	1999	2003
Qmax										
empirisch	2.1	2.1	2.4	2.4	2.7	2.7	2.4	2.4	2.4	3.9
methodisch	2.7	2.7	2.5	2.7	3.1	3.1	2.9	3.0	3.3	3.2

Tabel 4.1 Overzicht NUSAP beoordeling voor de reeksen jaarmaxima en afvoerpieken

De empirische kwaliteit van de historische afvoeren van vóór 1911 is lager vanwege het feit dat hiervan geen meetgegevens bekend zijn maar alleen een (subjectieve) waarneming als normaal, hoog, zeer hoog en extreem hoogwater.

De empirische kwaliteit wordt volgens NUSAP passend omschreven als: “met enige kennis gemaakte schattingen, heel indirecte benaderingen, ‘vuistregel’ schatting.”, score is 1.

- De beoordeling van de methodische kwaliteit gaat in op omgang met de basismetreeks van jaarmaxima en de toegevoegde historische afvoeren. Aan de scores van de methodische kwaliteit in tabel 4.1 worden de beoordelingen van deze toepassingen toegevoegd. In paragraaf 6.1.2 wordt daar verder op ingegaan.

Voor de basismetreeks zijn de correcties bedoeld voor het homogeniseren het aandachtspunt. Met name in het Boertien II onderzoek en de HR2001 is een uitgebreide analyse naar de correcties uitgevoerd en waar nodig zijn deze doorgevoerd. In het onderzoek van Klunhaar zijn de gecorrigeerde waarden uit de HR2001 overgenomen. De ongecorrigeerde geregistreerde reeks jaarmaxima waar in Boertien II onderzoek een viertal verschillende correcties zijn doorgevoerd, is door Gerretsen eveneens gebruikt maar met

toepassing van maar één correctiefactor. In bijlage 3 is een overzicht gegeven van de basismetreeksen die voor de onderzoeken zijn gebruikt. Bij het homogeniseren van de afvoeren zit de onzekerheid voornamelijk in de onmogelijkheid om de gecorrigeerde afvoeren te verifiëren voor de oude situatie. Alleen met hydrodynamische modellering is het mogelijk om de vroegere Maas enigszins te simuleren. De vraag is hierbij in welke mate de keuze van het model de uitkomst beïnvloedt (Hoekstra, 2005). Een onzekerheidsbeoordeling van de modellen komt in dit afstudeeronderzoek niet verder aan de orde. De methodische kwaliteit van het corrigeren is met NUSAP niet eenduidig te beoordelen. Het toepassen van een correctie kan gezien worden als een methode die is aanvaard, niet bewezen want eenmalig, maar wel in overeenstemming met experts binnen de discipline opgesteld. De correcties die tijdens verschillende onderzoeken zijn doorgevoerd worden allen apart beoordeelt.

De methodische onzekerheid door toevoeging van oudere data van vóór 1911 is afhankelijk van de mate waarin de methode aanvaard is en of deze betrouwbaar kan worden geacht. Over het algemeen is verlenging van de basismetreeks met topafvoeren vanuit statisch oogpunt gewenst, zij het dat de gegevens te homogeniseren zijn naar de huidige situatie. Op dit aspect loopt de frequentieanalyse vast omdat het homogeniseren van dergelijk oude afvoeren niet goed mogelijk is aangezien de registraties van vóór 1911 alleen bestaan uit vier gecategoriseerde afvoeren: normaal = $<1.500 \text{ m}^3/\text{s}$, hoog = $< 2.000 \text{ m}^3/\text{s}$, zeer hoog = $<2.500 \text{ m}^3/\text{s}$ en extreem = $>2.500 \text{ m}^3/\text{s}$. Van de jaren 1643, 1740, 1850 en 1880 zijn de hoogten van het meetstation Visé wel preciezer bekend. Voor het Boertien II onderzoek en de HR 2001 zijn de historische afvoeren alleen gebruikt om een uitspraak te doen over de representativiteit van de basismetreeks voor een langere periode. De beoordeling is gebaseerd op een vergelijk van de herhalingstijden voor de reeksen mét en zonder (na 1911) toegevoegde historische afvoeren. Het rekenen met herhalingstijden is vrij voor de hand liggend en kan overeenkomstig met de NUSAP omschrijving gezien worden als een aanvaardbare methode, maar met beperkte consensus op betrouwbaarheid. De score is 2.

4.2 Onderzoek Boertien I

Het onderzoek in opdracht van de Commissie Boertien is vrij gedateerd in vergelijking met de HR 2006, maar heeft als basis gediend voor het Boertien II onderzoek waarin belangrijke aannames en correcties zijn gedaan, die weer voor de HR2006 zijn gebruikt. In het Boertien I onderzoek is naast de analyse van de gebruikte QH-relaties een inventarisatie gedaan naar de karakteristieken van het stroomgebied, de normalisatiewerken (stuwen, bochtafsnijdingen, kanalisatie), hoogwatergolven en stroomgebied-veranderingen. Op basis hiervan is besloten een tweetal correcties door te voeren, waarvan één correctie niet op de reeks afvoeren is toegepast maar pas na de frequentieanalyse. Aangezien de correctie niet van statistische aard is, wordt deze in de huidige paragraaf meegenomen.

4.2.1 Gebruikte basismetreeks

Voor het onderzoek is gebruikt gemaakt van de gegevens uit de periode 1910-1992. Het jaarmaximum van 1910 is niet opgenomen in Rijkswaterstaat-registraties maar komt uit een alternatieve publicatie van Vereerstraten (1969). Uit dezelfde publicatie zijn ook oudere afvoeren gegeven van voor 1911, en wel uit 1643, 1740, 1850 en 1880, maar in het onderzoek niet meegenomen. De reeks afvoerpieken boven de drempelwaarde van $800 \text{ m}^3/\text{s}$ zijn ook gebruikt voor de frequentieanalyse.

4.2.2 Correcties afvoergegevens

De eerste correctie betreft het verlagen van de geregistreerde jaarmaxima van de periode 1910-1931 met 7% en van de periode 1932-1956 met 5% vanwege de systematische fout van de stokdrijver. De percentages zijn ten aanzien van het onderzoek overgenomen uit het rapport 'Vergelijking tussen Ottmolen- en drijvermetingen van RWS, Dir. Bovenrivieren, 1956'. Geconcludeerd is, dat stokdrijvermetingen systematisch tot hogere afvoeren leiden dan afvoeren met molenmetingen.

De tweede correctie is vanwege de effecten van modernisering van de Belgische Maas (voltooiing omstreeks 1990). Echter, de schatting van de effecten blijkt volgens het Boertien I rapport een eerste indicatie te zijn omdat nog niet met een hydrodynamisch model is gerekend. Op basis van de betrekkinglijn³ Borgharen-Eijsden is een correctie afgeleid van 0,08 – 0,30 m. Dit komt overeen met een afvoer liggend tussen de 100 – 350 m³/s waarbij is uitgegaan van bijpassende herhalingstijden van respectievelijk 2 en 70.000 jaar. Er is geen toelichting gegeven over hoe aan deze herhalingstijden gekomen is. Met de correctie komt de maatgevende afvoer te liggen tussen 3.500 m³/s en 3.750 m³/s. Voor een herhalingstijd van T = 1.250 jaar is een correctiewaarde van 290 m³/s berekend met behulp van een log-regressie. Deze waarde is uiteindelijk opgeteld bij de berekende maatgevende afvoer uit de frequentieanalyse.

4.2.3 Onzekerheden

Beoordeling NUSAP

Empirische kwaliteit:

- Basismeetreeks: In de inleiding paragraaf 4.1.5 is vastgesteld dat de empirische kwaliteit van de jaarmaxima en afvoerpieken voldoet aan de in Tabel 4.1 gegeven beoordelingen.
- Verlenging basismeetreeks: Er zijn voor dit onderzoek geen oudere historische data toegevoegd of geanalyseerd dus kan een beoordeling achterwege blijven.

Methodische kwaliteit:

- De correctie in verband met de overschatting van de stokdrijver is slechts gebaseerd op een enkel rapport uit 1956. Tijdens het Boertien II onderzoek is een diepgaander analyse naar de overschatting van de stokdrijver uitgevoerd. Daaruit bleek dat met correcties vroeger al rekening werd gehouden. De analyse heeft ertoe geleid dat de verhoging van de afvoeren met 5% en 7% incorrect bleken te zijn. Op grond van hetgeen in het Boertien II onderzoek is geconcludeerd, kan gesteld worden dat de analyse in het Boertien I onderzoek tekortgeschoten is. De beoordeling volgens NUSAP: "niet bewezen methoden, twijfelachtige betrouwbaarheid", score is 1.
- De correctie voor de modernisering van de Belgische Maas is zo goed als een pure schatting. Als een hydrodynamisch model ter controle was gebuikt, dan had over de correctie meer zekerheid bestaan. De beoordeling volgens NUSAP ligt tussen twee omschrijvingen in, namelijk: "Puur subjectieve methode", score is 0 en "niet bewezen methoden, twijfelachtige betrouwbaarheid", score is 1. De uiteindelijke score komt op 0,5.

³ Betrekkinglijn: Lijn die weergeeft welke waterstanden met gelijke overschrijdingsfrequentie bij twee peilstations met elkaar overeenkomen (4).

4.3 Onderzoek Boertien II

4.3.1 Gebruikte basismeeetreeks

De Commissie Boertien II heeft de topafvoeren van de hydrologische jaren 1911-1993 gebruikt voor de berekening van de maatgevende afvoer. Ten opzichte van de reeks van Boertien I is de reeks van Boertien II uitgebreid met het hoogwater van december 1993. De reeks jaarmaxima en afvoerpieken zijn gebruikt voor de frequentieanalyse.

De meetserie 'afvoerpieken' is samengesteld uit alle afvoeren hoger dan 1.300 m³/s. De drempelwaarde is zo gekozen opdat het aantal afvoerpieken gelijk is aan het aantal jaren van de reeks jaarmaxima.

4.3.2 Verlenging basismeeetreeks

De Commissie heeft oudere hoogwaterregistraties van vóór 1911 geïnventariseerd om iets te zeggen over het eventueel vaker voorkomen van topafvoeren in de afgelopen eeuw ten opzichte van de eeuwen daarvoor. Er is gebruik gemaakt van de hoogwaters > 2.500 m³/s die sinds 1571 zijn opgetreden. Alleen van deze hoogwaters was de beschrijving zodanig, dat aangenomen is dat de afvoer van 2.500 m³/s met grote zekerheid is overschreden. Dit geldt voor de volgende negen hoogwaterjaren: 1571, 1643, 1740, 1799, 1850, 1880, 1926, 1992 en 1993. Deze extra data is niet gebruikt om een maatgevende afvoer te berekenen. Met de extra data is een vergelijking gemaakt voor de herhalingstijden T (jaren) uit de perioden 1571-1993, 1571-1911 en 1911-1993. De resultaten staan weergegeven in onderstaande Tabel. Een tweetal berekeningen ontbraken in de analyse van het rapport.

	T op grond van de reeks 1571-1993	T op grond van de reeks 1911-1993
Q > 3000 m ³ /s	90	120
Q > 2500 m ³ /s	50	25

Tabel 4.2 Overzicht herhalingstijden door toevoeging historische afvoeren

Uit de vergelijking is door de Commissie Boertien II afgeleid dat extreme hoogwaters, met name in de klasse boven 2500 m³/s, in de laatste eeuw regelmatig zijn voorgekomen. Er is verder niet ingegaan op het berekeningsresultaat voor de afvoeren boven de 3.000 m³/s die blijkbaar minder regelmatig zijn voorgekomen. Voor de berekende maatgevende afvoer heeft de analyse naar de herhalingstijden geen rol gespeeld. Er zijn wel aanbevelingen gedaan om de afvoerreeksen te onderzoeken op mogelijke trends.

4.3.3 Correcties afvoergegevens

Zoals gebleken in de analyse van het Boertien I onderzoek, is de correctie voor de stokdrijvermetingen in het Boertien II onderzoek ongedaan gemaakt. De correctie vanwege de modernisering van de Belgische Maas is na aanbeveling vanuit het Boertien I onderzoek opnieuw berekend. De Commissie Boertien II heeft totaal vier correcties toegepast op de reeks geregistreeerde RWS afvoeren, namelijk:

Correctie 8-uur topafvoeren: Van 1911 tot 1950 zijn alleen de momentane 08:00 uur waterstanden gemeten die vervolgens in de jaarboeken zijn vermeld. De afvoeren zijn met behulp van een QH-relatie afgeleid. Van 1950 tot 1974 zijn vier-uurlijkse waterstandsmetingen verricht die later op een grafische wijze zijn vereffend voor vertaling naar de 08:00 uur waterstand. Van 1975 tot 1978 worden de gemiddelde etmaalwaterstanden gebruikt op basis van de uurlijkse geregistreeerde waterstand. Vanaf 1978 worden maxima afgeleid van gemiddelde etmaalwaarden gebaseerd op 5 en 10-minutengemiddelden. Het aantal waterstandsmetingen per tijdsinterval is van belang omdat een

afvoerpiek maar kortstondig optreedt in verhouding tot de duur van de afvoergolf. Hoe frequenter de waterstand wordt gemeten, des te meer zekerheid bestaat er over een goede benadering van de werkelijke hoogte van de afvoertop ofwel het jaarmaximum.

In paragraaf 2.2.2 is aangetoond dat tijdens een uur meten afvoerfluctuaties kunnen optreden van 35 m³/s. Grofweg kan aangenomen worden dat er in 24 uur een afvoerfluctuatie van 840 m³/s mogelijk is. Bijlage 4 geeft van enkele extreme afvoeren de QT-relatie weer, waar zichtbaar is dat dergelijke verschillen binnen een etmaal voorgekomen zijn. Dergelijke stijgingen doen zich alleen voor in het golffront en niet rond de top. De top is meestal dusdanig afgevlakt dat met de hiervoor berekende fluctuaties geen rekening hoeft te worden gehouden. Als de verschillende afvoertoppen van diverse jaarmaxima tussen 1926 en 1945 bekeken worden (zie bijlage 4) dan valt op dat top niet ver van de hoogst gemeten waterstand heeft gelegen. Met gebruikmaking van Excel is een vloeiende lijn door de punten getrokken zodat een benadering van de werkelijke top gegeven wordt. De 08:00 uur meting tijdens de extreme afvoer van 1926 blijkt een goede overeenkomst te geven met de 'naar benadering' werkelijke hoogte. In Figuur B1, bijlage 4 zijn de waterstanden tijdens het passeren van de hoogwatergolf 1926 gegeven met de bijbehorende afvoer. De afvoerlijn geeft een indruk van de snelheid waarmee de deze toeneemt in relatie met de waterstand. De topwaterstand van de hoogwatergolf zit vrij exact tussen de waterstand van een dag eerder en een dag later waardoor het zeer aannemelijk is dat de topafvoer vrijwel gelijktijdig met de meting is opgetreden.

Van de jaarmaxima van 1931 en 1932 ligt het tijdstip van de meting nog juist tijdens het toenemen van de afvoergolf. Bij de afvoergolf van 1932 is handmatig een verwachtingslijn toegevoegd die evengoed als mogelijk waterstandsverloop kan worden beschouwd (Figuur B4). Van de zes geanalyseerde afvoergolven ligt het maximum op 10 cm waterstandonzekerheid overeenkomend met een afvoerverskil van circa 100 m³/s.

Voor het Boertien II onderzoek is een gemiddelde correctiewaarde van 35 m³/s gehanteerd voor alle afvoeren van 1911 tot 1950 met uitzondering van 'het hydrologische jaar' 1925. In de periode 1950 tot en met 1971 is bij de zeven laagste jaarmaxima eveneens 35 m³/s toegevoegd. De waarde is berekend door het gemiddelde langjarige verschil van de periode 1911-1950 met de periode 1951-1984 waarvan 4-uurlijkse en sinds 1975 continue geregistreerde afvoeren bekend zijn. Voor de jaren 1975 en 1990 zijn de daggemiddelde topafvoeren met 70 m³/s verhoogd. De jaartallen 1975 en 1990 kenmerken ook precies de laatste periode van de rivierwerken op de Waalse Maas. De extra 35 m³/s is waarschijnlijk het gevolg van aanpassingen van stuwpanden die zijn voorgekomen tijdens afronding van de laatste en voorlaatste periode van de rivierwerken.

Correctie door gewijzigde QH-relatie:

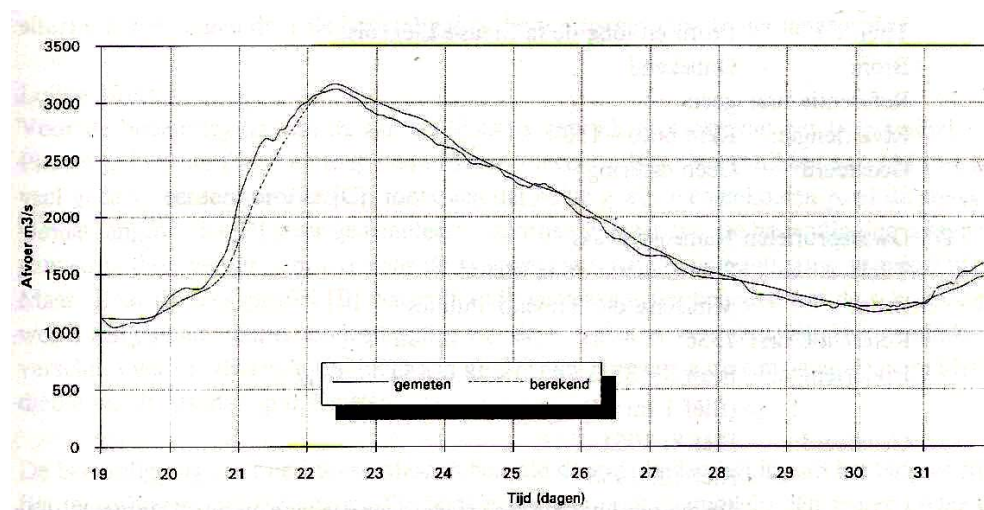
Voor de periode 1911-1932 zijn de geregistreerde afvoeren van Rijkswaterstaat (DTBEST reeks) gecorrigeerd vanwege een gewijzigde QH-relatie. Oorspronkelijk zijn deze afvoeren door Rijkswaterstaat gebaseerd op een QH-relatie van de periode 1933-1950. Deze wijkt af van de QH-relatie op basis van metingen te St. Pieter en Maastricht, uitgevoerd in de periode 1917-1930. Op basis van deze relatie is een nieuwe QH-relatie geconstrueerd voor de periode 1911-1932. Het resulteert in ca. 8% lagere afvoeren dan de QH-relatie 1933-1950 geeft.

Correctie voor rivierwerken op de Waalse Maas:

Met een hydrodynamisch model is de invloed van de rivierwerken in Wallonië op de afvoer in Borgharen voor hoogwaters bepaald. Hiervoor is uitgebreid onderzoek gedaan naar de bodemligging, kadehoogten, breedten, hoogwaterbed, ruwheden en stuwen en bruggen voor de verschillende perioden. De modellering voor de huidige situatie is gezien de resultaten goed gelukt gezien de vergelijking tussen de gemeten en berekende afvoergolf van 1993 (Figuur 4.2). Voor de historische situatie is de modellering nauwkeurig gebeurd maar er heeft geen verificatie plaats kunnen vinden. Dit

omdat naast de afvoergegevens van 1926 geen bruikbare afvoergegevens van andere historische hoogwaters bekend zijn.

Uit de resultaten van de berekeningen is gebleken dat de piekafvoeren met maximaal circa 6% zijn verhoogd en met 10 uur vervoegd. Dit heeft te maken dat na voltooiing het rivierbed is verdiept en de kades zijn verhoogd. Een afvoergolf blijft daardoor langer in het zomerbed stromen dan voorheen waarbij overstroming van het winterbed zorgt voor afvlakking van de golf en verlenging van de looptijd. Voor verschillende perioden tussen 1911 en 1990 (het laatste jaar van de rivierwerken in België) zijn bijtellingen berekend. Daarbij is gekeken in welke jaren capaciteitsaanpassingen als percentage van de totale aanpassing in 1990 hebben plaatsgevonden. Er zijn aannames gedaan betreffende enkele stuwpanen waarvan niet bekend was wanneer baggerwerk heeft plaatsgevonden.



Figuur 4.2 Gemeten en berekende afvoergolf van 1993 (RWS, 1994)

Correctie voor onttrekkingen bovenstrooms:

De laatste correcties betreffen de kortingen op de Maasafvoer vanwege het niet verdisconteren van onttrekkingen bovenstrooms van Borgharen in de DTBEST reeks. De onttrekkingen vonden plaats benedenstrooms van de afvoermetingen waardoor de geregistreerde afvoeren bij Borgharen te hoog zijn opgegeven. De correctie varieert van -24 tot 0 m³/s voor een zestal perioden tussen 1911 en 1993 voor piekafvoeren < 1.800 m³/s.

4.3.4 Onzekerheden

Beoordeling NUSAP

Empirische kwaliteit:

- Basismetreeks: In de inleiding paragraaf 4.1.5 is vastgesteld dat de empirische kwaliteit van de jaarmaxima en afvoerpieken voldoet aan de in Tabel 4.1 gegeven beoordelingen.
- Verlenging basismetreeks: Voor de frequentieanalyse is geen extra historische data aan de meetreeks toegevoegd, maar er is op grond van historische afvoeren wel een uitspraak gedaan over de representativiteit van de basismetreeks. De conclusie luidde dat er een trend zichtbaar is waaruit wordt aanbevolen een vervolgonderzoek uit te voeren. Ondanks dit voor vaststelling van de maatgevende afvoer belangrijke gegeven, wordt verder geen aandacht besteed aan de trendanalyse. De gebruikte data is beperkt. Volgens de Pedigree tabel laat de empirische kwaliteit zich kenmerken door: "met enige kennis gemaakte schattingen, heel indirecte benaderingen, vuistregel schatting", score is 1 van de 4.

Methodische kwaliteit:

- Correctie 8-uur topafvoeren: Voor de correcties van de 8-uur topafvoeren gebaseerd op de meer-uurlijkse metingen (1951-1984) is uitgegaan van het gemiddelde langjarige verschil. Een aparte studie naar de golfvorm per jaarmaximum zoals ook in bijlage 4 is gebeurt, geeft meer inzicht waar een correctie wel of niet nodig is. De oplossing om voor alle jaarmaxima eenzelfde afvoer toe te voegen is een enigszins grove aanname. De beoordeling volgens NUSAP komt overeen met twee omschrijvingen: “niet bewezen methoden, twijfelachtige betrouwbaarheid”, score is 1 “En aanvaardbare methode, maar beperkte consensus op betrouwbaarheid”, score is 2. De uiteindelijke score is 1,5.
- Correctie door gewijzigde QH-relatie: Het achteraf corrigeren van een QH-relatie is nogal controversieel omdat er vrijwel niet geverifieerd kan worden met de historische situatie waarop de correctie gebaseerd is (pers. comm. Wesselink, 2006). Echter, bij de DTBEST-reeks was de gebruikte QH-relatie voor de afvoerbepaling van de periode 1911-1932 opgesteld voor de periode 1933-1950. De nieuwe relatie voor de periode 1911-1932 heeft volgens de analyse een betere aansluiting met de QH-relatie van Visé en de afvoermetingen tussen 1917 en 1930 in St. Pieter en Maastricht. De beoordeling volgens NUSAP komt overeen met twee omschrijvingen: “niet bewezen methoden, twijfelachtige betrouwbaarheid”, score is 1 “En aanvaardbare methode, maar beperkte consensus op betrouwbaarheid”, score is 2. De uiteindelijke score is 1,5.
- Correctie voor rivierwerken op de Waalse Maas: Het uitgebreide onderzoek heeft in ieder geval ertoe geleid dat de correcties gebaseerd zijn op weloverwogen aannames. De methode kwaliteit scoort redelijk tot goed omdat het gebruik van hydrodynamische modellen in het waterbeheerdiscipline algemeen bekend en geaccepteerd is. Maar vanwege de noodzakelijke aannames is er enige twijfel over de betrouwbaarheid van de parameters. De overeenkomstige beschrijvingen van de NUSAP-matrix zijn: “betrouwbare methode, die bekend is binnen de discipline”, score is 3 en “aanvaardbare methode, maar beperkte consensus op betrouwbaarheid”. Score is 2. De resulterende score is 2,5.
- Correctie voor onttrekkingen bovenstrooms: Voor het bepalen van de correcties is gebruik gemaakt van een rapportage naar de frequentieanalyse van waterstanden in de Maas voor de periode 1911-1993 (Bos). Aangenomen kan worden dat de analyse zorgvuldig is uitgevoerd. De overeenkomstige beschrijving van de NUSAP-matrix is: “betrouwbare methode, die bekend is binnen de discipline”, score is 3.
- Verlenging basismetreeks: De methode voor de bepalen van de representativiteit van de basismetreeks met herhalingstijden is reeds in de inleiding gewaardeerd met een score van 2.

4.4 Hydraulische Randvoorwaarden 2001

4.4.1 Gebruikte basismetreeks

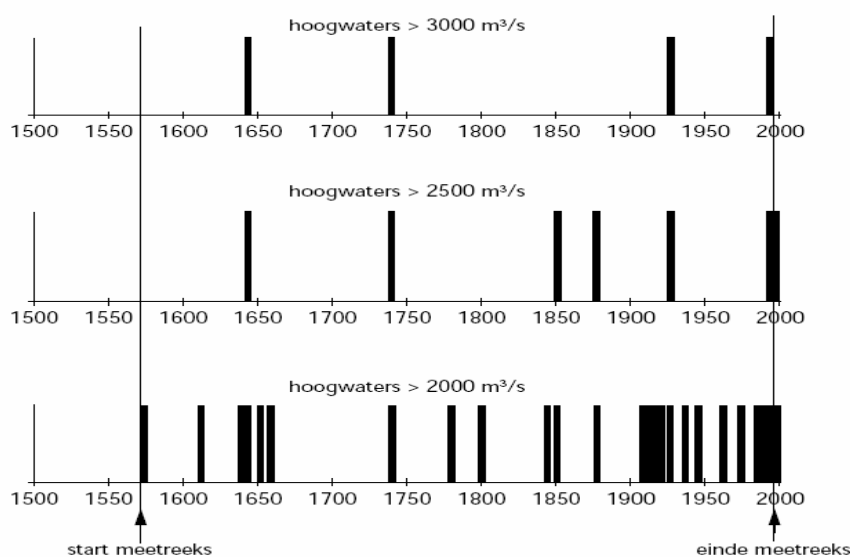
Het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA) heeft voor haar onderzoek in opdracht van Rijkswaterstaat gebruik gemaakt van de meetreeks van Boertien II en deze verlengd tot en met 1998. De reeks 1911-1993 is al gehomogeniseerd voor ingrepen die in het verleden in de rivier hebben plaatsgevonden. Voor de periode 1993-1998 is een nieuwe QH-relatie gebruikt.

Er zijn drie alternatieve doorberekeningen gemaakt. Alternatief 1 bevat de verlenging van de Boertien II reeks tot 1998. Alternatief 2 is gelijk aan 1 maar dan met correcties van oudere afvoeren. Alternatief 3 wordt berekend met een extra verdelingsfunctie maar met dezelfde meetreeks als variant 2.

4.4.2 Verlenging basismetreeks

Het RIZA heeft voor haar onderzoek naar extra/oudere data gebruik gemaakt van de gegevens uit het Boertien II onderzoek. Ook hier is gebruik gemaakt van de geregistreerde hoogwaters vanaf 1571 maar dan met toevoeging van het hoogwater van 1995. De hoogwaters van 1571 en 1799 die Boertien II aan de reeks $>2.500 \text{ m}^3/\text{s}$ had toegevoegd, zijn hier weggelaten. Hoogwaters die zijn geregistreerd als zeer extreem, worden volgens het Boertien II onderzoek voor het eerst geregistreerd in 1571. Omdat niet bekend is of daarvoor ook dergelijke hoogwaters zijn opgetreden heeft het RIZA het hoogwater van 1571 niet meegeteld. Het jaar 1799 had zowel bij de registratie $>2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ als $>2.500 \text{ m}^3/\text{s}$ een registratie omdat er blijkbaar enige twijfel over de hoogte heeft bestaan.

De Figuur hieronder geeft hoogwaters vanaf 1571 weer die het RIZA voor de analyse heeft gebruikt.



Figuur 4.3 Frequentie van geregistreerde hoogwaters uit het verleden

Door middel van de vergelijking van de gemiddelde herhalingsstijden van de meetreeksen 1571-1997 en 1911-1997 wordt besloten of de laatste serie representatief is voor de langere periode vanaf 1571. Hieruit bleek dat de verschillen voor de lagere afvoeren vrij groot zijn, maar voor hoogste afvoeren boven de $3.000 \text{ m}^3/\text{s}$ zijn de verschillen klein. De grotere verschillen bij lagere afvoeren worden door het RIZA verklaard door het minder accuraat registreren bij de lagere extreme ($2.000 - 2.500 \text{ m}^3/\text{s}$) afvoeren. Een andere conclusie dan Boertien II waar direct uit de gegevens werd afgeleid dat afvoeren boven de $2.500 \text{ m}^3/\text{s}$ in de laatste eeuw regelmatig zijn voorgekomen.

Tabel 3 geeft een overzicht van de herhalingstijden T (jaren) van historische hoogwaters in vergelijking met de gemiddelde waarden en het 95% betrouwbaarheidsinterval. Het betrouwbaarheidsinterval geeft met een zekerheid van 95% aan dat de afvoer tussen de boven- en ondergrens ligt. De RWS-reeks gebaseerd op afvoerpieken boven een bepaalde waarde wordt hieronder weergegeven.

	T op grond van de reeks 1572-1997	T op grond van de reeks 1572-1911	T op grond van de reeks 1911-1997	Ondergrens T 95%-interval 1911-1997	Bovengrens T 95%-interval 1911-1997
Q > 3000 m ³ /s	105	170	110	730	40
Q > 2500 m ³ /s	55	80	26	90	15
Q > 2000 m ³ /s	15	25	7	13	5

Tabel 4.3 Klassenbreedtes van de van de afvoerclassen waarin de historische hoogwaters zijn ingedeeld. (RWS, 2001a)

Mede omdat de hoogste afvoeren het meest belangrijk zijn voor bepaling van de maatgevende afvoer en de gemiddelden hiervan bijna gelijk zijn heeft het RIZA de volgende conclusie getrokken:

“Op grond van een kwalitatieve analyse van de representativiteit van de meetreeks van de afgelopen eeuw kan de aanname dat de meetreeks vanaf 1911 representatief is voor een langere periode niet worden verworpen.”

De argumentatie om de afvoeren > 2.000 m³/s en > 2.500 m³/s niet te betrekken in de conclusie is vervolgens:

“Naarmate de hoogwaters lager worden is de frequentie in deze eeuw hoger dan daarvoor. Dit geldt in beperkte mate voor de hoogwaters boven de 2.500 m³/s en heel sterk voor de hoogwaters boven de 2.000 m³/s. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat naarmate het hoogwater minder extreem is geweest, de registratie in historische kronieken minder accuraat heeft plaatsgevonden.”

Opvallend in Figuur 3 met de schematische weergave van hoogwaters > 2.000 m³/s is dat vanaf de continue registraties in 1911 het aantal per tijdvak van 50 jaar meteen veel hoger ligt. Het zou – op grond van een subjectieve kijk op de data - onwaarschijnlijk zijn als vóór 1911 eenzelfde dichtheid niet zou zijn voorkomen. Met het argument kan worden ingestemd, mede omdat tot 2001 het aantal afvoeren hoger dan 2.000 m³/s niet overtuigend hoger is na de tweede helft van de 20e eeuw. In de periode 2001-2006 zijn maar liefst drie hoge hoogwaters (resp. 2.122, 2.388 en 2.731 m³/s) opgetreden. Hierdoor lijkt wel een trend zichtbaar te zijn (zie Tabel 4.5). Had die voorkennis bestaan, dan was waarschijnlijk een andere conclusie getrokken. Bij de HR2006, waar een analyse naar herhalingstijden ontbreekt, wordt hierop teruggekomen. Voor het HR2001 onderzoek wordt het niet betrekken van de resultaten van de trendanalyse voor bepaling van de maatgevende afvoer aanvaard. De overtuiging van de resultaten is immers niet erg hoog. De empirische kwaliteit van de data waarop de uitspraak is gebaseerd krijgt evenals het voorgaande Boertien II onderzoek een bijbehorende NUSAP waardering.

4.4.3 Correcties afvoergegevens

Voor het eerste alternatief wordt de meetreeks van 1993 tot 1998 verlengd met de QH-relatie van 1993 die voor Borgharen is vastgesteld. De topafvoeren van 1992 en 1993 zijn gecorrigeerd vanwege de nieuwe QH-relatie en liggen lager dan de afvoeren die voor het Boertien II onderzoek zijn gebruikt. (zie Tabel 4).

Bij alternatief 2 gebeurt aanpassing met de hoogwaters na 1983. Er is bij het RIZA twijfel ontstaan over de afvoerhoogtes van de periode 1983-1986. Het hoge afvoerbereik van de QH-relatie 1984-1988 wijkt namelijk sterk af van de QH-relatie 1993-1998. Met een computersimulatie (SOBEK) is het effect van zomerbedverandering van de periode 1983-1986 op de QH-relatie 1993-1998 bij Borgharen

bepaald. Zodoende is een aangepaste QH-relatie voor de periode 1983-1986 gemaakt. Voornamelijk de hoge zomerafvoer van 1984 wordt met de nieuwe relatie fors lager (ongeveer 270 m³/s) Overigens is in het rapport vermeld dat de metingen tijdens het zomerhoogwater niet als onrepresentatief of onnauwkeurig kunnen worden beschouwd. Maar aangezien het hoge afvoerbereik van de QH-relaties is gebaseerd op metingen in de winterperiode, moet het zomerhoogwater van 1984 worden gehomogeniseerd.

Tabel 4 geeft een overzicht van de correcties die uitgevoerd zijn voor het RWS onderzoek. De eerste kolom geeft de afvoeren weer zoals deze gebruikt zijn voor het Boertien II onderzoek. De tweede kolom geeft de verlenging van de meetreeks met gedane correcties weer. In de derde kolom zijn de correcties vanaf het hydrologische jaar 1983 weergegeven.

Hydrologisch jaar	Boertien II	Variant 1 (verlenging Boertien II reeks)	Variant 2 (verlenging Boertien II reeks plus extra homogenisatie 1984-1987)
1983	2.570	2.570	2.300 1)
1984	1.641	1.641	1.584 1)
1985	1.765	1.765	1.682 1)
1986	1.577	1.577	1.526 1)
1987	1.922	1.922	1.922
1988	1.275	1.275	1.275
1989	1.449	1.449	1.450 1)
1990	1.845	1.845	1.843 1)
1991	1.660	1.660	1.660
1992	2.388	2.280 2)	2.280 2)
1993	3.120	3.039 2)	3.039 2)
1994	-	2.746	2.746
1995	-	837	837
1996	-	1.124	1.124
1997	-	1.280	1.280
1998	-	1.823	1.823

1) Gecorrigeerde cijfers tussen 1984 en 1992 door vertaling van de nieuwe Q(h)-relatie vanaf 01-01-1993 bij Borgharendorp rekening houdend met bodemdaling (HKV, 1999a).
2) Nieuwe cijfers op basis van Q(h)-relatie Borgharendorp vanaf 01-01-1993 (Barneveld en Bastings, 1998)

Tabel 4.4 Correcties jaarmaxima afvoeren van de hydrologische jaren (m³/s). (Rijkswaterstaat, 2001b)

4.4.4 Onzekerheden

Beoordeling NUSAP

Empirische kwaliteit:

- Basismetreeks: In de inleiding paragraaf 4.1.5 is vastgesteld dat de empirische kwaliteit van de jaarmaxima en afvoerpieken voldoet aan de in Tabel 4.1 gegeven beoordelingen.
- Verlenging basismetreeks: Het RIZA heeft geen extra historische data aan de meetreeks toegevoegd om daaruit de MA te berekenen, maar heeft op grond van die oudere data wel een uitspraak gedaan over de representativiteit van de basismetreeks. De herhalingstijden voor afvoeren hoger dan 3.000 m³/s blijken voor de twee historische meetreeksen (Tabel 5.) ongeveer gelijk maar de gezien de spreiding van het betrouwbaarheidsinterval is er sprake van een grote onzekerheid over de nauwkeurigheid. Voor de periode 1572-1997 zal het betrouwbaarheidsinterval minstens zo groot zijn. Wanneer de twee reeksen meer betrouwbaarheid hadden, dan was een uitspraak over de representativiteit meer gerechtvaardigd geweest. De empirische kwaliteit is dan ook laag omdat voor de conclusie van RIZA maar vier extreme hoogwaters in ruim 400 jaar voorhanden waren. Volgens de

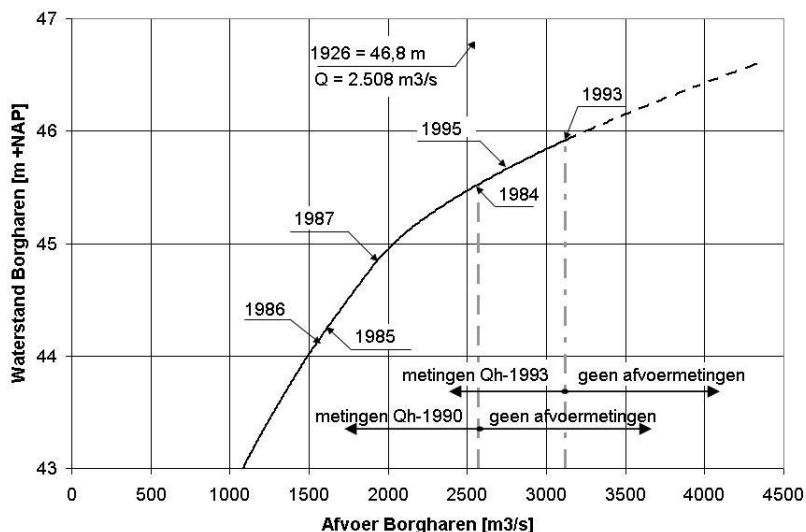
Pedigree tabel laat de empirische kwaliteit zich kenmerken door: “met enige kennis gemaakte schattingen, heel indirecte benaderingen, vuistregel schatting”, score is 1.

Methodische kwaliteit:

Voor de gebruikte basismetreeks wordt de beoordeling overgenomen van de analyse van het Boertien II onderzoek, waarvan de volgende correcties zijn bepaald (zie paragraaf 4.3.4):

- Correctie 8-uur topafvoeren: score is 1,5.
- Correctie door gewijzigde QH-relatie 1: score is 1,5.
- Correctie voor rivierwerken op de Waalse Maas: score is 2,5.
- Correctie voor onttrekkingen bovenstrooms: score is 3.

- Verlenging basismetreeks: De methode voor de bepalen van de representativiteit van de basismetreeks met herhalingstijden is reeds in de inleiding gewaardeerd met een score van 2.
- Correctie door gewijzigde QH-relatie 2: Voor het eerste onderzoeksalternatief van het RIZA-onderzoek zijn de laatste twee jaarmaxima van de Boertien II-reeks gecorrigeerd. De jaarmaxima tot en met 1993 van de Boertien II-reeks zijn gebaseerd op een QH-relatie van 1990. Voor het RIZA-onderzoek zijn de laatste twee afvoeren 1992 en 1993 gecorrigeerd aan de hand van de QH-relatie 1993. Het achteraf corrigeren van afvoeren met nieuwere QH-relaties is een controversiële methode en zou daarom niet moeten worden geaccepteerd. Daarentegen zijn de topafvoeren tussen de 2.500 en 3.000 m³/s op de QH-relatie 1993 vanwege de metingen tijdens het hoogwater van 1993 grotendeels geïnterpoleerd (vaststellen van waarden die liggen in een onbekend gebied tussen een bekend gebied) in plaats van geëxtrapolerd zoals in de QH-relatie van 1990. Daarvan is de meest recente hoge afvoer in de zomer van 1984 geweest, 500 m³/s lager dan de afvoer in 1993. Aan de hand van Figuur 4.4 wordt een en ander verduidelijkt.



Figuur 4.4 Jaarmaxima en QH-relatie.

Ten tijde van de vaststelling van de QH-relatie van 1990 was de afvoer van 1983 voor het laatst overschreden in 1926, waardoor het gebied boven de 1983-afvoer vrij onzeker is. In de Figuur zijn de jaarmaxima weergegeven waarbij de gemeten afvoer van 1926 ver boven de later vastgestelde QH-relatie 1993 ligt. Door het hoge waterstandsverschil is de oudste topafvoer niet meer geschikt voor de huidige QH-relatie. Op basis van hetgeen hiervoor verondersteld, kan worden afgeleid dat de afvoeren afgeleid van de nieuwe QH-relatie minder onzekerheid bevatten dan afvoeren afgeleid van de QH-relatie van 1990.

Voor de eerste onderzoeksvariant van de methode RIZA worden de volgende twee beschrijvingen van de Pedigree tabel aangehouden aangezien de methode als aanvaard en redelijk betrouwbaar kan worden geacht. Methode kwaliteit: “aanvaardbare methode, maar beperkte consensus op betrouwbaarheid”, score is 2 en “betrouwbare methode, die bekend is binnen de discipline”, score is 3. De uiteindelijke score komt op 2,5.

Bij de tweede onderzoeksvariant worden niet alleen de hoogwaters van '92 en '93 gecorrigeerd, maar ook de hoogwaters van 1984 t/m 1987. Het corrigeren van de afvoeren 1984-1987 aan de nieuwe QH-relatie neemt extra onzekerheden met zich mee. Het SOBEM-model dat is gebruikt voor het doorvoeren van de bodemligging van het zomerbed is een indirecte methode. Het model dat is gebruikt is voor het grootste gedeelte gebaseerd op veronderstellingen van de fysische werkelijkheid, zij het gekalibreerd met een bekende fysische situatie. Het simuleren van vroegere situaties blijft riskant. Het rekenen met een model brengt daardoor weer nieuwe onzekerheden met zich mee (Oreskes, 1994). De onzekerheden door het corrigeren van de afvoeren 1984-1987 zijn dus toegenomen. Het toepassen van een hydrodynamisch model is aanvaard maar vanwege de aannames betreffende de situatie in het verleden, niet volledig betrouwbaar. Twee omschrijvingen volgens NUSAP zijn kenmerkend: “niet bewezen methoden, twijfelachtige betrouwbaarheid”, score is 1 en “aanvaardbare methode, maar beperkte consensus op betrouwbaarheid”, score is 2. De uiteindelijke score komt op 1,5.

4.5 Hydraulische Randvoorwaarden 2006

4.5.1 Gebruikte basismetreeks

De jaarmaxima en afvoerpieken zoals gebruikt voor de frequentieanalyse betreffen de jaren 1911 tot en met 2003. De reeks van alternatief 2 uit de HR 2001 is gebruikt met verlenging van vijf jaren. Voor de HR 2006 zijn geen historische afvoeren van vóór 1911 gebruikt voor beoordeling van de representativiteit van de basismetreeks. De enige uitspraak in het rapport is dat van verder onderzoek naar de representativiteit geen nieuwe inzichten worden verwacht. In het HR 2001 onderzoek zijn de historische afvoeren $> 2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ van vóór 1911 niet werkelijk betrokken voor een beoordeling naar de representativiteit van de basismetreeks omdat deze niet voldoende betrouwbaar bleken te zijn. Met een almaar langer wordende tijdserie kan worden afgevraagd of de eerste decennia van de basismetreeks nog wel representatief is voor de laatste decennia. Van gebruikte tijdserie 1911-2003 is door de hoge dichtheid van afvoeren $> 2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ en $> 2.500 \text{ m}^3/\text{s}$ na 1990 een trend waar te nemen. Tabel 4.5 geeft een overzicht van de deze topafvoeren met een periodieke onderverdeling.

Periode (hydrologische jaren)	Aantal afvoeren > 2.000 m ³ /s	Aantal afvoeren > 2.500 m ³ /s
1984-2003	6	3
1964-1983	4*	0
1944-1963	2	0
1924-1943	3	1
1911-1923	2	0

Tabel 4.5 Het aantal topafvoeren met ondergrens.

*) de topafvoer van 1983 was een zomerafvoer

Wordt de analyse zoals uitgevoerd voor de HR2001 toegepast op de reeksen 1911-1963 en 1963-2003, dan kan worden geconcludeerd dat de reeks van vóór 1963 niet representatief is voor de reeks 1963-2003.

Volgens het rapport zijn de volgende aannames gedaan:

- Er wordt geen inschatting gemaakt van het effect van geplande rivierwerken in België en Frankrijk;
- Veranderingen in het stroomgebied zoals b.v. verstedelijking of andere veranderingen in landgebruik zijn in navolging van HR2001 niet bij de homogenisering meegenomen. Deze spelen immers bij extreme afvoeren een uitermate kleine rol;
- Geplande werken zijn voor zover bekend kleinschalig met alleen lokaal een effect;
- HR2006 betreft een momentopname van de huidige situatie; aan de effecten van klimaatverandering wordt geen aandacht besteed.

4.5.2 Correcties afvoergegevens

Voor de jaren 1995, 1996 en 1997 zijn correcties doorgevoerd op basis van de nieuwe QH-relatie 1998. In het rapport is de argumentatie over het corrigeren van deze afvoeren niet aangevoerd. Bestudering van de QH-relaties 1990 en 1998 uit het rapport van Barneveld (2004) en de tijdseries van de HR2001 en HR2006 maakt duidelijk waarop de correcties zijn gebaseerd. De afvoeren van 1995 (837 m³/s), 1996 (1124 m³/s) en 1997 (1280 m³/s) zijn met respectievelijk 1.4%, 0.8% en -12.7% toe- dan wel afgenomen. Vooral de afvoer van 1997 is behoorlijk gezakt. In het hoofdstuk 'QH-relaties' Figuur 3.18 worden de verschillen bevestigd waar zichtbaar is dat QH-relatie van 1998 vanaf $\pm 1.100 \text{ m}^3/\text{s}$ lager ligt dan de relatie uit 1990. De verlaging is veroorzaakt door de aanleg van kades en compensatiemaatregelen na de hoogwaters van 1993 en 1995 ten behoeve van het grootschalige project 'Deltaplan Grote Rivieren'. De correctie kan gezien worden als een gevolg van de geactualiseerde QH-relatie. De onzekerheidsbeoordeling is voor het toepassen van een nieuwe QH-relatie voor oudere afvoeren in overeenstemming met de HR 2001.

Als blijkt dat een nieuwe QH-relatie de oudere afvoeren beter beschrijft in verband met geometrische veranderingen in het stroomprofiel die niet verdisconteerd zijn in de oude QH-relatie, dan is corrigeren een aanvaardbare optie. Er kan worden aangenomen dat zonder een dergelijke reden niet gecorrigeerd wordt.

4.5.3 Onzekerheden

Beoordeling NUSAP

Empirische kwaliteit:

- Basismetreeks: In de inleiding paragraaf 4.1.5 is vastgesteld dat de empirische kwaliteit van de jaarmaxima en afvoerpieken voldoet aan de in Tabel 4.1 gegeven beoordelingen.
- Verlenging basismetreeks: Er zijn voor dit onderzoek geen oudere historische data toegevoegd of geanalyseerd dus kan een beoordeling achterwege blijven.

Methodische kwaliteit:

Voor de gebruikte basismetreeks wordt de beoordeling overgenomen van de analyse van het Boertien II onderzoek, waarvan de volgende correcties zijn bepaald (zie paragraaf 4.3.4):

- Correctie 8-uur topafvoeren: score is 1,5.
- Correctie door gewijzigde QH-relatie: score is 1,5.
- Correctie voor rivierwerken op de Waalse Maas: score is 2,5.
- Correctie voor onttrekkingen bovenstrooms: score is 3.

- Correctie door gewijzigde QH-relatie 2: Uit de analyse in paragraaf 4.5.2 is gebleken dat de methode als aanvaard en redelijk betrouwbaar kan worden geacht. Daardoor verdient de methode volgens de NUSAP omschrijvingen; "aanvaardbare methode, maar beperkte consensus op betrouwbaarheid", score is 2 en "betrouwbare methode, die bekend is binnen de discipline", score is 3, uiteindelijk een score van 2,5

4.6 Methode Klunhaar

4.6.1 Gebruikte basismetreeks

Er is voor het betreffende onderzoek gebruik gemaakt van de jaarmaxima en afvoerpieken van de periode 1911-1993 die voor het Boertien II onderzoek zijn samengesteld. De gebruikte meetreeks van Klunhaar is dus minder up-to-date dan de nu gehanteerde HR2006.

4.6.2 Toevoeging extra gegevens

In het onderzoek van Klunhaar zijn de hoogwaterregistraties van de periode 1400-1910 (Gottschalk, KNMI) toegevoegd voor gebruik van de a-priori informatieve verdeling. Met deze Bayesiaanse benadering is het mogelijk om subjectieve waarnemingsgegevens te betrekken in de frequentieanalyse. Opvallend verschil met de overige onderzoeken is dat er vanuit wordt gegaan dat de werkelijke afvoeren uit het verleden onbekend zijn. Uit de literatuur is bepaald of er sprake was van overstromingsschade of dat het een echte ramp betrof met verdrinkingslachtoffers, dijkdoorbraken, ondergelopen polders, weggespoelde huizen en ingestorte bruggen. Hiervan is de datum van optreden bekend. Op basis van deze waarnemingen zijn de hoogwaters ingedeeld in de volgende twee afvoercategorieën:

- 2.000 $Q \leq 2.500 \text{ m}^3/\text{s}$, als de informatiebronnen overstromingsschade vermelden,
- $Q > 2.500 \text{ m}^3/\text{s}</math>, als de informatiebronnen een ramp vermelden.$

Omdat het gaat om subjectieve waarnemingen (beoordeling overstromingsschade of ramp is namelijk afhankelijk van persoonlijke zienswijze) heeft Klunhaar de Bayesiaanse statistiek toegepast. Meer over de toepassing ervan in hoofdstuk 5.

De gegevens tellen 14 hoogwaters met een afvoer > 2.500 m³/s en 58 hoogwaters met een afvoer van > 2.000 m³/s en ≤ 2.500 m³/s. Daarmee onderscheidt het onderzoek van Klunhaar zich met Gerretsen aangezien Gerretsen alleen de hoogwaters > 2.750 m³/s heeft toegevoegd. Uit de subjectieve waarnemingen is vervolgens geschat dat er in de periode 1400-1910 in ongeveer 1 op de 5 overstromingen sprake was van een ramp.

4.6.3 Correcties afvoergegevens

De gebruikte basismetreeks is hetzelfde als in het Boertien II onderzoek zodat ook de correcties daarmee overeen komen. Voor de analyse wordt gerefereerd naar paragraaf 4.3.3. Voor de 'toegevoegde' hoogwaters zijn geen correcties toegepast omdat daarvoor geen aanleiding was vanwege de analysemethode. De nauwkeurigheid omtrent de hoogte van de hoogwaters wordt door de aanname van het 500 m³/s brede interval door Klunhaar als ondergeschikt aangenomen. De nadruk ligt puur op het betrekken van hoge tot zeer hoge afvoeren in het verleden als een algemeen feit, en niet als een empirisch feit.

4.6.4 Onzekerheden

Beoordeling NUSAP

Empirische kwaliteit:

- Basismetreeks: In de inleiding paragraaf 4.1.5 is vastgesteld dat de empirische kwaliteit van de jaarmaxima en afvoerpieken voldoet aan de in Tabel 4.1 gegeven beoordelingen.
- Verlenging basismetreeks: De empirische kwaliteit van de gebruikte gegevens is vanwege de subjectieve registraties middelmatig te noemen. Er is sprake van heel indirecte benaderingen en een vuistregel schatting, doelend op het categoriseren van de afvoeren. De omschrijving volgens de NUSAP Pedigree tabel: "met enige kennis gemaakte schattingen, heel indirecte benaderingen, vuistregel schatting", score is 1.

Het aantal gebruikte hoogwaters van 72 is echter vele malen hoger dan in de overige onderzoeken maar blijft in relatie tot de 'gewenste' 1250 jaar beperkt. Daarmee is de tweede NUSAP omschrijving: "Historische/veldgegevens, ongecontroleerde experimenten, klein aantal directe metingen", score is 3. De uiteindelijke score is het gemiddelde van 2.

Methodische kwaliteit:

Voor de gebruikte basismetreeks wordt de beoordeling overgenomen van de analyse van het Boertien II onderzoek, waarvan de volgende correcties zijn bepaald (zie paragraaf 4.3.4):

- Correctie 8-uur topafvoeren: score is 1,5.
- Correctie door gewijzigde QH-relatie: score is 1,5.
- Correctie voor rivierwerken op de Waalse Maas: score is 2,5.
- Correctie voor onttrekkingen bovenstrooms: score is 3.
- Verlenging basismetreeks: Voor de verlenging zijn in verhouding met de basismetreeks relatief veel subjectieve waarnemingen gebruikt. Bij de Bayesiaanse statistiek draait het juist om het verdisconteren van subjectieve waarnemingen of gegevens. Vanuit het oogpunt van de Bayesiaanse statistiek is het meenemen van historische subjectieve waarnemingen dus een gebruikelijke methode. Voor zover laat de methode zich omschrijven als een "betrouwbare methode, die bekend is binnen het discipline", score is 3.

4.7 Methode Gerretsen

4.7.1 Gebruikte basismetreeks

Bij de methode van Gerretsen zijn twee reeksen onderzocht waarvan er uiteindelijk één gebruikt is voor het verdere onderzoek. De eigenschappen van beide reeksen worden hieronder toegelicht:

- De meetreeks: Als basis voor de meetreeks hebben dezelfde waterstanden en QH-relaties gediend zoals ook gebruikt voor het Boertien II onderzoek, echter de correcties zijn verschillend. Verder is een verschillende QH-relatie vanaf de jaren 1992 gebruikt. De meetreeks heeft vanwege de alternatieve homogenisering een bijna compleet verschillende reeks jaarmaxima ten opzichte van de Boertien II maar is vrijwel gelijk aan de ongecorrigeerde geregistreerde (DTBEST) reeks jaarmaxima.
- De Boertien-reeks: Voor de samenstelling van deze reeks wordt verwezen naar § 4.3.

Voor het verdere onderzoek is gebruik gemaakt van alleen de meetreeks. De keuze wordt door Gerretsen onderbouwd doordat 'in de praktijk aan geringe onzuiverheden in de metingen toch al niet te ontkomen is en dat de sinds 1911 opgebouwde Rijkswaterstaatreks (DTBEST) niet moet worden gefrustreerd als daartoe geen duidelijke aanleiding is' (RIZA, 2002).

De Meetreeks is gebruikt om twee onderzoeksobjecten op te baseren. Deze bestaan uit respectievelijk:

- De meetreeks jaarmaxima te Borgharen uit de periode 1911-1999, aangevuld met de zeer hoge hoogwaters uit de historische jaren 1643, 1740, 1850 en 1880.
- de meetreeks van alle afvoergolven te Borgharen hoger dan 1335 m³/s uit de periode 1911-1999 (afvoerpieken).

4.7.2 Verlenging basismetreeks

De Meetreeks wordt door Gerretsen aangevuld met de zeer hoge hoogwaters uit de historische jaren 1643, 1740, 1850 en 1880. Het betreffen hier dezelfde topafvoeren zoals ook geanalyseerd in het Boertien II onderzoek en de HR 2001. De historische topafvoeren zijn aan de bestaande reeks jaarmaxima toegevoegd door gebruik te maken van getransformeerde rangnummers. Het transformeren van het rangnummer is nodig omdat de historische afvoeren niet bestaan uit een continue reeks jaarregistraties. Een voorbeeld van de tien hoogste afvoeren uit reeks is in Tabel 4.6 gegeven.

Jaar	Afvoer	Rang nr. getransformeerd	Herhalingstijd in jaren volgens Gerretsen	Herhalingstijd In jaren volgens HR 2001
1926	3175	1	430	187
1643	3075	2	215	140
1993	3039	3	143	126
1740	3020	4	108	120
1880	2950	5	86	98
1850	2850	6	72	73
1994	2750	7	61	55
1983	2550	8	36	31
1992	2280	9	26	14
1919	2279	10	20	14

Tabel 4.6 Herhalingstijden jaarmaxima (Gerretsen, 2001)

Om het verschil met de RWS gebruikte studie te verduidelijken zijn de herhalingstijden berekend conform de resultaten van de frequentieanalyse van de HR 2001 in de tabel toegevoegd. Al wordt de conclusie in het HR 2001 rapport over de representativiteit van de basismetreeks voor de langere periode in dit afstudeerrapport niet volledig aanvaard, het toepassen van de methode met getransformeerde rangnummers leidt voor de hoogste extreme afvoer wel tot een zeer kleine kans van optreden. Er zijn in de vorige eeuw al twee afvoeren boven de 3.000 m³/s geweest dus de verwachting gaat meer uit naar kortere herhalingstijden.

4.7.3 Correcties afvoergegevens

Correctie 8-uur topafvoeren:

De meetreeks heeft één correctie ondergaan voor de gemeten 8-uur jaartoppen uit de periode 1911-1950. Tijdens het Boertien II onderzoek is deze correctie ook doorgevoerd, zij het met andere parameters (zie § 4.3.3). Zo zijn voor de verschillende afvoerintervallen relaties gemaakt (gekalibreerd aan de hand van de wél beschikbare absolute toppen vanaf 1960) waarmee de absolute toppen berekend kunnen worden. Op drie intervallen is met verschillende formules geïnterpoleerd:

1: ($500 \leq Q \leq 1200$) en 2: ($1200 \leq Q \leq 2200$) en 3: ($2200 \leq Q \leq 3100$)

Bij interval 1 zijn de stuwen in Wallonië en Borgharen in bedrijf, bij interval 2 alleen de stuw in Wallonië en bij interval 3 zijn geen stuwen in werking zodat een vrij afstromende situatie is bereikt.

Voor het Boertien II onderzoek waarin ook 8-uur correcties zijn doorgevoerd, resulteerde de analyse in een afvoercorrectie van 35 m³/s voor de gehele periode 1911-1950 met voor de latere periode nog enkele correcties. Gerretsen heeft door het onderscheid in correctiefactoren vanwege het stuwbeheer mogelijk een betere benadering, de onmogelijkheid voor verificatie geeft geen garantie voor minder onzekerheid over de correctie dan toegepast tijdens het Boertien II onderzoek.

Correctie historische afvoeren:

Voor de historische jaren 1643, 1740, 1850 en 1880 is een correctie van 5% toeslag uitgevoerd. Deze kan enigszins overschat zijn, en wordt daarom volgens Gerretsen beschouwd als een veilige aanname, mede vanwege kleine schaal ontbossingen in de 16e tot de 18e eeuw.

4.7.4 Onzekerheden.

Beoordeling NUSAP

Empirische kwaliteit:

- Basismetreeks: In de inleiding paragraaf 4.1.5 is vastgesteld dat de empirische kwaliteit van de jaarmamaxima en afvoerpieken voldoet aan de in Tabel 4.1 gegeven beoordelingen.
- Verlenging basismetreeks: De afvoeren die gebruikt zijn voor verlenging van de basismetreeks zijn ontleent van de publicatie "Historische hoogwaters Rijn en Maas voor 1900. Lorenz, 1997". In tegenstelling tot het Boertien II onderzoek en de HR 2001 zijn alleen de historische afvoeren waarvan de afvoerhoogte (in plaats van afvoerklasse-indeling) is geregistreerd, meegenomen. De afvoeren van 1643, 1740, 1850 en 1880 zijn achtereenvolgens 3.075, 3.020, 2.950 en 2.850 m³/s, inclusief correctie. De NUSAP beoordeling voor de empirische kwaliteit van deze afvoeren komt overeen met de omschrijving: "gemodelleerde gegevens, indirecte maten, handboek schattingen", score is 2

Methodische kwaliteit:

- Correctie 8-uur topafvoeren: De beoordeling van de correctie kan worden overgenomen van het Boertien II onderzoek. De beoordeling volgens NUSAP komt overeen met twee omschrijvingen: "niet bewezen methoden, twijfelachtige betrouwbaarheid", score is 1 "En aanvaardbare methode, maar beperkte consensus op betrouwbaarheid", score is 2. De uiteindelijke score is 1,5.
- Verlenging basismetreeks: Van de toegevoegde historische data ter uitbreiding van de meetreeks kan op voorhand al gesteld worden dat deze hogere onzekerheden bevat dan de gebruikelijke meetreeks. Gerretsen heeft een gedeelte van de topafvoeren toegevoegd die eerder door Rijkswaterstaat zijn geanalyseerd. Volgens het rapport (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1993) waarin wordt gerefereerd naar een publicatie van 'Vereerstraten', hebben de piekafvoeren uit de historische jaren 1643, 1740, 1850 en 1880 "een zeer onzekere waarde en is het meenemen van historische afvoeren buiten de aaneengesloten reeks omstreden". Onder het subjectieve gedachtegoed zijn er ook redenen om de afvoeren wél in de frequentieanalyse te betrekken. Het mag duidelijk zijn dat extreme afvoeren in het verleden nooit onopgemerkt voorbij gingen omdat er nauwelijks bescherming was tegen overstromingen. Over het vóórkomen op een bepaalde datum zal niet veel twijfel bestaan. Het neemt niet weg dat door de lage verifieerbaarheid een verhoudingsgewijs grote onzekerheid bestaat rond deze historische afvoeren. Het meenemen van de vier historische hoogwaters vóór 1911 in de statistische berekeningen voor de maatgevende afvoer is nog niet eerder gebeurd. Met het meenemen van alleen extreem hoge afvoeren en bijvoorbeeld niet de afvoeren tussen 2.000 en 2.750 m³/s gaat in de frequentieanalyse het gewicht naar de extreme afvoeren, wat afbuiging van de kansverdelingfunctie veroorzaakt. Gerretsen heeft omwille van een betere fit gekozen voor een geknikte verdeling. In het volgende hoofdstuk wordt daarop verder ingegaan. Uiteraard is het betrekken van extra beschikbare data niet minder dan gewenst gezien de relatief korte meetreeks. Maar de samenstelling van de toegevoegde afvoeren is wel erg eenzijdig met alleen de vier meest extreme topafvoeren. De methodebeschrijving volgens de NUSAP-matrix: "aanvaardbare methode, maar beperkte consensus op betrouwbaarheid", score is 2.

4.8 Overzicht beoordeling onzekerheden

De alternatieve methoden verschillen in het bijzonder van de methode Rijkswaterstaat door de toevoeging van extra historische gegevens met daarna elk een eigen wijze van analyseren. De empirische kwaliteit van de basismetreeks is voor de alternatieve methoden nagenoeg gelijk en verschillen alleen door de lengte van de meetreeks.

De empirische kwaliteit van de basismetreeks bestaat uit een serie beoordelingen. Om tot een enkele beoordeling te komen in verband met de toepassing voor de statistiek (de tijdserie wordt voor de frequentieanalyse met enkele parameters 'beschreven') worden de scores afhankelijk van de lengte van periode gewogen gemiddeld. De werkwijze is beschreven in hoofdstuk 6. De tabellen 4.7 en 4.8 zijn beide afkomstig uit paragraaf 6.1.2.

Gekwalificeerde onzekerheden	Boertien I	Boertien II	HR 2001	HR 2006	Klunhaar	Gerretsen
Methodisch						
Tijdserie	2.86	2.86	2.86	2.87	2.86	2.86
			1.5	1.5		
		1.5	1.5	1.5	1.5	
		1.5	2.5	2.5	1.5	
Correcties	1	2.5	3	3	2.5	
	1.5	3	2.5	2.5	3	1.5
Verlenging tijdserie					3	2
gemiddelde	1.79	2.27	2.31	2.31	2.39	2.23

Tabel 4.7 Overzicht beoordeling methodische kwaliteit voor omgang tijdserie hoge Q volgens NUSAP

Gekwalificeerde onzekerheden	Boertien I	Boertien II	HR 2001	HR 2006	Klunhaar	Gerretsen
Empirisch						
Basismetreeks	2,37	2,37	2,37	2,22	2,43	2,37
Toegevoegde Historische afvoeren					2	2
Methodisch	1,25	2,13	2,2	2,2	2	1,75

Tabel 4.8 Overzicht empirische en methodische beoordeling kwaliteit volgens NUSAP

5. Statistiek

5.1 Inleiding

Dit hoofdstuk behandelt de statistische bewerkingen op de reeks jaarmaxima die gebruikt worden om te komen tot de maatgevende afvoer. De bewerking bestaat uit de analytische frequentie analyse. Dit is het fitten van curven aan de jaarmaxima met een analytische procedure bestaande uit het selecteren van een frequentie verdeling, het schatten van de parameters van de verdeling met daarvoor bestemde technieken en tenslotte het evalueren van de verdelingsfunctie op verschillende karakteristieken.

Van de zes onderzoeken die in het hoofdstuk 'Tijdserie hoge Q' zijn geanalyseerd wordt nu de statistische aanpak belicht. De resultaten van de door Rijkswaterstaat gestuurde onderzoeken zullen vergeleken worden met alternatieve onderzoeken. Vervolgens wordt door middel van een gevoeligheidsanalyse bekeken wat het effect op de maatgevende afvoer is wanneer veranderingen in de data worden aangebracht. De verschillende onderzoeksmethoden worden volgens de NUSAP methode getoetst op de epistemologische onzekerheid onderverdeeld in empirische- en methodekwaliteit en statistische onzekerheid. Tot slot worden de resultaten van de berekeningen vergeleken. De berekeningsresultaten bestaan uit de een maatgevende afvoer en een betrouwbaarheidsinterval. Het betrouwbaarheidsinterval kan worden gezien als een marge rond de uitkomst waarvan met een bepaalde betrouwbaarheid, uitgedrukt in een percentage, kan worden gezegd dat de uitkomst tussen die marge ligt. Wanneer het interval relatief smal is, dan bestaat er meer zekerheid rond de uitkomst. Dit kan alleen verkregen worden door: 1. een grote hoeveelheid data over een groot meetbereik te gebruiken, en 2. een consistente datastructuur. Deze wordt met name beïnvloed door het aantal opgetreden extreme afvoeren in verhouding met de lengte van de meetreeks. De meetreeks is relatief kort en de drie extreme afvoeren die opgetreden zijn in de periode 1911-2006 hebben een negatieve invloed op de consistentie van de meetreeks. Het betrouwbaarheidsinterval van de maatgevende afvoeren zoals berekend in de diverse onderzoeken is nogal breed. Bijvoorbeeld het betrouwbaarheidsinterval van de maatgevende afvoer volgens de HR 2006 welke bijna $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$ breed is bij een MA van $4.000 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.1.1 Overzicht van in de onderzoeken toegepaste statistiek

RWS onderzoeken

Sinds het eerste onderzoek van de Commissie Boertien is de procedure voor bepaling van de maatgevende afvoer nauwelijks meer verandert. Deze bestaat uit het analyseren van de beschikbare jaarmaxima met eventueel het homogeniseren van oudere afvoeren, gevolgd door het gebruik van vier aanvaarde statistische verdelingsfuncties waarmee de afvoeren behorende bij verschillende herhalingstijden worden berekend. Sinds in 1996 naar aanleiding van de Hydraulische Randvoorwaarden iedere vijf jaar de primaire waterkeringen getoetst moeten worden, voert WL I Delft Hydraulics de berekeningen uit. Doordat de berekeningsprocedure ongewijzigd is gebleven hoeven alleen de laatste vijf jaarmaxima te worden toegevoegd aan de invoerreeks. En met het ongewijzigd blijven van de verdelingsfuncties blijft het voordeel bestaan dat de resultaten van de berekeningen goed te vergelijken zijn met eerdere berekeningen. De alternatieve methoden wijken in veel opzichten af van de RWS statistiek voor berekening van de maatgevende afvoer. Tabel 5.1 geeft een overzicht van de belangrijkste kenmerken van de geëvalueerde onderzoeken.

Onderzoeken Rijkswaterstaat	Reeks jaarmaxima	Statistiek	Schatting Parameters	Par.
Commissie Becht (1977)	1911-1976	Exponentieel	MOM	-
Commissie Boertien I (1993)	1911-1992	Gumbel, Pearson-III, Lognormaal, Exponentieel	MLE MLE MLE MOM	5.2.1
Commissie Boertien II (1994)	1911-1993	Als Boertien I	Als Boertien I	5.2.2
Hydraulische Randvoorwaarden (2001)	1911-1999	Als Boertien I + Rayleigh	Als Boertien I MOM	5.2.3
Hydraulische Randvoorwaarden (2006)	1911-2003	Als Boertien I	Als Boertien I	5.2.4
Alternatieve onderzoeken				
	1911-1999	Klassieke statistiek (vershoven Exponentieel)	MOM	
Klunhaar (2003)	1911-1999 1400-1910	Bayesiaans (gamma en beta verdeling)	Bayesiaans	5.2.5
Gerretsen (2001)	1911-1999 1571-1910	Combinatie van Normaal en Pearson- III	MOM	5.2.6
Gevoeligheidsanalyse	1911-2003	Als Boertien I	MOM	5.2.7

Tabel 5.1 Overzicht statistische kenmerken van de onderzoeken

MI F = Maximum Likelihood Estimation MOM = Method Of Moments

Alternatieve onderzoeken

In het onderzoek van Klunhaar zijn drie berekeningsmethoden vergeleken waarin de Bayesiaanse statistiek de hoofdrol speelt. De resultaten van de methoden zijn in het onderzoek vergeleken met de door Boertien II gehanteerde statistiek en de klassieke statistiek. De klassieke statistiek bestaat hier uit een verschoven Exponentiele verdeling waarbij gebruik is gemaakt van een partiele afvoerreeks met als ondergrens 2.000 m³/s (in tegenstelling met de door Boertien II gebruikte ondergrens van 1.300 m³/s). De Bayesiaanse statistiek berust in het betreffende onderzoek op het vertalen van een a priori verdelingsfunctie – gebaseerd op historische waarnemingen tussen 1400 en 1910 - naar een a posteriori verdelingsfunctie voor inpassing met de bestaande meetreeks 1911-1999.

Gerretsen heeft in verband met de gestuwde- en ongestuwde toestand van de Waalse Maas en de daarmee samenhangende waterberging buiten het zomerbed een geknikte verdelingsfunctie toegepast. Hiervoor is gebruik gemaakt van de jaarmaxima 1911-1999 en een aantal historische extreme afvoeren waarvan de herhalingstijden met behulp van een statistische methode (getransformeerde rangnummers) zijn geschat. Zodoende konden de historische waarden worden toegevoegd aan de reeks jaarmaxima met inbegrepen de herhalingstijden. Vanwege de gekozen knik in de reeks afvoerdata wordt voor de frequentieanalyse gebruik gemaakt van een samengestelde

verdeling. Zo zijn voor de afvoeren onder en boven een grenswaarde in de serie jaarmaxima twee aparte verdelingsfuncties gefit.

Gevoeligheidsanalyse

Om een uitspraak te doen over de robuustheid van het model (de verdelingsfuncties) is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Daarvoor worden in de invoerdata veranderingen aangebracht waarna van de afzonderlijke verdelingsfuncties de resultaten worden vergeleken. Het veranderen van de invoerdata heeft alleen betrekking op de lengte van de reeks jaarmaxima. Het effect op de maatgevende afvoer en het betrouwbaarheidsinterval kan op deze manier inzichtelijk worden gemaakt. Het belangrijkste beoordelingscriterium hierbij is het betrouwbaarheidsinterval omdat deze de meest directe aanwijzing geeft voor de statistische onzekerheid. Met het variëren van de meetreekslengte verandert tegelijk de consistentie van de datastructuur. De analyse bestaat onder andere uit het kiezen van een begindatum van registreren. Bij het alternatief met begindatum 1930 wordt het hoogwater van 1926 buitengesloten. Het effect hiervan op de maatgevende afvoer en het betrouwbaarheidsinterval wordt in de gevoeligheidsanalyse bestudeerd. Verder worden de verdelingsfuncties die voor de RWS onderzoeken zijn gebruikt, afzonderlijk geanalyseerd waarna vergeleken op de effecten van de meetreekslengte.

De vraag is onder andere vanaf welke lengte (het aantal jaren na de eerste meting in 1911) de resultaten van de verdelingsfuncties een soort evenwicht bereiken. Hierbij worden zowel de maatgevende afvoeren als de betrouwbaarheidsintervallen bekeken. Het is te verwachten dat bij een langere meetreeks, het toevoegen van een jaarmaximum een steeds kleiner effect heeft op de uitkomst van het model. In hoeverre daarvan sprake is zal blijken uit de analyse. Vervolgens kan een indicatie gegeven worden van de resultaten van berekeningen in de toekomst.

5.1.3 Werkwijze frequentieanalyse

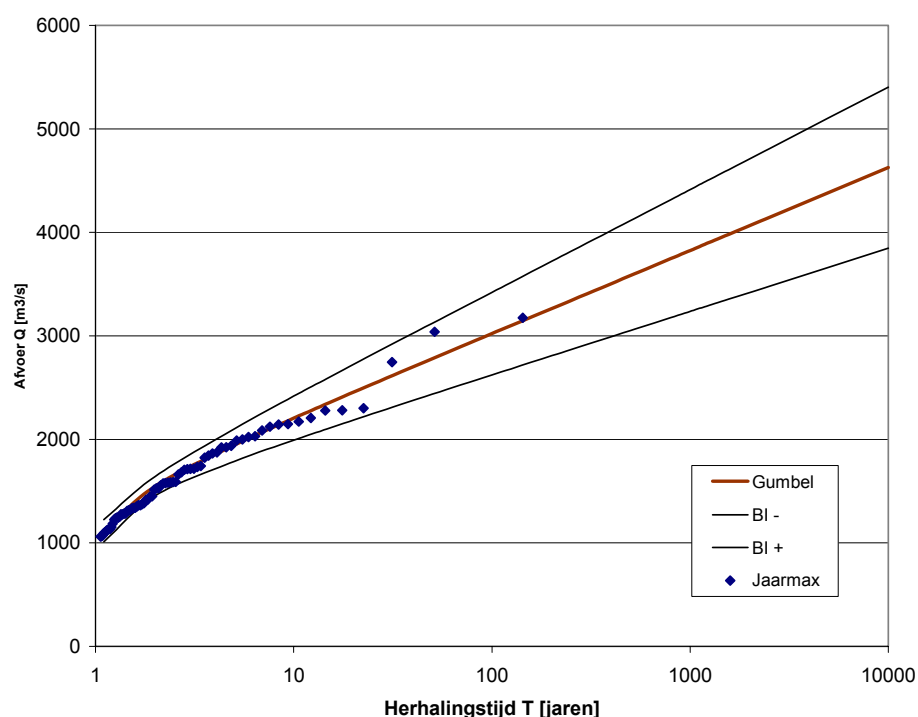
Bij de frequentieanalyse gaat het om het fitten van een verdelingsfunctie aan de reeks jaarmaxima. Het is de bedoeling om een verdelingsfunctie te vinden die zo goed mogelijk overeen komt met de statistische karakteristieken van de reeks jaarmaxima of afvoerpieken.

Methoden

Welke frequentieverdeling het beste past bij de reeks jaarmaxima is op twee manieren te bepalen namelijk:

1. zuiver rekenkundig,
 2. combinatie van rekenkundig en visueel. Hierbij worden drie methoden onderscheiden.
1. Met de rekenkundige werkwijze wordt eerst met een daarvoor bestemde methode een parameterschatting (zie volgende paragraaf) uitgevoerd. De verdelingsfunctie is dan aangepast op de reeks jaarmaxima. Daarna volgt een beoordeling met gebruik van een toets om te bepalen of de aanpassing van de verdelingsfunctie aan de reeks jaarmaxima overtuigend is. Twee veelgebruikte toetsen zijn de Kolmogorof-Smirnov (KS) toets en de Chi-kwadraat (χ^2) toets. Bij de KS-toets wordt het maximale verschil bepaald tussen de verwachtingen (F), volgens de waarschijnlijkheidsverdelingen van de meetwaarden, en de overschrijdingskansen (P) van de waargenomen meetwaarden (Gerretsen, 2001). De χ^2 -toets heeft nog extra criteria zoals het minimaal aantal meetpunten per klasse en de afvoerklasse-indeling. Met een statistisch programma zoals SPSS zijn deze toetsen relatief eenvoudig uit te voeren. Voor de alternatieve studie van Gerretsen is deze methode toegepast.

2. a. De eerste methode met de combinatie van rekenkundige en visuele schatting gaat als volgt: Ten eerste worden de plotposities van de jaarmaxima bepaald. De plotpositie wordt verkregen door van elke afvoer de onderschrijdingskans te bepalen, meestal aangegeven als herhalingstijd. De methode bestaat uit het rangschikken alle jaarmaxima op grootte waarna de bijbehorende onderschrijdingskans wordt berekend met een gebruikelijke formule. In bijlage 5 zijn deze formules gegeven met een voorbeeld. Vervolgens worden de afvoeren met bijbehorende onderschrijdingskans op logaritmisch plotpapier uitgezet. Het fitten van de verdelingsfunctie bestaat daarna uit het visueel schatten van een rechte lijn die met een liniaal wordt getrokken tussen de punten, zodanig dat het totale verschil tussen punten en lijn zo klein mogelijk is. Het doortrekken van de lijn voorbij de hoogste afvoer is vergelijkbaar met een extrapolatie. Daaruit kan de afvoer behorende bij een onderschrijdingskans 'p' van bijvoorbeeld 0,992 overeenkomend met een herhalingstijd T van 1250 jaar worden afgelezen, immers $T = 1/(1-p)$. Er wordt dus niet van een verdelingsfunctie gebruik gemaakt. Tegenwoordig wordt deze methode niet meer toegepast omdat met rekenmodellen nauwkeuriger kan worden gewerkt en verschillende verdelingsfuncties zijn toe te passen. Daardoor worden alternatieve berekeningsresultaten verkregen zodat de afweging (de keuze voor de maatgevende afvoer) niet alleen op een enkel resultaat berust.
- b. Bij de tweede methode worden de plotposities van de jaarmaxima berekend en apart een verdelingsfunctie. De verdelingsfunctie is in tegenstelling tot de eerste methode niet afhankelijk van de plotpositie van de jaarmaxima. Het fitten van de verdelingsfunctie wordt net als bij de zuivere rekenmethode gedaan met behulp van een parameterschattingsmethode. Vervolgens worden beide resultaten in één Figuur weergegeven evenals als bij de hiervoor beschreven methode. In Boertien I is de keuze van de meest geschikte verdelingsfunctie onder andere gebaseerd op een visuele beoordeling van deze weergave. De voorkeur ging uit van die verdeling waar het verschil tussen de plotposities van de jaarmaxima en de lijn van de verdelingsfunctie het kleinst is. De gekozen verdelingsfuncties in Boertien I zijn in de vervolgonderzoeken Boertien II, HR2001 en HR2006 ook toegepast zonder dat daarin een beoordeling van de fit heeft plaatsgevonden. Wel zijn de verdelingsfuncties tezamen met de plotposities van de jaarmaxima afgebeeld. Een voorbeeld is gegeven in Figuur 5.1 op de volgende pagina waar de Gumbel verdeling is gefit op de reeks jaarmaxima van 1911-2001.
- c. In Bijlage 6 zijn de histogrammen van de jaarmaxima met daarbij de vier kansverdelingen uit het Boertien I onderzoek weergegeven. Hiermee kan eveneens een visuele beoordeling voor de fit van de kansverdelingsfuncties worden uitgevoerd. Deze methode is niet gebruikelijk maar geeft wel meer inzicht in de eigenschappen van de verdelingsfunctie. Een verdelingsfunctie is te gebruiken als cumulatieve verdelingsfunctie en als kansdichtheidsfunctie. Bij de overige methoden wordt de cumulatieve verdelingsfunctie gebruikt maar in dit geval moet de afgeleide kansdichtheidsfunctie worden toegepast. Met de weergave van het histogram en de kansdichtheidsfunctie kan in één oogopslag de ligging en vorm van de type verdelingsfunctie ten opzichte van de jaarmaxima (frequentie) worden weergegeven. De Normale verdeling is eraan toegevoegd om aan te geven dat deze een minder goede aanpassing heeft aan het histogram welke zekere scheefheid bezit. De andere verdelingen zijn op scheefheid aan te passen zodat er een betere fit ontstaat. Bestudering van de figuren maakt duidelijk dat de door Rijkswaterstaat aanvaarde verdelingsfuncties een redelijk tot goede voorstelling geven van de reeks jaarmaxima. De verdelingsfuncties (Pearson-III, Lognormaal, Gumbel en Exponentieel) worden daarom ook voor de gevoeligheidsanalyse gebruikt.



Figuur 5.1 Gebruikelijke weergave van een frequentieanalyse met plotposities jaarmaxima en het betrouwbaarheidsinterval, Gumbel verdeling

De punten in de grafiek zijn de jaarmaxima die met behulp van een plotpositie formule aan herhalingsperiodes (T) zijn gekoppeld. In geen van de geëvalueerde onderzoeken is het fitten van de kansverdelingen op grafische wijze gebeurd. Alleen in dat geval biedt het plotten van de afvoeren een toegevoerde waarde. Op basis van een visuele beoordeling zou de fit voor de Gumbel verdeling wel voldoen. Uiterst rechts ligt het hoogst gemeten jaarmaximum uit 1926. De middelste lijn is de fit van de verdelingsfunctie. Afhankelijk van het soort verdelingsfunctie en parameterschatting ligt de nadruk van de fit op een bepaald gebied van de jaarmaxima. De twee buitenste lijnen geven het betrouwbaarheidsinterval weer. Op het afvoerbereik met een hoge datadichtheid (lagere afvoeren) is het fitten nauwkeuriger gebeurd waardoor het betrouwbaarheidsinterval daar smaller is. De verdelingsfunctie en het betrouwbaarheidsinterval zijn vervolgens geëxtrapoleerd buiten het gegevensbereik om de afvoer behorende bij hogere herhalingsperiodes te bepalen.

Parameterschatting

Bij een niet-visuele fit van de verdelingsfunctie wordt gekozen voor het rekenkundig schatten van de parameters. Elke kansverdelingsfunctie heeft een verschillend aanpassingsvermogen, mede afhankelijk van het aantal parameters. Deze zijn bepalend voor de locatie, spreiding, schaal, scheefheid en welving (kurtosis) van de verdeling. Een overzicht van de gebruikte verdelingsfuncties met MOM-parameters is gegeven in bijlage 7. Het fitten van de verdelingsfunctie Het bepalen / schatten van de parameters kan op verschillende manieren, te weten:

1. De methode der momenten (MOM),
2. De methode der grootste aannemelijkheid (MLE),
3. De methode der kleinste kwadraten (MLS)

Ad. 1: De schatting met behulp van de MOM-methode houdt in dat de momenten van de kansverdeling worden gelijkgesteld aan de momenten van de steekproef (Klunhaar, 2003). De steekproef bestaat hier uit de reeks jaarmaxima. De twee bekendste parameters zijn de verwachting μ en de variantie σ^2 , het eerste moment en het tweede centrale moment. De verwachting en variantie worden geschat aan de hand van het steekproefgemiddelde \bar{X} en de steekproefvariantie S^2 van de jaarmaxima.

De MOM-methode wordt bij een aantal berekeningsmethoden die in dit hoofdstuk aan bod komen gebruikt. Voor de onderzoeken van Rijkswaterstaat zijn alleen de parameters van de Exponentiele verdeling geschat met de MOM-methode. De voor dit onderzoek uitgevoerde gevoeligheidsanalyse is voor het grootste gedeelte gebaseerd op de MOM-methode. De alternatieve studie van Gerretsen maakt ook gebruik van de MOM-methode.

Ad. 2: Voor de onderzoeken van Boertien I, II de HR2001 en HR2006 is de MLE methode gebruikt voor drie typen kansverdelingsfuncties. De MLE methode geeft vanwege het iteratieproces een wat betere afstemming tussen statistische karakteristieken van de steekproef en de verdelingsfunctie. Bij het iteratieproces wordt gestreefd naar die waarden van de parameters waarbij maximalisatie van de aannemelijkheidsfunctie optreedt. De aannemelijkheidsfunctie geeft een zo goed mogelijke benadering van de gevonden waarnemingen die ontstaan als de originele functie wordt gebruikt van de parameter die men wil benaderen. De benadering van de parameter loopt dus via een benadering van de steekproeffuncties (Poortema, 2002).

Ad. 3: De methode der kleinste kwadraten is afkomstig uit de regressieanalyse en wordt gebruikt voor het aanpassen van functies aan waarnemingen. De parameters van de functie worden zo gekozen dat de som van de gekwadrateerde afwijkingen tussen waargenomen waarden en berekende waarden minimaal is (Klunhaar, 2003). Van de waargenomen waarden x_i – de jaarmaxima – wordt een geschatte onderschrijdingskans 'p_i' met behulp van een plotting position formule (zie bijlage 5) berekend. Vervolgens worden de berekende onderschrijdingskansen $F(x_i)$ daar vanaf getrokken en het verschil gekwadrateerd. Deze methode is te vergelijken met het visueel schatten van de functie aan de plotposities van jaarmaxima.

5.1.4 Onzekerheden

Zowel voor de huidige methode van Rijkswaterstaat (volgens Hydraulische Randvoorwaarden 2001) als de alternatieve studies worden de onzekerheden gekwalificeerd. De resultaten van de alternatieve studies Klunhaar en Gerretsen kunnen het beste vergeleken worden met respectievelijk het Boertien II onderzoek en de HR2001 aangezien deze qua basismetreeks het meest overeen komen.

In dit hoofdstuk wordt het derde kwaliteitsaspect – de statistische kwaliteit – toegevoegd aan de analyse. Dit in tegenstelling tot het vorige hoofdstuk waar alleen de methodische en empirische kwaliteit zijn beoordeeld.

NUSAP Beoordeling

Statistische kwaliteit

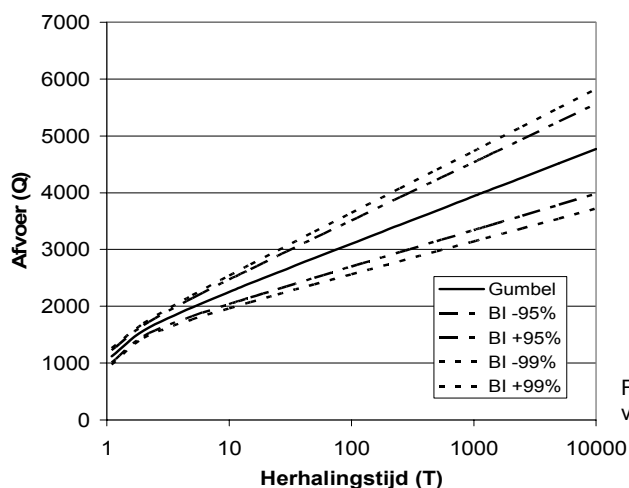
Bij de beoordeling van de statistische kwaliteit spelen drie belangrijke criteria een rol. Het eerste criterium is overgenomen uit een rapport van het HKV *lijn in water* in opdracht van Rijkswaterstaat / RIZA voor de beoordeling van statistische onzekerheid. Gezien de meervoud aan gekozen verdelingsfuncties is het betrekken van de kansverdelingstype-onzekerheid goed bruikbaar. De kwaliteit achter de keuze voor een type kansverdeling is namelijk afhankelijk van het wel of niet gebruiken van toetsen. Het tweede criterium is conform de Pedigree tabel, namelijk gebaseerd op de fit van kansverdelingsfunctie. Voor het beoordelen van de fit wordt ook gekeken naar de breedte van

het betrouwbaarheidsinterval aangezien dat wel de meest directe manier is om de kwaliteit van de fit aan te duiden. De Pedigree beoordelingscriteria voor de statistische kwaliteit zijn van hoog naar laag:

4. Uitstekende aanpassing naar een bekend statistisch model (Normaal, Lognormaal, Binomiaal enz.)
3. Goede aanpassing naar een betrouwbaar statistisch model welke de meeste hulptests heeft doorstaan, maar niet allemaal.
2. Hulptests niet beduidend gepasseerd, model geen duidelijke betrekking op gegevens, of model gekozen op basis van gelijkaardige gegevens
1. Geen statistische tests, subjectief model.
0. Onwetend model (Uniform)

De gebruikte verdelingsfuncties in de onderzoeken zijn allemaal wel bekend bij toepassing van een statistische analyse. Daarmee komt de kwaliteit uit op één, of een combinatie van de eerste drie beoordelingscriteria.

1. **Kansverdelingstype-onzekerheid:** Wanneer meerdere kansverdelingsfuncties een 'even goede' fit op de tijdserie laten zien, dan is het desondanks mogelijk dat deze zeer verschillende resultaten geven voor het geëxtrapolerde gedeelte. Dit was het geval tijdens het Boertien I onderzoek. Vier kansverdelingsfuncties gaven allen een redelijk tot goede fit op de data maar de extrapolaties vertoonden grote verschillen. Vervolgens is geen voorkeursverdeling aangewezen, ofwel de kansverdelingstype-onzekerheid was groot. De beoordeling van dit type onzekerheid hangt voor de behandelde studies in dit onderzoek af van de resultaten van de gebruikte toetsen om te kiezen voor een bepaald type verdelingsfunctie. Ook wel theoretische geschiktheid genoemd. Vanaf het moment dat in het Boertien I onderzoek is gekozen voor vier typen kansverdelingsfuncties, is hiervan niet meer afgeweken in de daaropvolgende RWS-studies. De kansverdelingstype-onzekerheid is zodoende voor het Boertien I, Boertien II, HR2001 en HR2006 gelijk. Bij de alternatieve studies is wel gebruik gemaakt van toetsen om een voorkeurs-verdelingstype te bepalen.
2. **Fit van de kansverdeling:** De beoordeling is gericht op de kwaliteit waarop de verdelingsfunctie de data weet te beschrijven. Voor dit onderzoek wordt de kwaliteit beoordeeld op de gevoeligheid en het betrouwbaarheidsinterval. De beoordeling van de fit van de kansverdeling is voor alle RWS onderzoeken gelijk omdat dezelfde kansverdelingfuncties zijn gebruikt. Daarvoor wordt gebruik gemaakt van de (gevoeligheids)analyse zoals is uitgevoerd in het Boertien I onderzoek. De fit wordt tevens beoordeeld op het betrouwbaarheidsinterval aangezien deze een directie indicatie geeft van de zekerheid van de schatting. Van alle onderzoeken wordt het 95% betrouwbaarheidsinterval bij de analyse betrokken. Het interval behorende bij een bepaalde 'Q' geeft aan dat die waarde 'Q' met 95% zekerheid daartussen ligt. Een percentage van 90% geeft weliswaar een smaller interval maar de zekerheid of de uitkomst daar tussen ligt is met 90% ook kleiner geworden. Een percentage van 99% geeft weer een breder interval waarmee uitspraken over het berekeningresultaat niet eenduidig genoeg kunnen zijn. Figuur 5.2 geeft een voorbeeld. Wanneer een kansverdelingsfunctie een betamelijk breed interval heeft ten opzichte van andere – onder gelijke condities gefitte – kansverdelingsfuncties, dan wordt de Pedigree score voor de fit naar beneden bijgesteld.



Figuur 5.2 95% en 99% betrouwbaarheidsinterval voor de Gumbel verdeling

Empirische kwaliteit van invoergegevens

De empirische kwaliteit van de basismetreeks bestaat uit een serie beoordelingen behorende bij de perioden waarin de afvoeren afgeleid zijn. Voor de statistiek moet worden uitgegaan van een enkele beoordeling voor de gehele tijdserie aangezien de fit is gebaseerd op aan aantal parameters die de gehele tijdserie beschrijven. Hier is sprake van de voortplanting van de gekwalificeerde onzekerheden uit hoofdstuk 4. Hiervoor zijn specifieke berekeningsmethoden gebruikt die in dit hoofdstuk niet aan de orde komen. De berekening van de voortplanting van de onzekerheden staat beschreven in paragraaf 6.1.

Methodische kwaliteit

1. **Parameterschatting:** Bij elk van de geëvalueerde onderzoeken is een bepaalde methode gebruikt om de gegevens te verzamelen, te controleren en te herzien voor het maken van parameterschattingen. In paragraaf 5.1.3 zijn de drie meest gebruikelijke methoden beschreven. Voor alle RWS onderzoeken is de MLE methode gebruikt voor de Pearson III-, Lognormaal en de Gumbel verdeling. De MOM methode is gebruikt voor de Exponentiele verdeling. Voor het onderzoeken van Gerresten is de MOM methode toegepast. Voor het onderzoek van Klunhaar is vanwege het onderscheid tussen de klassieke en Bayesiaanse statistiek respectievelijk gekozen voor de MOM en Bayesiaanse parameterschattingmethode. De schattingsmethoden worden algemeen toegepast in de statistiek. Er kan in ieder geval gesproken worden van betrouwbare methoden, die bekend zijn binnen de discipline, zoals omschreven volgens de Pedigree tabel. De omschrijving 'goedgekeurde standaard in gevestigde discipline', geldt hier niet omdat er nu eenmaal meerdere mogelijkheden zijn. De methodische kwaliteit voor het construeren van de kansverdelingfuncties verdient daarmee een score van 3. Deze geldt voor alle geëvalueerde onderzoeken in dit afstudeerrapport.
2. **Bepaling maatgevende afvoer:** Na het fitten van de verdelingsfunctie kan de maatgevende afvoer bepaald worden. Met een enkele verdelingsfunctie is daarover geen twijfel, maar met meerdere mogelijke verdelingsfuncties moet een keuze worden gemaakt. Alleen de RWS onderzoeken hebben meerdere kansverdelingsfuncties gebruikt. Van alle verdelingen zijn de maatgevende afvoeren berekend en vervolgens is daarvan het gemiddelde bepaald. De uitkomst is de maatgevende afvoer. Er is dus geen voorkeursverdeling aangewezen op basis van bijvoorbeeld het betrouwbaarheidsinterval. Hieruit valt af te leiden dat er een behoorlijke onzekerheid heeft bestaan omtrent de keuze voor een 'beste' verdeling. Deze kan dan met meer gewicht in de berekening worden meegenomen. Voor alle RWS onderzoeken geldt hetzelfde verhaal zodat één NUSAP beoordeling volstaat. Het middelen van de resultaten van

de kansverdelingsfuncties is niet onaanvaardbaar maar geeft te kennen dat er sprake is van onzekerheid. Daarmee komt de NUSAP beoordeling uit op het volgende criterium: "aanvaardbare methode, maar beperkte consensus op betrouwbaarheid", score is 2. De alternatieve onderzoeken worden individueel beoordeeld.

5.2 Evaluatie van bestaand onderzoek

In deze paragraaf wordt de frequentieanalyse voor de maatgevende afvoer van de RWS onderzoeken en alternatieve onderzoeken geëvalueerd. Van elk onderzoek eindigt de evaluatie met een beoordeling van de kwalificeerbare onzekerheden op basis van de methodische, empirische en statistische kwaliteit.

5.2.1 Boertien I

De frequentieanalyse is uitgevoerd met de serie jaarmaxima en afvoerpieken. Omdat de reeksen van statistisch karakter verschillen moeten verschillende verdelingen worden toegepast. De analyse van het Boertien I onderzoek is uitgebreider dan de vervolgonderzoeken Boertien II en de HR2001 en HR2006 omdat daarvoor dezelfde kansverdelingsfuncties worden toegepast. De analyse naar de selectie van de kansverdelingen hoeft zodoende alleen voor het Boertien I onderzoek te worden uitgevoerd. De volgende verdelingen zijn in het BT-I onderzoek geanalyseerd:

Tijdserie	Kansverdelingen
jaarmaxima	Gumbel Pearson-III Lognormaal Log Pearson.
afvoerpieken	Exponentieel Pareto

Tabel 5.2
Verdelingsfuncties die
zijn onderzocht voor het
Boertien I onderzoek

De Log Pearson verdeling is verder niet in de analyse betrokken omdat de aanpassing aan de data slecht bleek te zijn. De reeksen jaarmaxima en afvoerpieken zijn met en zonder correcties onderzocht. Deze correcties hadden betrekking op een veronderstelde overschatting van de stokdrijvers (zie Hoofdstuk 3).

De criteria voor bepaling van de meest geschikte verdelingsfunctie zijn respectievelijk de:

1. Theoretische geschiktheid van de verdeling voor het type data (kansverdelingstype-onzekerheid)
2. Visuele beoordeling van de aanpassing van de frequentielijn aan de data
3. Gevoeligheid van de verdeling voor wijzigingen in de data.

Ad. 1 In het rapport wordt het volgende veronderstelt: "Aangaande de theoretische geschiktheid van een verdeling voor een type data (bijv. jaarmaxima versus afvoerpieken) en een bepaalde doelstelling is uitgebreide literatuur voorhanden. Er is geen consensus aangaande een voorkeurs-frequentieverdeling en in het algemeen kan worden gesteld dat de hier toegepaste verdelingen voor de twee type data als adequaat kunnen worden beschouwd."

Met hierna de volgende opmerking: "Op basis van dit criterium kan geen uitspraak gedaan worden welke verdelingen moeten worden gekozen"

Ad. 2 De beoordeling van de aanpassing van de frequentielijn aan de data geschiedt visueel op basis van de figuren (zie § 5.3.1, methode 2.2). Er is met drie plotformules gerekend om de beoordeling voor zowel de lage als hoge jaarmaxima op een juiste visuele manier uit te voeren. Concluderend stelt

het rapport: *“De frequentielijnen van de Gumbel verdeling met ondergrens⁴, de Pearson-III verdeling en de log normale verdeling geven een betere aanpassing aan de punten voor de gecorrigeerde data⁵ dan voor de oorspronkelijke data.”*

De tweede conclusie uit het rapport luidt: *“Op basis van de visuele beoordeling van de frequentielijnen zijn de Gumbel verdeling zonder ondergrens en de algemene Pareto verdeling als minder geschikt aangemerkt.”*

Deze verdelingen zijn verder niet meer gebruikt voor bepaling van de maatgevende afvoer. De visuele beoordeling met drie plotformules is niet erg overtuigend omdat voor elke verdelingsfunctie een plotformule gekozen kan worden die daarbij het beste past. Het toetsen met ‘flexibele’ toetsingscriteria is uiteraard niet erg consequent. De resultaten van deze analyse moeten daarom zeker niet als doorslaggevend worden beschouwd.

Ad.3 Voor de gevoeligheidsanalyse is gekeken naar het effect van het verlagen dan wel verhogen van de afvoer van 1926 met 200 m³/s en het volledig weglaten van de afvoer. Dit is voor de ongecorrigeerde en gecorrigeerde data gebeurt.

Uit de resultaten van de gevoeligheidsanalyse zijn in het Boertien onderzoek de volgende conclusies getrokken:

1. de Gumbel verdeling is het minst gevoelig voor veranderingen in de data;
2. de gevoeligheid voor veranderingen in de data is voor de Pearson-III en log normale verdelingen vrijwel gelijk;
3. de algemene Pareto verdeling is veel gevoeliger voor het weglaten van de hoogste waarde dan voor veranderingen in de data;
4. weglaten van de afvoer van 1926 heeft over het algemeen een groter effect bij de oorspronkelijke reeks dan bij de gecorrigeerde reeks afvoergetallen;
5. algehele correctie van de afvoerreeks geeft voor de frequentieanalyse met de drie verdelingen op de jaarmaxima een vergelijkbaar resultaat.

Het derde beoordelingscriterium heeft ten opzichte van de eerste twee de meeste prioriteit in verband met de nadruk op de hoge afvoeren. Voor de beoordeling van de statistische kwaliteit volgens NUSAP ligt de nadruk op dit criterium.

In de eindanalyse van het Boertien rapport wordt geconcludeerd dat: *“op basis van de gevoeligheidsanalyse wordt de algemene Pareto verdeling als minder geschikt geacht voor de extrapolatie op basis van afvoerpieken bij hogere herhalingstijden, en wordt daarom niet meegenomen bij de bepaling van de maatgevende afvoer.”*

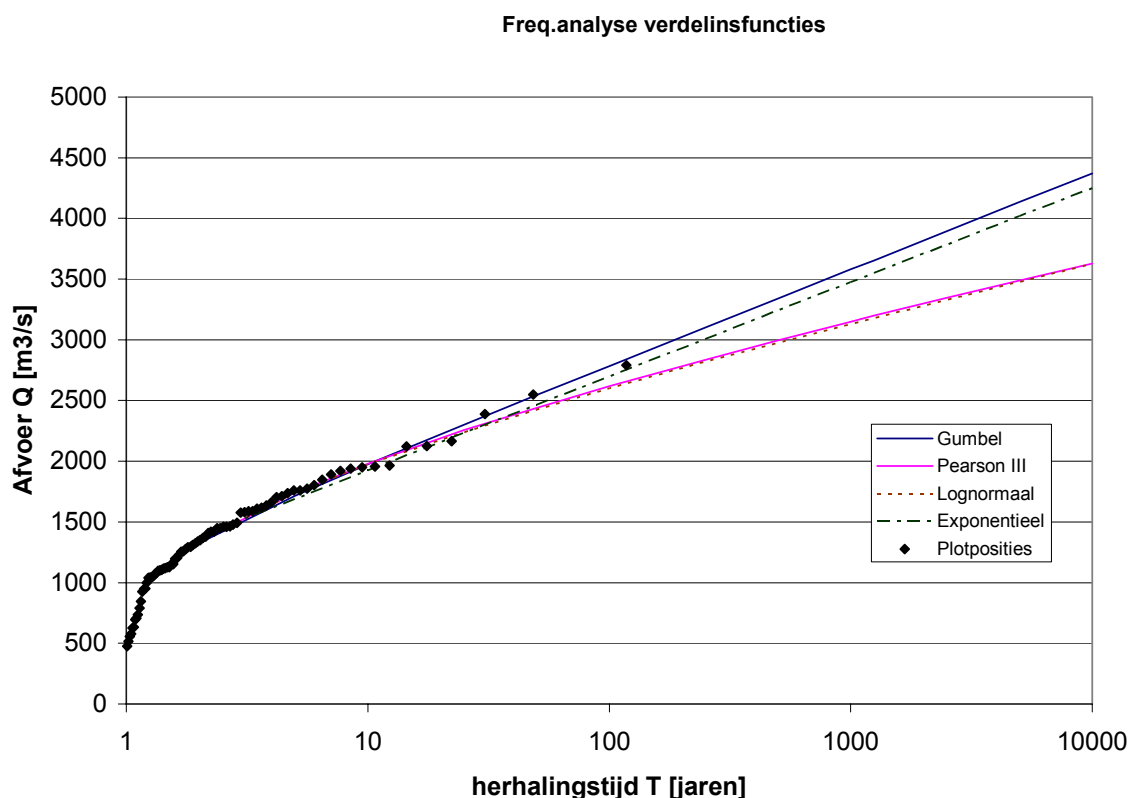
De Log Pearson en Pareto verdeling zijn zodoende niet meer gebruikt in het Boertien I onderzoek en de vervolgonderzoeken.

De parameterschatting van de verdelingsfuncties voor de reeks jaarmaxima is met behulp van de MLE-methode uitgevoerd. Voor de Exponentiele verdeling is de MOM-methode toegepast.

In Figuur 5.3 op de volgende pagina is het resultaat van de frequentieanalyse voor de vier kansverdelingfuncties weergegeven.

⁴ De Gumbel verdeling toont volgens het RWS rapport een duidelijke discontinuïteit, waardoor de keuze van een ondergrens voor de data wenselijk is. De inhomogeniteit zou veroorzaakt kunnen zijn door de overgang van gestuwde naar ongestuwde omstandigheden op de Maas, die plaatsvindt rond een afvoer van 1.200 m³/s. Voor het Boertien onderzoek worden bij het fitten van de Gumbel verdeling alle afvoeren onder de 1.000 m³/s weggelaten.

⁵ Bij de gecorrigeerde data zijn alle jaarmaxima tot 1957 5 tot 7% lager dan de ongecorrigeerde jaarmaxima.



Figuur 5.3 Fit van de verdelingsfuncties met plotposities jaarmaxima volgens het Boertien I onderzoek

Onzekerheden

Statistische kwaliteit

1. Kansverdelingstype onzekerheid

In het rapport is niet beschreven waarmee de theoretische geschiktheid van de verdeling is getoetst. In paragraaf 5.1.3 is aangegeven dat er toetsen zijn die uitsluitend kunnen geven of de aanpassing van de verdelingsfunctie aan de reeks jaarmaxima overtuigend is. Voor de reeks afvoerpieken is de Exponentieel verdeling gekozen omdat alleen deze eenzijdig is.

Volgens het Boertien I rapport is er geen consensus aangaande een voorkeurs-frequentieverdeling voor de reeks jaarmaxima. De beoordeling volgens NUSAP: "geen statistische tests, subjectief model", Pedigree score is 1.

2. Fit van de kansverdeling:

Gumbel verdeling: De Gumbel verdeling met ondergrens is volgens de analyse minder gevoelig voor extreme afvoeren. De hulptest voor het bepalen van de gevoeligheid door het verlagen dan wel verhogen van de afvoer van 1926 en het volledig weglaten van de afvoer leverde volgens het Boertien rapport weinig effect. Het verschil zonder het jaarmaximum bleek -130 m³/s te zijn. Uit een zelfstandige analyse met behulp van het softwareprogramma FLOODS (Institute of Hydrology UK, 1995) bleek de afvoer bij T = 1.250 inclusief het jaarmaximum van 1926, 3.386 m³/s. Zonder de afvoer van 1926 was de uitkomst 3.286 m³/s. Hier heeft het weglaten van het jaarmaximum ook relatief weinig effect.

Ten tijde van het Boertien I onderzoek was het jaarmaximum van 1926 de enige extreme afvoer groter dan 2.750 m³/s. Voor de frequentieanalyse naar de maatgevende afvoer (ook een extreme afvoer) is juist het effect van deze afvoer van belang. Op het derde beoordelingscriterium 'gevoeligheid van de verdeling voor wijzigingen in de data' scoort de Gumbel verdeling matig. De

NUSAP omschrijving voor de Gumbel verdeling is: "hulptests niet beduidend gepasseerd, model geen duidelijke betrekking op gegevens, of model gekozen op basis van gelijkaardige gegevens", Pedigree score is 2. Het betrouwbaarheidsinterval van de Gumbel verdeling (zie Tabel 5.3) is smaller dan de overige verdelingen wat duidt op meer statistische zekerheid. Er hoeft geen negatieve score te worden toegekend.

Pearson-III verdeling en Lognormaal verdeling: Gezien de vrijwel gelijke resultaten kan van één beoordeling worden uitgegaan voor de twee kansverdelingfuncties. Het weglaten van de afvoer van 1926 geeft verschillen van $-280 \text{ m}^3/\text{s}$ en $-325 \text{ m}^3/\text{s}$ voor respectievelijk de Pearson III- en de Lognormale verdeling. Het verschil is hier aanzienlijk groter dan de resultaten van de Gumbel verdeling. De verdelingen zijn dus gevoelig voor extreme afvoeren en hebben daardoor de hulptest gepasseerd. De NUSAP beoordeling criteria: "goede aanpassing naar een betrouwbaar statistisch model welke de meeste hulptests heeft doorstaan, maar niet allemaal", score is 3 en "uitstekende aanpassing naar een bekend statistisch model (Normaal, Lognormaal, Binomiaal enz)", score is 4. Het betrouwbaarheidsinterval van beide verdelingen is hoger dan de overige verdelingen. Daardoor wordt 1 punt in mindering gebracht. De uiteindelijke Pedigree score is $(3+4)/2 - 1 = 2,5$.

Exponentiele verdeling: De Exponentiele verdeling die gefit is op de afvoerpieken heeft vergelijkbare resultaten met de Gumbel verdeling. De hoge uitkomst heeft mede te maken met het hogere gemiddelde van de reeks afvoerpieken. De gebruikte reeks afvoerpieken zonder de correcties die tijdens het Boertien II onderzoek zijn uitgevoerd, is voor dit onderzoek niet beschikbaar gekomen. Daardoor is de beoordeling volledig berust op de resultaten uit het Boertien I rapport. Het weglaten van het jaarmaximum van 1926 geeft een verschil van $-135 \text{ m}^3/\text{s}$, vergelijkbaar met de Gumbel verdeling. Verder wordt in het Boertien rapport geconcludeerd dat de aanpassing van de frequentielijn aan de data voor de Exponentiele verdeling beter is dan de Pareto verdeling. Voor de Exponentiele verdeling wordt dezelfde NUSAP beoordeling aangehouden als de Gumbel verdeling. De score is 2. Het betrouwbaarheidsinterval van de verdeling ligt qua breedte tussen de overige verdelingen in. Er wordt een half punt in mindering gebracht. De uiteindelijke Pedigree score is $2 - 0,5 = 1,5$.

De betrouwbaarheidsintervallen van de kansverdelingsfuncties voor een herhalingsstijd van 1.250 jaar zijn in Tabel 5.3 weergegeven. Daarbij is de breedte van het interval ten opzichte van de berekende afvoer procentueel weergegeven voor een makkelijker vergelijk.

Verdelingsfunctie	Betrouwbaarheidsinterval			Spreiding BI
	Q ₁₂₅₀	- 95%	+ 95%	
Pearson-III	3200	2530	3880	42,2%
Lognormaal	3180	2600	3875	40,1%
Gumbel	3655	3130	4150	27,9%
Exponentieel	3550	2870	4230	38,3%

Tabel 5.3 Resultaten berekeningen Boertien I. (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1993).
(De betrouwbaarheidsintervallen zijn geschat uit de afgebeelde frequentieplots in het rapport)

Opvallend is dat de twee kansverdelingen met de hoogste schatting voor de maatgevende afvoer het kleinste betrouwbaarheidsinterval hebben. Waarschijnlijk heeft dat te maken met de geringere gevoeligheid van de verdelingen. Van de Gumbel verdeling is met de grootste zekerheid te zeggen dat de (hoogste) schatting met een herhalingsstijd van 1.250 jaar redelijk nauwkeurig is.

Methodische kwaliteit:

1. **Parameterschatting:** In paragraaf 5.1.4 is al een beoordeling uitgevoerd voor de schattingsmethode van parameters van de kansverdelingsfuncties. De toegepaste MLE methode en MOM methode zijn betrouwbare methoden, die bekend zijn binnen de discipline. De Pedigree score is 3.
2. **Bepaling maatgevende afvoer:** De beoordeling voor het middelen is al in paragraaf 5.1.4 besproken waarin de Pedigree score is vastgesteld op 2.

5.2.2 Boertien II

De frequentieanalyse van het Boertien II onderzoek gelijk aan het Boertien I onderzoek. Het verschil in de uitkomsten (Tabel 5.4) is veroorzaakt door de toevoeging van het hoogwater van december 1993 aan de meetreeks en een aantal correcties voor de jaarmaxima. De beoordeling voor de statistische en methodische kwaliteit wordt overgenomen uit het Boertien I onderzoek.

	Pearson III	Lognormaal	Gumbel	Exponentieel
Boertien I	3.200	3.180	3.655	3.550
Boertien II	3.678	3.630	3.989	3.953

Tabel 5.4 Verschil maatgevende afvoeren tussen Boertien I en Boertien II onderzoeken

Onzekerheden**Statistische kwaliteit**

Voor een toelichting op de beoordeling van de eerste twee punten wordt verwezen naar paragraaf 5.2.1.

1. **Kansverdelingstype onzekerheid:** Pedigree score is 1.
2. **Fit van de kansverdeling:**
 Uit de evaluatie van het Boertien I onderzoek zijn de volgende beoordelingen gekomen
 Gumbel verdeling: Pedigree score is 2.
 Pearson-III verdeling en Lognormaal verdeling: Pedigree score is 3.
 Exponentiele verdeling: Pedigree score is 1,5.

Tabel 5.5 geeft de betrouwbaarheidsintervallen weer. Door het extra hoogwater van 1993 en de homogenisaties ten opzichte van het Boertien I onderzoek, zijn met uitzondering van de Gumbel verdeling de betrouwbaarheidsintervallen groter geworden. De intervallen verschillen onderling vergelijkbaar met het Boertien I onderzoek zodat de beoordeling van de fit van de kansverdeling wordt overgenomen.

Verdelingsfunctie	Betrouwbaarheidsinterval			Spreiding BI
	Q ₁₂₅₀	- 95%	+ 95%	
Pearson-III	3678	2820	4500	45,6%
Lognormaal	3630	2900	4500	44,0%
Gumbel	3989	3450	4525	26,9%
Exponentieel	3953	3200	4800	40,4%

Tabel 5.5 Resultaten berekeningen Boertien II. (RWS, 1993). (De betrouwbaarheidsintervallen zijn geschat uit de afgebeelde frequentieplots in het rapport)

De oorzaak van het bredere interval ondanks toevoeging van extra data is te wijten aan de veranderde consistentie van de basismetreeks. Worden de zeven hoogste afvoeren uit beide reeksen vergeleken, dan valt op dat de consistentie van de topafvoeren uit de Boertien II reeks nogal verschillend is met de Boertien I reeks. De twee extreme topafvoeren hebben een negatief effect op de fit van de verdelingsfuncties, met uitzondering van de Gumbel verdeling. De extra topafvoer van 1994 heeft bij de frequentieanalyse het gewicht meer naar de topafvoeren gelegd waardoor afbuiging van de fit is ontstaan. In Tabel 5.6 zijn de zeven hoogste topafvoeren (Bij het BT II onderzoek met homogenisaties) naast elkaar gezet.

Boertien I	Boertien II
2790	3175
2466	3120
2449	2573
2165	2388
2125	2279
2000	2207
1957	2171

Tabel 5.6 Vergelijk hoogste jaarmaxima Boertien I en Boertien II

Methodische kwaliteit

- Parameterschatting:** In paragraaf 5.1.4 is al een beoordeling uitgevoerd voor de schattingsmethode van parameters van de kansverdelingsfuncties. De toegepaste MLE methode en MOM methode zijn betrouwbare methoden, die bekend zijn binnen de discipline. De Pedigree score is 3.
- Bepaling maatgevende afvoer:** De beoordeling voor het middelen is reeds in paragraaf 5.1.4 besproken waarin de Pedigree score is vastgesteld op 2.

5.2.3 Hydraulische Randvoorwaarden 2001

Voor de bepaling van de maatgevende afvoer volgens de Hydraulische Randvoorwaarden 2001 is niet één beste schatting gegeven maar een drietal varianten, op basis waarvan de definitieve keuze kon worden gebaseerd. De verschillen tussen deze varianten zijn in het kort:

- Bij de eerste variant is de reeks die eerder in het Boertien II onderzoek is gebruikt verlengd met de afvoer van 1994 en de extreme afvoer van 1995.
- De tweede variant is gelijk aan de eerste maar met aanpassing van de hoogwaters tussen 1984 en 1992 vanwege een nieuw aangenomen Qh-relatie voor die periode.
- De derde variant is als de tweede maar met een gewogen middeling van de resultaten met een extra kansverdeling (Rayleigh) waarbij gewichten met de Bayesiaanse analyse zijn vastgesteld.

De resultaten van de drie varianten voor de twee maatgevende afvoeren van de Maas zijn in Tabel 5.7 gegeven.

Verdelingsfunctie				Gewicht (exclusief Rayleigh)	Gewicht (inclusief Rayleigh)
	Q ₁₂₅₀ V1	Q ₁₂₅₀ V2	Q ₁₂₅₀ V3		
Pearson-III	3683	3640	3640	41%	22%
Lognormaal	3692	3643	3643	22%	12%
Gumbel	4042	4002	4002	18%	10%
Exponentieel	3982	3940	3940	19%	10%
Rayleigh			3500	-	46%

Tabel 5.7 Resultaten berekeningen met percentages gewogen gemiddelde HR 2001 (RWS, 2001)

Het RIZA heeft voor haar definitieve advies over de hoogte van de maatgevende afvoer geen duidelijke voorkeur voor een specifieke berekeningsmethode. Uiteindelijk is de voorkeur gegeven aan de eerste twee varianten gebaseerd op de volgende conclusie: *“De aanpak van de Commissie Boertien II wordt breed gedragen (het gemiddelde van varianten 1 en 2 komen op ruim 3.800 m³/s, gelijk aan de MA van Boertien II).”* Uiteindelijk is ervoor gekozen de maatgevende afvoer te handhaven op 3.800 m³/s.

Onzekerheden

Statistische kwaliteit

Voor een toelichting op de beoordeling van de eerste twee punten wordt verwezen naar paragraaf 5.2.1.

1. **Kansverdelingstype onzekerheid:** Pedigree score is 1.

2. **Fit van de kansverdeling:**

Uit de evaluatie van het Boertien I onderzoek zijn de volgende beoordelingen gekomen

Gumbel verdeling: Pedigree score is 2.

Pearson-III verdeling en Lognormaal verdeling: Pedigree score is 3.

Exponentiele verdeling: Pedigree score is 1,5.

Rayleigh verdeling: Volgens het rapport heeft de Rayleigh verdeling de beste fit op de gebruikte datareeks. Omdat deze een betere fit heeft dan de Pearson-III / Lognormaal verdeling, moet de hoogste score worden toegekend overeenkomend met: “uitstekende aanpassing naar een bekend statistisch model (Normaal, Lognormaal, Binomiaal enz.)”, score is 4.

Methodische kwaliteit

1. **Parameterschatting:** In paragraaf 5.1.4 is al een beoordeling uitgevoerd voor de schattingsmethode van parameters van de kansverdelingsfuncties. De toegepaste MLE methode en MOM methode zijn betrouwbare methoden, die bekend zijn binnen de discipline. De score is 3.
2. **Bepaling maatgevende afvoer:** De beoordeling voor het middelen is reeds in paragraaf 5.1.4 besproken waarin de score is vastgesteld op 2.

5.2.4 Hydraulische Randvoorwaarden 2006

De meest recente vaststelling van de maatgevende afvoer staat beschreven in de Hydraulische Randvoorwaarden 2006 'Herberekening werklijn Maas' opgesteld in mei 2006. Ten opzichte van de HR2001 is de procedure nauwelijks veranderd. De reeks jaarmaxima is met vijf jaren verlengd en er is gekozen voor een berekeningswijze die eerder is toegepast voor het onderzoek van de Commissie Boertien II.

OnzekerhedenStatistische kwaliteit

Voor een toelichting op de beoordeling van de eerste twee punten wordt verwezen naar paragraaf 5.2.1.

1. **Kansverdelingstype onzekerheid:** score is 1.
2. **Fit van de kansverdeling:**
 Uit de evaluatie van het Boertien I onderzoek zijn de volgende beoordelingen gekomen
 Gumbel verdeling: score is 2
 Pearson-III verdeling en Lognormaal verdeling: score is 3.
 Exponentiele verdeling: score is 1,5

Tabel 5.8 geeft de betrouwbaarheidsintervallen weer. Ten opzichte van de het Boertien II onderzoek zijn alle intervallen van de kansverdelingen behorende bij een herhalingstijd van 1.250 jaar kleiner geworden. De oorzaak ligt aan de verhoogde consistentie van de topafvoeren in de gebruikte reeksen jaarmaxima en afvoerpieken. Onderling vertonen ze nog dezelfde verhoudingsgewijze verschillen waardoor de NUSAP scores uit het Boertien II onderzoek kunnen worden overgenomen.

Verdelingsfunctie	Betrouwbaarheidsinterval			Spreiding BI
	Q ₁₂₅₀	- 95%	+ 95%	
Pearson-III	3.745	2960	4600	43,7%
Lognormaal	3.757	3070	4700	43,4%
Gumbel	4.179	3680	4800	26,8%
Exponentieel	4.172	3440	5000	37,4%

Tabel 5.8 Resultaten berekeningen HR 2006 (De betrouwbaarheidsintervallen zijn geschat uit de afgebeelde frequentieplots in het rapport)

Boertien I	Boertien II	HR2006
2.790	3.175	3.175
2.466	3.120	3.039
2.449	2.573	2.746
2.165	2.388	2.731
2.125	2.279	2.488
2.000	2.207	2.300
1.957	2.171	2.280

De zeven topafvoeren zoals gebruikt voor de HR 2006 vertonen een consistentere verloop dan de reeks die gebruikt is voor het Boertien II onderzoek. Evenals de bij het Boertien I onderzoek geldt: Meer consistentie van de reeks jaarmaxima leidt tot een smaller betrouwbaarheidsinterval.

Tabel 5.9 Vergelijk hoogste jaarmaxima BT II en HR 2006

Methodische kwaliteit van parameterschatting

1. **Parameterschatting:** In paragraaf 5.1.4 is al een beoordeling uitgevoerd voor de schattingsmethode van parameters van de kansverdelingsfuncties. De toegepaste MLE methode en MOM methode zijn betrouwbare methoden, die bekend zijn binnen de discipline. De score is 3.
2. **Bepaling maatgevende afvoer:** De beoordeling voor het middelen is reeds in paragraaf 5.1.4 besproken waarin de score is vastgesteld op 2.

5.2.5 Onderzoek Klunhaar

In het onderzoek van Klunhaar zijn drie frequentieanalyses uitgevoerd met gebruik van de klassieke statistiek en twee Bayesiaanse modellen. De Bayesiaanse statistiek is een alternatieve methode om kansverdelingen te schatten. Om klassieke statistiek te gebruiken moeten empirische waarnemingen voorhanden zijn. Met Bayesiaanse statistiek is het mogelijk om met alleen subjectieve waarnemingen en schatting te doen. Vandaar dat de gebruikte tijdserie is uitgebreid met een reeks waarnemingen waarvan alleen bekend is of het overstromingsschade of een ramp betrof. De evaluatie van de onzekerheden van het onderzoek van Klunhaar betreft alleen de Bayesiaanse statistiek omdat deze uiteindelijk de voorkeur heeft verdient om de maatgevende afvoer mee uit te rekenen. De klassieke statistiek is vrijwel overeenkomstig met het Boertien II onderzoek.

Bij het schatten van de parameters en de keuze van een a priori kansverdeling ten behoeve van de subjectieve waarnemingen wordt van hogere wiskunde gebruik gemaakt. De klassieke statistiek bestaat voornamelijk uit praktische uitvoerbare recepten, die vaak zelfs zonder een computer niet al te moeilijk uit te voeren zijn. Een Bayesiaanse analyse vereist daarentegen vaak het uitintegreren van variabelen uit verdelingen, maar dit is meestal alleen praktisch mogelijk met behulp van een computer (Luginbuhl, 2004). Het beoordelen van deze specifieke berekeningsstappen (het construeren van een a posteriori vergelijking met a priori parameters) gaat te ver voor dit onderzoek. De beoordeling gaat in op het feit dat subjectieve waarnemingen verdisconteerd zijn in een aangepaste kansverdelingfunctie. Daarbij dient een analyse van de resultaten van het onderzoek ter onderbouwing.

Onzekerheden

Statistische kwaliteit

1. Kansverdelingstype onzekerheid:

Klunhaar heeft over het schatten van het type kansverdeling het volgende gezegd: *“Geconcludeerd moet worden dat de klassieke technieken ter bepaling van het type kansverdeling – op basis van empirische waarnemingen – doorgaans weinig kracht bezitten: zij geven een indruk, tot op zekere hoogte, maar de uiteindelijke keuze is toch vaak subjectief. Met de Bayesiaanse statistiek worden twee elementen – statistische informatie én subjectiviteit – allebei formeel betrokken in de schattingsprocedure”*

Het schatten van het type kansverdeling is in feite verweven met het schatten van de parameters voor de kansverdeling (Klunhaar, 2003). Verschillende hypothesen worden opgesteld waarbij elke hypothese gebaseerd is op een ander verdelingstype. Uiteindelijk wordt de Bayesiaanse analyse voortgezet door die verdelingsvorm te kiezen met de hoogste a posteriori kans. Al wordt in het rapport wel gesuggereerd dat zonder uit te gaan van een enkele verdeling, en alle verdelingen met een gewogen gemiddelde zouden worden meegenomen, de Bayesiaanse analyse het meeste recht zou worden aangedaan. Dat zou echter zeer veel rekenwerk kosten. Er is daarom gebruik gemaakt van één objectieve toets. Omdat er geen visuele beoordeling en gevoeligheidsanalyse (pas ná de keuze) is uitgevoerd, wordt het criterium “goede aanpassing naar een betrouwbaar statistisch model welke de meeste hulptests heeft doorstaan, maar niet allemaal” aangenomen. De score is 3.

2. Fit van de kansverdeling:

Voor het Bayesiaanse model is het toetsen van de fit niet zomaar uit te voeren omdat geen directe afleiding van een empirische dataset wordt gebruikt. Het model is opgebouwd uit a priori en a posteriori verdelingen. Van het a priori gedeelte zijn geen werkelijke afvoeren bekend.

Er is getoetst op de gevoeligheid voor extra waarnemingen. De Bayesiaanse model I en II zijn beide getoetst. Voor model I (zonder a priori informatie) is het resultaat in Tabel 5.10 gegeven.

T (jaar)	1911-1993	+ 2.870 m ³ /s	+ 2.100 m ³ /s	< 2.000 m ³ /s
1250	4132	4378	4026	4126

Tabel 5.10 Resultaten gevoeligheidsanalyse Bayesiaans model I (Klunhaar, 2003)

Opvallend is dat pas bij toevoeging van het extreme hoogwater van 2.870 m³/s, er een stijging van de maatgevende afvoer optreedt. De vraag is wat het model doet bij nog een aantal hoge hoogwaters zoals opgetreden tussen 1993 en 2003. Op basis van de resultaten die nu gegeven zijn, kan daarop geen duidelijk antwoord worden gegeven. De maatgevende afvoer zou met de vijfjaarlijkse vaststelling vermoedelijk relatief sterk fluctueren wanneer met het Bayesiaanse model I wordt gerekend. Over de gevoeligheid van model I wordt in het rapport geconcludeerd dat de schatting van de maatgevende afvoer voor een extra waarneming het grootst is als de extra waarneming qua orde van grootte in een gebied valt waar er op voorhand relatief weinig gegevens beschikbaar zijn (Klunhaar, 2003).

Voor model II is het gewicht van de a priori informatie gewijzigd door het verhogen dan wel verlagen van een specifieke parameter. Uit de analyse werd afgeleid dat een grotere bijdrage van a priori informatie tot een kleinere maatgevende afvoer leidt. Dit heeft te

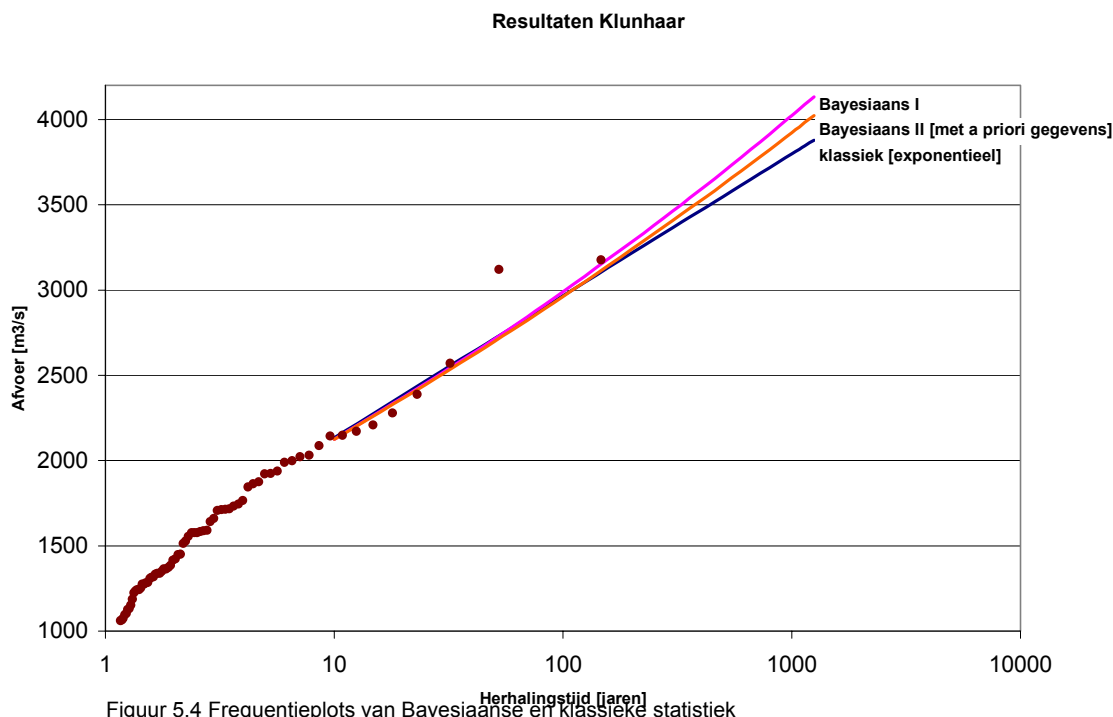
maken met het feit dat er in de vorige eeuw relatief veel hoogwaters boven 2.500 m³/s zijn voorgekomen, ten opzichte van de vijf eeuwen daarvoor. Hoe meer gewicht de periode met minder hoogwaters krijgt, hoe lager de maatgevende afvoer.

	1400-1993	1400-1993	1400-1993
T (jaar)	K= 5	K= 10	K= 15
1250	4022	3919	3858

Tabel 5.11 Resultaten gevoeligheidsanalyse Bayesiaans model II (Klunhaar, 2003)

Volgens het Bayesiaans model I is er gevoeligheid voor extreme afvoeren maar de gevoeligheid voor afvoeren boven de 2.100 m³/s en onder de 2.000 m³/s is enigszins merkwaardig. Voor model II is de gevoeligheid sterk afhankelijk van de subjectieve omgang met het schatten van de parameters voor de a priori informatie. De gevoeligheid is niet zomaar objectief te bepalen.

De frequentieplots van de resultaten gegeven in Figuur 5.4 geven meer uitsluitel. De fit van de Bayesiaanse statistiek is binnen het bereik van de geplote jaarmaxima vrijwel gelijk met de klassieke statistiek. Op basis hiervan kan eenzelfde beoordeling worden gegeven als het Boertien II onderzoek (want zelfde reeks jaarmaxima).



De beoordeling volgens NUSAP zit tussen twee omschrijvingen in: "goede aanpassing naar een betrouwbaar statistisch model welke de meeste hulptests heeft doorstaan, maar niet allemaal", score is 3 en "hulptests niet beduidend gepasseerd, model geen duidelijke betrekking op gegevens, of model gekozen op basis van gelijkaardige gegevens", score is 2. De uiteindelijke score is 2,5.

- 3. Betrouwbaarheidsinterval:** Tabel 5.12 geeft de betrouwbaarheidsintervallen weer. Ten opzichte van de het Boertien II onderzoek zijn alle intervallen van de kansverdelingen behorende bij een herhalingstijd van 1.250 jaar breder. Met het toevoegen van a priori informatie voor model II is het interval smaller geworden maar nog altijd breder dan het Boertien II onderzoek.

Verdelingsfunctie	Betrouwbaarheidsinterval			Spreiding BI
	Q ₁₂₅₀	- 95%	+ 95%	
Exponentieel	3879			40,4%*
Bayesiaans I	4132	3054	5256	52,8%
Bayesiaans II	4022	3107	4907	44,7%

Tabel 5.12 95% Betrouwbaarheidsintervallen (Klunhaar, 2003) *) de spreiding van de Exponentiele verdeling was in het rapport niet gegeven en is overgenomen uit het Boertien II onderzoek

Methode kwaliteit

1. Parameterschatting:

Het schatten van de parameters gebeurt tegelijk met het schatten van de verdelingsfunctie waaruit het Bayesiaanse model is opgebouwd. De aandacht gaat voornamelijk naar model II. De Bayesiaanse methode komt namelijk vanwege de a priori invulling bij model II het beste tot zijn recht. Een aantal factoren spelen bij de parameterschatting een rol:

- De gebruikte techniek voor de parameterschatting van het a priori gedeelte in model II is de 'device of imaginary results'. Hiermee krijgt de a priori verdeling een wegingsfactor ten opzichte van de a posteriori verdeling. De grootte van deze factor is afhankelijk van de a posteriori waarnemingen waardoor de a priori verdeling niet als volledig onafhankelijk kan worden beschouwd. Of zoals in het rapport wordt gesteld: het bepalen van de weging is een interessant concept, maar niet helemaal zuiver (Klunhaar, 2003).
- Evenals bij de kansverdelingstype-onzekerheid zou het rekenen met een gewogen gemiddelde van meerdere 'mogelijke' kansverdeling-functies de analyse sterker maken.
- De schattingsprocedure laat zich met de klassieke statistiek het meest vergelijken met de methode der grootste aannemelijkheid, aangezien ook daar een soort 'trial and error' procedure wordt aangehouden.

Het schatten van de parameters is inherent voor de Bayesiaanse statistiek. De kwaliteit van de schatting uit zich daardoor direct in de kwaliteit van de fit van de gebruikte kansverdelingsfuncties. Uit een alternatieve methode voor het schatten kan niet worden gekozen zoals bij de klassieke statistiek wel het geval is. Omdat het aannemen van een gewicht voor de a priori verdeling op subjectieve gronden geschiedt, komt de Pedigree beoordeling uit op: "betrouwbare methode, die bekend is binnen de discipline", score is 3 en "aanvaardbare methode, maar beperkte consensus op betrouwbaarheid", score is 2. De uiteindelijke score is 2,5

Tot slot heeft Klunhaar het volgende geconcludeerd: *"Een Bayesiaanse aanpak leidt niet noodzakelijk tot een betere schatting voor de maatgevende afvoer dan een klassieke aanpak. In de Bayesiaanse aanpak wordt de statistische onzekerheid en de daarmee gepaard gaande subjectieve houding ronduit 'erkend'"*

2. Bepaling maatgevende afvoer:

Voor het onderzoek van Klunhaar is niet echt een aanbeveling gedaan om te kiezen voor een nieuwe maatgevende afvoer. Het ging meer om de toepassing van de Bayesiaanse statistiek zelf. Er wordt hierom geen extra beoordeling gegeven over de keuze voor de maatgevende afvoer.

5.2.6 Onderzoek Gerretsen

Gerretsen heeft in zijn onderzoek de verlengde serie jaarmaxima (gecorrigeerde basismetreeks + vier historische hoogwaters) opgesplitst in twee delen in verband met de ongestuwde en gestuwde situatie van de Limburgse Maas. Daarop zijn vervolgens twee aparte kansverdelingsfuncties gefit ten behoeve van de frequentieanalyse. De twee verdelingen worden vervolgens weer op elkaar aangesloten. In het onderzoek is voor drie verschillende 'knik'punten een analyse uitgevoerd naar de verdelingstypen die de meest 'vloeiende' overgang gaven. Hiervoor zijn een aantal toetsen gebruikt. Met drie mogelijke knikpunten zijn in totaal zes reeksen jaarmaxima met bijbehorende kansverdelingsfuncties verkregen. Het resultaat hiervan is gegeven in Tabel 5.13

Knik m³/s	Afvoer-interval m³/s	Type verdeling
2.225	475 – 2.225	Normaal
	2.225 – 3.175	Lognormaal
2.350	475 – 2.225	Normaal
	2.225 – 3.175	Lognormaal
1.975	475 – 1.975	Normaal
	1.975 – 3.175	Pearson III

Tabel 5.13 Kansverdelingfuncties voor geknikte reeks jaarmaxima

De verdelingen zijn met behulp van de KS-toets (zie § 5.1.3) voor de verschillende afvoerintervallen gekozen. Op basis van de Likelihood-ratio toets die daarna is uitgevoerd, gaat de favoriete samenstelling naar de Normaal en Pearson III verdeling met het knikpunt op 1.975 m³/s. Voor de frequentieanalyse naar de maatgevende afvoer wordt alleen de Pearson III verdeling gebruikt met als invoerdata de jaarmaxima tussen 1.975 m³/s en 3.175 m³/s.

Naast deze alternatieve methode voor de frequentieanalyse heeft Gerretsen ook de klassieke frequentieanalyse erbij betrokken ter vergelijking. Deze analyse is alleen toegepast voor de reeks met afvoerpieken 1911-1999. Hiervoor zijn de Normaal, Gumbel, Exponentieel, Pearson III en de Lognormaal verdeling onderzocht. Na toetsing met de KS-toets bleken de Pearson III verdeling en de Exponentiele verdeling de voorkeur te verdienen. Uiteindelijk is ervoor gekozen om alleen de Pearson III verdeling te gebruiken. Tot slot is in het onderzoek van Gerretsen geconcludeerd dat de methode met samengestelde verdelingen en verlengde meetreeks de voorkeur verdient. De kleinere marge onnauwkeurigheid (betrouwbaarheidsinterval) is hierbij doorslaggevend geweest.

Onzekerheden

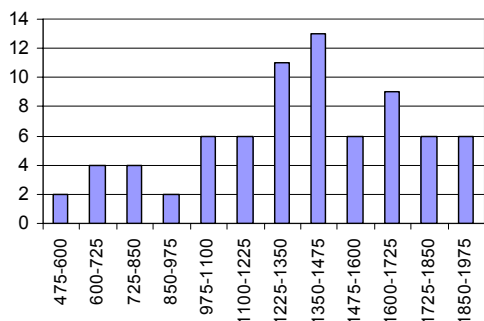
Statistische kwaliteit

1. Kansverdelingstype onzekerheid:

Met het gebruik van de KS toets en de Likelihood ratio toets zijn de meest geschikte kansverdelingfuncties aan de hand van de kwaliteit van de fit bepaald. Beide toetsen zijn algemeen bekend binnen de toegepaste statistiek. Omdat de keuze afhankelijk is van de fit, wordt tevens het hier opvolgende criterium meegenomen. De kansverdelingonzekerheid scoort volgens NUSAP redelijk tot goed vanwege de objectiviteit van de twee hulptoetsen. Omdat er geen visuele beoordeling en gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd, wordt het criterium “goede aanpassing naar een betrouwbaar statistisch model welke de meeste hulptests heeft doorstaan, maar niet allemaal” aangenomen. De score is 3.

2. Fit van de kansverdeling:

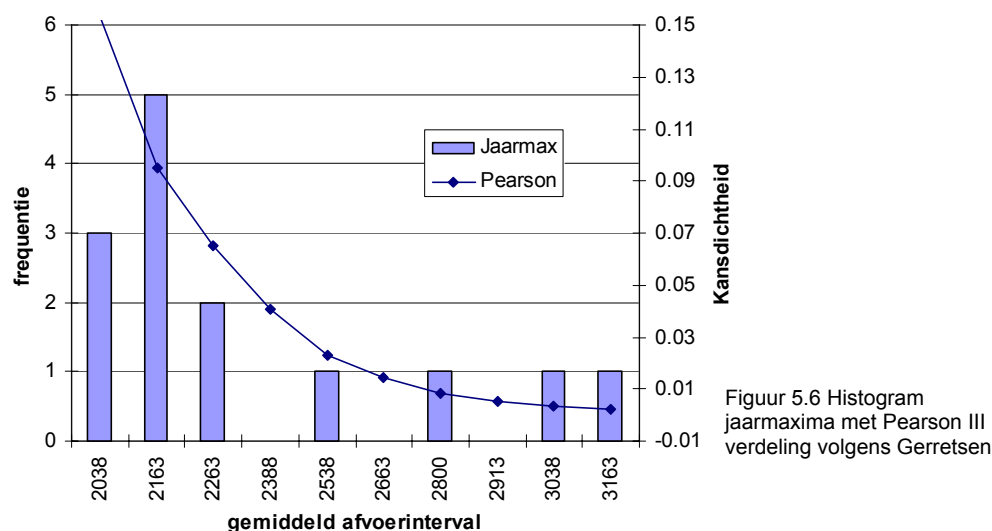
Normaal verdeling: Voor het afvoerinterval 475 – 1.975 m³/s is de Normaal verdeling volgens de KS toets en de Likelihood-ratio toets het meest geschikt bevonden.



Figuur 5.5 Histogram jaarmaxima 475 – 1.975 m³/s

Het histogram geeft niet aan dat er zonder meer sprake is van een Normale verdeling (Gauss-vorm, gelijkmatig verdeeld). Op basis van een visuele beoordeling is er enige twijfel over de geschiktheid van de Normaal verdeling. De beoordeling volgens NUSAP betreft de omschrijving die tussen twee criteria in ligt: “goede aanpassing naar een betrouwbaar statistisch model welke de meeste hulptests heeft doorstaan, maar niet allemaal”, score is 3 en “hulptests niet beduidend gepasseerd, model geen duidelijke betrekking op gegevens, of model gekozen op basis van gelijkaardige gegevens”, score is 2. De uiteindelijke score is 2,5

Pearson-III verdeling: De Pearson III verdeling is op een alternatieve wijze gefit. Daarvoor wordt eerst de scheefheidscoëfficiënt voor de afvoerreeks $1.975 - 3.175 \text{ m}^3/\text{s}$ berekend. Voor een bekende scheefheidscoëfficiënt en het Pearson III verdelingstype bestaat volgens Foster een relatie met de overschrijdingskansen (Gerretsen, 2001). De verdeling is ook gefit voor de reeks afvoerpieken en bleek vrijwel samen te vallen met de Exponentiele verdeling. Het histogram met de Pearson III verdeling volgens Gerretsen (Figuur 5.6) geeft een redelijke indruk van de fit. Maar het aantal afvoeren waarop de fit is gebaseerd is met 14 zeer laag. Wordt de vuistregel op de volgende pagina voor het betrouwbaarheidsinterval gehanteerd dan heeft het interval een breedte van $2 * 36\% = 72\%$. De onzekerheid is daarom erg groot. Het volgende criterium volgens NUSAP is van toepassing: "hulptests niet beduidend gepasseerd, model geen duidelijke betrekking op gegevens, of model gekozen op basis van gelijkaardige gegevens", score is 2.



Figuur 5.6 Histogram jaarmaxima met Pearson III verdeling volgens Gerretsen

3. Betrouwbaarheidsinterval

Het betrouwbaarheidsinterval van de Pearson III verdeling gebaseerd op de verlengde reeks jaarmaxima is bij de maatgevende afvoer zeer smal als deze vergeleken wordt met de RWS onderzoeken. De berekening is gebaseerd op een eenvoudige formule waarmee de onder- of bovengrens (geen onderscheid) van het interval wordt berekend. namelijk:

$$\frac{1,36}{\sqrt{n}} \text{ met } n \text{ de meetreekslengte, (Yevjevich, 1972)}$$

Voor de verlengde reeks jaarmaxima is de onnauwkeurigheid door Gerretsen vervolgens geschat op:

$$\frac{1,36}{\sqrt{429}} = 6,5\%$$

Voor de niet verlengde reeks afvoerpieken is de onnauwkeurigheid groter:

$$\frac{1,36}{\sqrt{89}} = 14,5\%$$

Verdelingsfunctie	Betrouwbaarheidsinterval			Spreiding BI
	Q ₁₂₅₀	- 95%	+ 95%	
Pearson III JM verlengd	3337	(-6,5%) 3120	(+6,5%) 3550	13 %
Pearson III AP	3880	(-14,5%) 3320	(+14,5%) 4440	29 %

Tabel 5.14 Betrouwbaarheidsintervallen onderzoek Gerretsen

De berekeningsmethode van het betrouwbaarheidsinterval is erg gesimplificeerd en moet daarom niet als zuiver betrouwbaar worden opgevat. Van de Pearson verdeling die alleen is gefit op de hoogste 14 afvoeren is het betrouwbaarheidsinterval geschat op basis van 429 deels fictieve afvoeren. De gegeven spreiding geeft daarom geen goede indicatie voor vergelijk met de overige onderzoeken.

Methode kwaliteit:

1. Parameterschatting:

De methode om te kiezen voor een geknikte frequentie verdeling is verder nog niet eerder toegepast in Nederland voor de frequentieanalyse voor extreme afvoeren. De parameterschatting (met relaties volgens Foster uit: Weingartner, 1974) zoals is gebeurt voor de Pearson III verdeling is ook niet bekend. Een zoekpoging op internet leverde ook niets op. De methode is volgens NUSAP te omschrijven als: "niet bewezen methoden, twijfelachtige betrouwbaarheid", score is 1

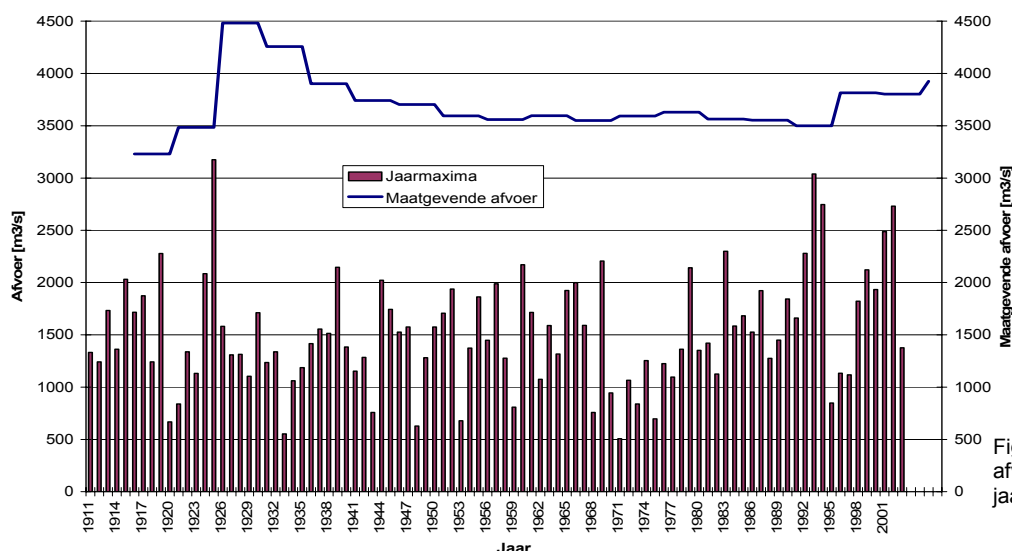
2. Maatgevende afvoer:

De keuze voor de maatgevende afvoer gaat uit van een vergelijk met het resultaat van het Boertien II onderzoek en het berekeningsresultaat uit het door Gerretsen gedane onderzoek. Gerretsen heeft tijdens de berekeningen al keuzes gemaakt voor een voorkeursverdeling. De beoordeling is daardoor al uitgevoerd bij de statistische kwaliteit, onder kansverdelingstype-onzekerheid. Evenals het onderzoek van Klunhaar kan een beoordeling hier achterwege blijven.

5.2.7 Gevoeligheidsanalyse

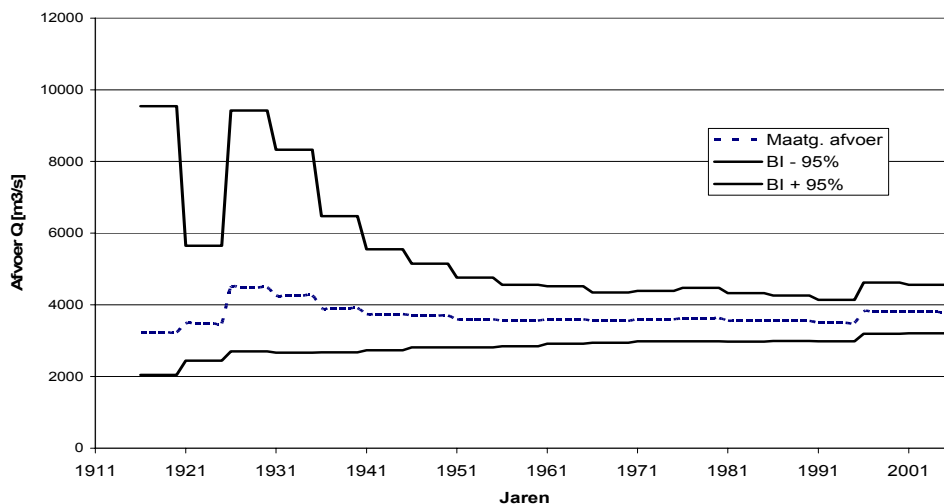
De gevoeligheidsanalyse geeft inzicht in karakteristieken van de door RWS gebruikte statistiek. De resultaten van de gevoeligheidsanalyse worden gebruikt voor de eindbeoordeling van de huidige maatgevende afvoer. In hoofdstuk 6 wordt hierop teruggekomen. Voor de gevoeligheidsanalyse worden de vier gebruikelijke verdelingen – Pearson-III, Lognormaal, Gumbel en Exponentieel – inclusief betrouwbaarheidsintervallen gebruikt en onderworpen aan de invloed van de meetreekslengte. Voor de berekeningen is voornamelijk van de MOM-methode gebruik gemaakt. De MLE-parameterschatting is uitgevoerd met het softwareprogramma FLOODS (Institute of Hydrology UK, 1995) voor de Lognormaal en Gumbel verdeling (Figuur 5.11).

De reeks jaarmaxima die gebruikt wordt voor de frequentieanalyse bestaat nu uit ongeveer 100 waarden. In hoeverre de huidige meetreeks een acceptabele zekerheid geeft voor afvoeren met hogere herhalingsjijd kan worden onderzocht door de invloed van de meetreekslengte op de resultaten van de frequentieverdelingen te analyseren. Deze invloed is zichtbaar te maken door verschillende maatgevende afvoeren te berekenen voor een steeds langer wordende meetreeks, beginnende bij het jaar 1916 (Figuur 5.7).



Figuur 5.7 Maatgevende afvoer en ben jaarmaxima 1911-2006

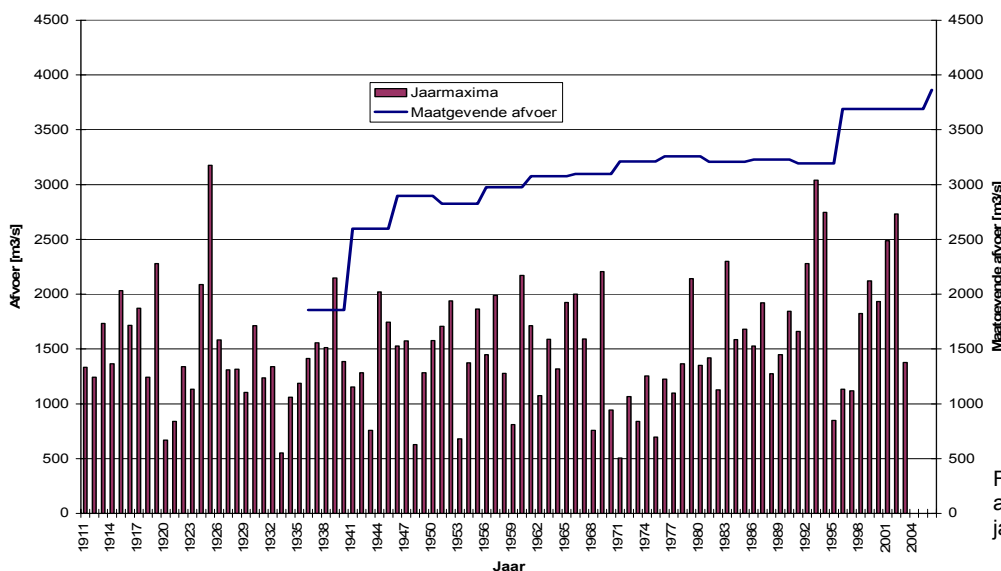
Het bijbehorende betrouwbaarheidsinterval geeft duidelijk de hogere zekerheid weer (want smaller interval) naarmate de reeks langer wordt (Figuur 5.8).



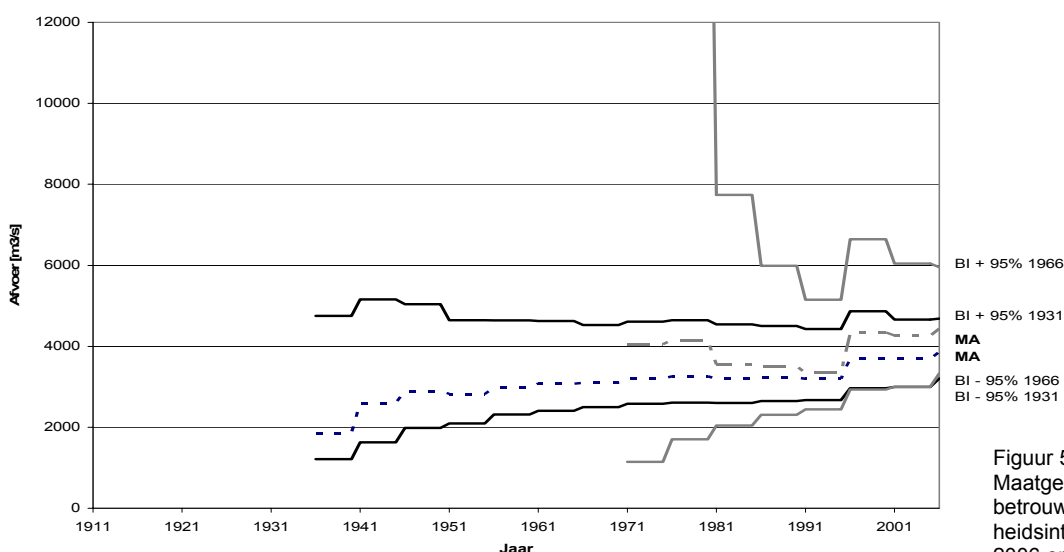
Figuur 5.8 Maatgevende afvoer en 95% betrouwbaarheidsinterval 1911-2006

Het betrouwbaarheidsinterval in Figuur 5.8 lijkt na 1970 nauwelijks meer te convergeren. Zolang er onregelmatig en met langdurige tussenpozen geen extreme afvoeren voorkomen, zal het betrouwbaarheidsinterval niet meer veel smaller worden. De breedte van het betrouwbaarheidsinterval is na het hoogwater van 1993 en 1995 weer toegenomen.

Het hoogwater van 1926 blijkt in ieder geval lang na het optreden een belangrijke invloed te hebben op de maatgevende afvoer. Als met dezelfde berekeningen 20 jaar later wordt begonnen, dus na het hoogwater van 1926, dan ziet het verloop er behoorlijk anders uit. De Lognormaal verdeling is overigens in deze analyse niet meer betrokken omdat deze niet te fitten was volgens de MOM methode in Excel. De 'fout' zit bij de verschuivingsparameter die voor de meeste reekslengtes na 1931 niet negatief bleek te zijn. De schatting van de parameter is dan niet te combineren met de Lognormaal verdeling. Ook in het softwareprogramma FLOODS bleek de Lognormaal verdeling voor zowel de MOM als MLE parameterschatting een 'fitting failure' te geven. Hierdoor heeft de maatgevende afvoer, die bestaat uit een middeling van de uitkomsten, een hogere gevoeligheid gekregen. Met het betrekken van de Lognormaal verdeling wordt de sterke gevoeligheid van de Pearson III verdeling enigszins uitgemiddeld.

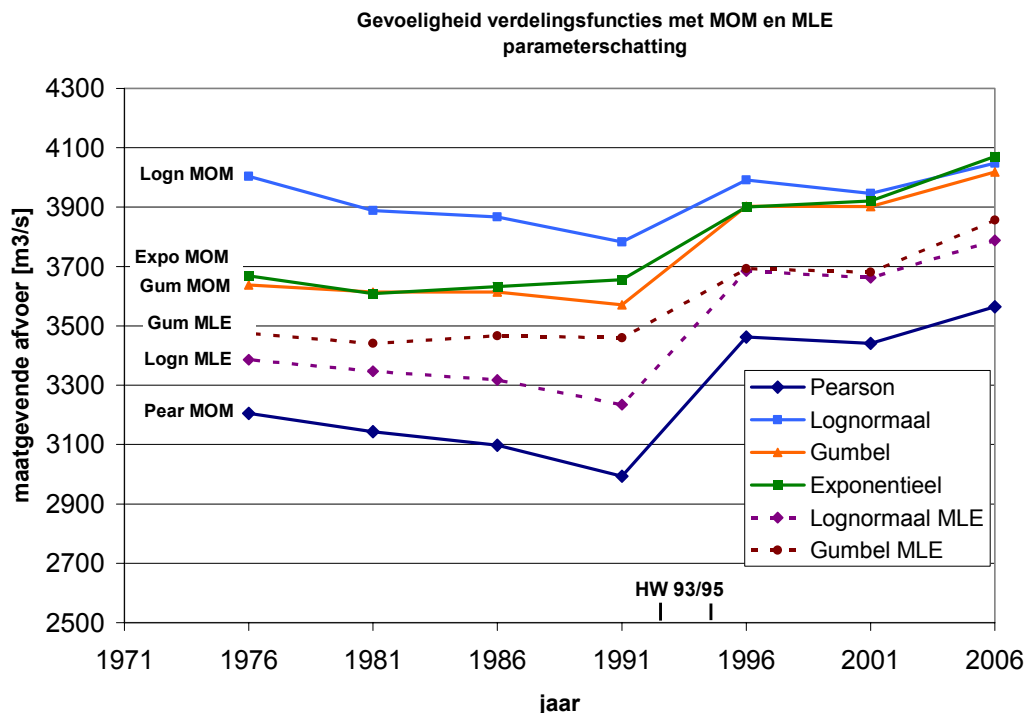


Figuur 5.9 Maatgevende afvoer na 1931 en jaarmaxima 1911-2006



Figuur 5.10 Maatgevende afvoer en betrouwbaarheidsintervallen 1931-2006 en 1966-2006

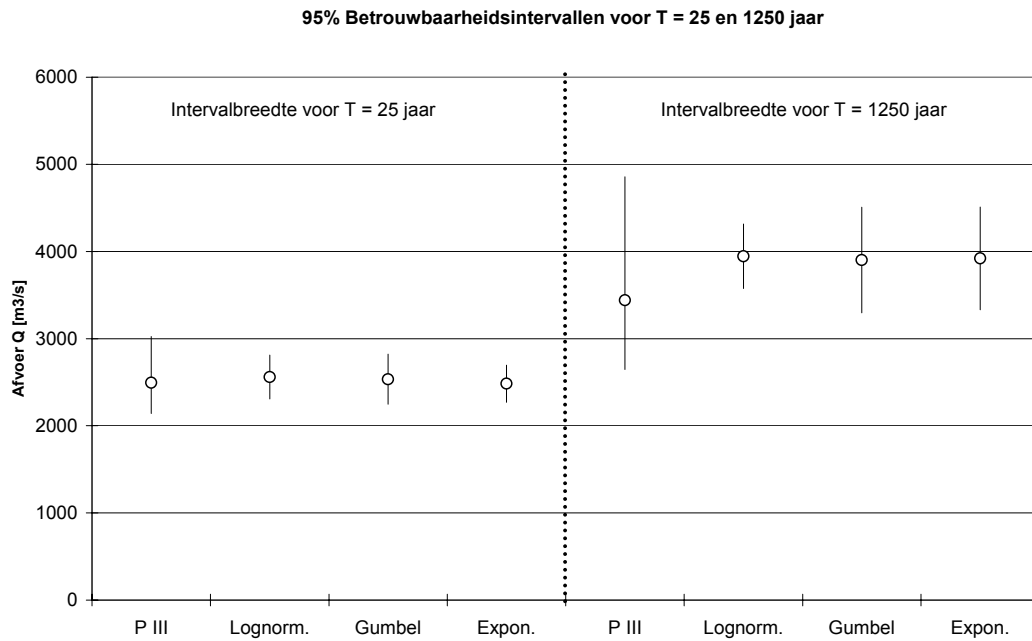
Figuur 5.10 geeft de maatgevende afvoer met betrouwbaarheidsintervallen voor zowel de reeks met beginjaar 1931 (zwarte lijnen) en met beginjaar 1966 (grijze lijnen). Het betrouwbaarheidsinterval heeft voor de MA na 1931 aan de + 95% zijde meer breedte dan de MA die vanaf 1931 is berekend. De oorzaak ligt bij het wegvallen van de Lognormale verdeling waardoor de Pearson III verdeling - met een duidelijke gevoeligheid voor hoge afvoeren - meer gewicht heeft gekregen in de berekening. De maatgevende afvoer berekend met de reeks 1911-2003 is $3.925 \text{ m}^3/\text{s}$. Met de reeks 1931-2003 komt de maatgevende afvoer uit op $3.864 \text{ m}^3/\text{s}$. De gevoeligheid van de afzonderlijke kansverdelingsfuncties kan ook gevisualiseerd worden zoals is weergegeven in Figuur 5.11.



Figuur 5.11 Gezamenlijke plot verdelingsfuncties met MOM en MLE parameterschatting voor de 'fictieve' maatgevende afvoeren van 1976 t/m 2006

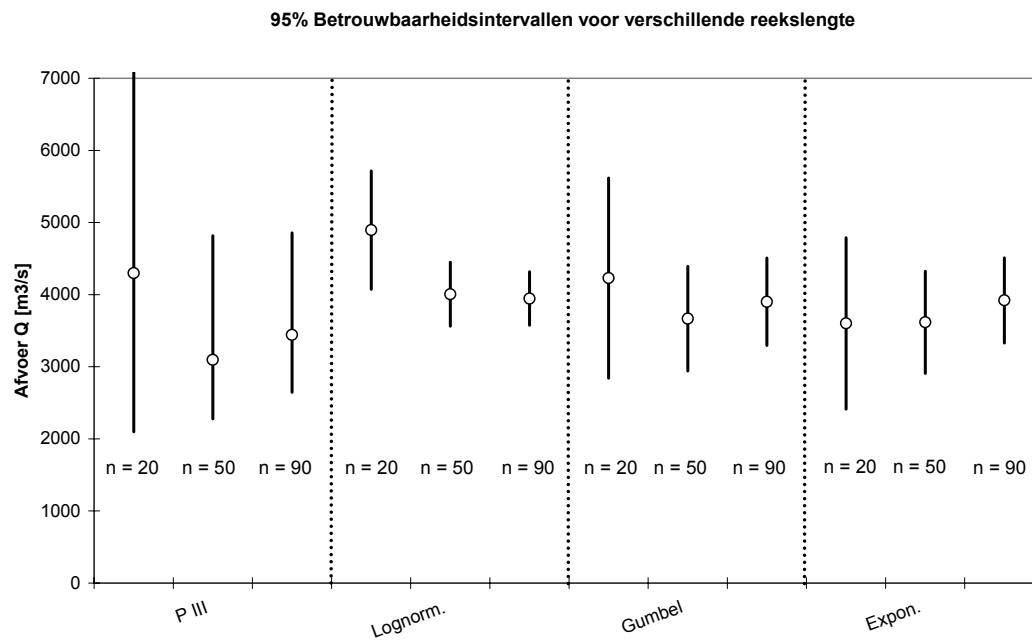
Opvallend is dat de Lognormaal-, Exponentieel- en Gumbel verdeling met MOM parameterschatting na verloop van tijd tot nagenoeg eenzelfde uitkomst komen. De bewijskracht van de afzonderlijke schattingen wordt daardoor ondersteund. De Gumbel en Lognormale verdeling met MLE parameterschatting vertonen veel gelijkens na het optreden van de extreme afvoeren van 1993 en 1995. Daarna wijken ze weer geleidelijk van elkaar af. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de Gumbel en Lognormaal verdeling verschillende karakters hebben behalve voor extremen. De meest gevoelige verdeling blijkt de Pearson III met MOM parameterschatting die tevens een beduidend lagere schatting geeft voor de maatgevende afvoer.

De RWS methode met MLE parameterschatting voor alle verdelingen behalve de Exponentieel verdeling geeft meer onderlinge verschillen (Figuur 5.3) dan de MOM parameterschatting (Figuur 5.11). Bij de HR2001 worden twee hoge en twee lage schattingen voor de maatgevende afvoeren gegeven. Met een gelijke verdeling aan resultaten die zich enigszins tegenspreken is een middeling van de uitkomsten vlug gemaakt.



Figuur 5.12 Intervallen en afvoeren bij T = 25 jaar en T = 1250 jaar en reekslengte n = 90

In Figuur 5.12 zijn de MA's en de intervallen van de vier verdelingsfuncties voor herhalingstijden van 25 en 1250 jaar weergegeven. Bij een korte herhalingstijd verschillen zowel de maatgevende afvoeren en intervalbreedtes nauwelijks. Maar bij een lange herhalingstijd zijn de verschillen duidelijk. De Gumbel- en Exponentiele verdeling hebben als enigen nog vergelijkbare resultaten maar de Pearson-III verdeling steekt hierbij erg af.



Figuur 5.13 Intervallen en afvoeren bij T = 1250 jaar en reekslengtes van n = 20, n = 50, n = 90

In Figuur 5.13 zijn de intervallen en afvoeren voor de verdelingsfuncties weergegeven onder invloed van de lengte van de invoerreeks. Hierbij is de reeks jaarmaxima 1911-2003 de invoerreeks. Het interval van de Pearson III verdeling loopt bij de kortste meetreeks ($n = 20$) tot bijna $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Om de overige intervallen nog duidelijk weer te geven is ervoor gekozen het Pearson III interval voor de kortste meetreeks niet in zijn geheel af te beelden. Wat opvalt is dat bij een meetreekslengte van 50 en langer de intervalbreedte van de vier verdelingen nauwelijks meer verandert. Bij de Lognormale verdeling valt weer op dat de afvoer alsmaar afneemt bij verlenging van de meetreeks. De overige verdelingen zijn meer gevoelig gebleken voor de topafvoeren die na 1993 zijn opgetreden. Er lijkt sprake te zijn van een logaritmische afname van de intervalbreedte in relatie met de meetreekslengte. Een aantal conclusies kunnen aan de hand van de gevoeligheidsanalyse worden getrokken:

1. Aangetoond is dat de gevoeligheid van de kansverdelingfuncties afneemt naarmate de tijdserie met jaarmaxima langer wordt.
2. Het betrouwbaarheidsinterval lijkt bij een langer wordende tijdserie nauwelijks nog te convergeren. Bij een consistente meetreeks wordt het betrouwbaarheidsinterval – zij het logaritmisch – altijd smaller. Vanwege de extreme afvoeren in 1993 en 1995 is het interval weer toegenomen.
3. De maatgevende afvoer berekend met de reeks 1911-2003 is $3.925 \text{ m}^3/\text{s}$. Met de kortere reeks 1931-2003 zonder de extreme afvoer van 1926 komt de maatgevende afvoer uit op $3.864 \text{ m}^3/\text{s}$. Het verschil is opmerkelijk klein, maar de gevoeligheid voor ‘nieuwe’ hoge afvoeren is groter geworden. Dat kan een argument zijn om niet te kiezen voor meetreeksverkorting. Voor het waterbeleid gaat de voorkeur uit naar lange termijn visies gebaseerd op robuuste voorspellingen. Op die grond is het beter om geen meetreeksverkorting toe te passen.
4. MLE parameterschatting in combinatie met meerdere verdelingsfuncties leidt tot meer tegensprekende resultaten dan de MOM parameterschatting. Met de MLE methode worden telkens twee hoge en twee lage schattingen gegeven. Voor de HR 2006 zijn de schattingen van de vier verdelingsfuncties: $3.745 \text{ m}^3/\text{s}$, $3.757 \text{ m}^3/\text{s}$, $4.179 \text{ m}^3/\text{s}$ en $4.172 \text{ m}^3/\text{s}$. Bij de MOM methode hebben drie verdelingen een gelijkwaardige uitkomst tegenover één die daarvan afwijkt. Met dezelfde invoerreeks als de HR 2006 zijn de schattingen respectievelijk: $3.564 \text{ m}^3/\text{s}$, $4.048 \text{ m}^3/\text{s}$, $4.019 \text{ m}^3/\text{s}$ en $4.070 \text{ m}^3/\text{s}$. De MOM methode geeft meer overeenstemmende resultaten wat leidt tot een sterkere argumentatie voor vaststelling van de maatgevende afvoer dan de MLE methode. Waarschijnlijk is de hogere kwaliteit van de fit met de MLE methode bij de RWS onderzoeken doorslaggevend achter de keuze. Dat is objectief misschien de beste keuze geweest, maar de keuze voor de maatgevende afvoer (het middelen) is tenslotte weer erg subjectief.

5.3 Overzicht beoordeling onzekerheden

Gekwalificeerde onzekerheden	Boertien I	Boertien II	HR 2001	HR 2006	Klunhaar	Gerretsen
Statistisch						
Kansverdelings-typeonzekerheid	1	1	1	1	3	3
Fit van de kansverdeling	2	2	2	2	2,5	(2,5)**
	3	3	3	3		
	1,5	1,5	1,5 (4)*	1,5		
Betrouwbaarheidsinterval	42,2%	45,6%	-	43,7%	52,8%	13%
	40,1%	44,0%	-	43,4%		
	27,9%	26,9%	-	26,8%		
	38,3%	40,4%	-	37,4%		
Gemiddelde	2,13	2,13	2,13	2,13	2.75	2.5

Tabel 5.15 Overzicht statistische beoordeling kwaliteit volgens NUSAP

*) De score van 4 behoort bij de Rayleigh verdeling maar is niet meegenomen voor de bepaling van de MA

***) De beoordeling van de Normaal verdeling wordt niet meegenomen omdat deze geen rol speelt bij de

Gekwalificeerde onzekerheden	Boertien I	Boertien II	HR 2001	HR 2006	Klunhaar	Gerretsen
Empirisch						
Basismetreeks	2,1	2,1	2,1	2,22	2,1	2,1
Toegevoegde Historische afvoeren					2	2
Methodisch						
Parameterschatting	3	3	3	3	2,5	1
Bepaling MA	2	2	2	2		

Tabel 5.16 Overzicht empirische en methodische beoordeling kwaliteit volgens NUSAP

6. Beoordeling maatgevende afvoer

6.1 Voortplanting van onzekerheden

Voor het doen van een uitspraak over de kwaliteit van de maatgevende afvoer (MA) is het van belang te weten in hoeverre de afzonderlijk bepaalde onzekerheden doorwerken in het berekeningsproces. De onzekerheden zoals beoordeeld in de hoofdstukken 2 tot en met 5 zijn onderverdeeld in gekwantificeerde en gekwalificeerde onzekerheden. Allereerst worden de gekwantificeerde onzekerheden doorgenomen, daarbij de processtappen voor de berekening van de maatgevende afvoer volgend. Daarna komen de gekwalificeerde onzekerheden aan bod.

6.1.1 Voortplanting gekwantificeerde onzekerheden

De analyse is gebaseerd op de gekwantificeerde onzekerheid welke is geformuleerd als een procentuele spreiding. De spreiding van de diverse elementen in het berekeningsproces van de MA is voor processtap 1: 'Meting H en Q' en 2: 'QH-relatie' bepaald. In de processtappen daarna zijn geen gekwantificeerde onzekerheden meer bepaald. Dit komt omdat na de tweede processtap geen data meer is toegevoegd waarvoor een individuele beoordeling gedaan kon worden. Aangezien de data die is voortgekomen uit processtap 1 en 2 wordt gebruikt tot en met de laatste processtap, moeten de onzekerheden ook tot en met de laatste processtap bepaald worden. De 'voortplanting' van de gekwantificeerde onzekerheden wordt in de volgende paragrafen geanalyseerd.

1. Meting Q en H:

Hierbij worden vier meetgrootheden onderscheiden, te weten: stroomsnelheidsmeting (u), dwarsprofielmeting (A), waterstandsmeting (H) en debietmeting met ADM vanaf 2000 (Q_2). Het debiet Q_1 , geldend vanaf 1911 wordt berekend door 'u' te vermenigvuldigen met 'A'. De spreiding van Q_1 bestaat daardoor uit het product van de spreiding in de meetdata van de stroomsnelheid en het dwarsprofiel. Uit de analyse in hoofdstuk 2 is gebleken dat de spreiding van het gemeten dwarsprofiel verwaarloosbaar is voor hoogwatersituaties. De spreiding van de Q_1 bestaat daardoor alleen uit de spreiding van de meetdata behorende bij de stroomsnelheidsmeting. De debietmeting met de ADM is een stroomsnelheidsmeting waarbij het – in de software verwerkte - dwarsprofiel automatisch met de gemeten stroomsnelheid wordt vermenigvuldigd. Tabel 6.1 geeft een overzicht van de verschillende spreidingen voor de onderscheiden perioden. De spreiding van de ADM wordt voor de laatste periode eraan toegevoegd omdat deze naast de stroomsnelheidsmeting wordt gebruikt voor controle van de QH-relatie.

	1911	1918	1933	1951	1956	1965	1971	1975	1988	2000
	1917	1932	1950	1955	1964	1970	1974	1987	1999	2007
Q	10%	10%	10%	10%	5%	5%	5%	5%	5%	5% 2,5%
H	3cm	3cm	3cm	3cm	3cm	3cm	3cm	1cm	1cm	1cm

Tabel 6.1 Spreiding Q en H

De metingen zijn gebruikt voor de constructie en controle van de QH-relatie. Hoe de onzekerheid in de vorm van de spreiding wordt verdisconteerd in de QH-relatie, wordt in de volgende processtap verklaard.

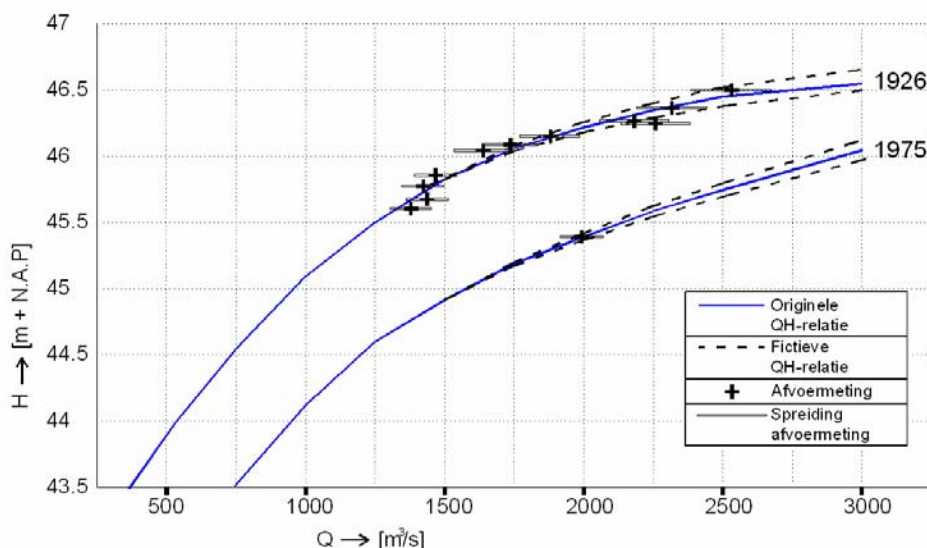
2. QH-relatie:

De QH-relatie bestaat uit een handmatig bepaalde curve, gebaseerd op afvoermetingen (Barneveld, pers. comm. 2006). Er is geen standaardformule waarmee de curve is te omschrijven. De vorm van de curve is afhankelijk van de vorm van het stroomvoerende oppervlak van de rivier en die is niet met een (machts)functie te omschrijven. Alleen voor het niet gemeten gedeelte wordt met een machtsfunctie gewerkt (Barneveld, pers. comm. 2006). De onzekerheid van de QH-relatie is afhankelijk van twee onzekerheidsbronnen: De meetpuntonzekerheid, afkomstig uit hoofdstuk 2 (Tabel 6.1) en de periode specifieke onzekerheden, afkomstig uit hoofdstuk 3. Dit zijn onzekerheden die alleen in een bepaalde periode zijn voorgekomen welke invloed hebben op de betrouwbaarheid van de QH-relatie (onder andere meetverschillen met België en bodemdaling). Beide onzekerheden zijn samengevat in Tabel 6.2.

	1911	1918	1933	1951	1956	1965	1971	1975	1988	2000
	1917	1932	1950	1955	1964	1970	1974	1987	1999	2007
Meting	10%	10%	10%	10%	5%	5%	5%	5%	5%	4%
Periode	13%	13%	9%	2%	2%	2%	5%	5%	2%	1%

Tabel 6.2 Meetpuntonzekerheid en periode specifieke onzekerheid.

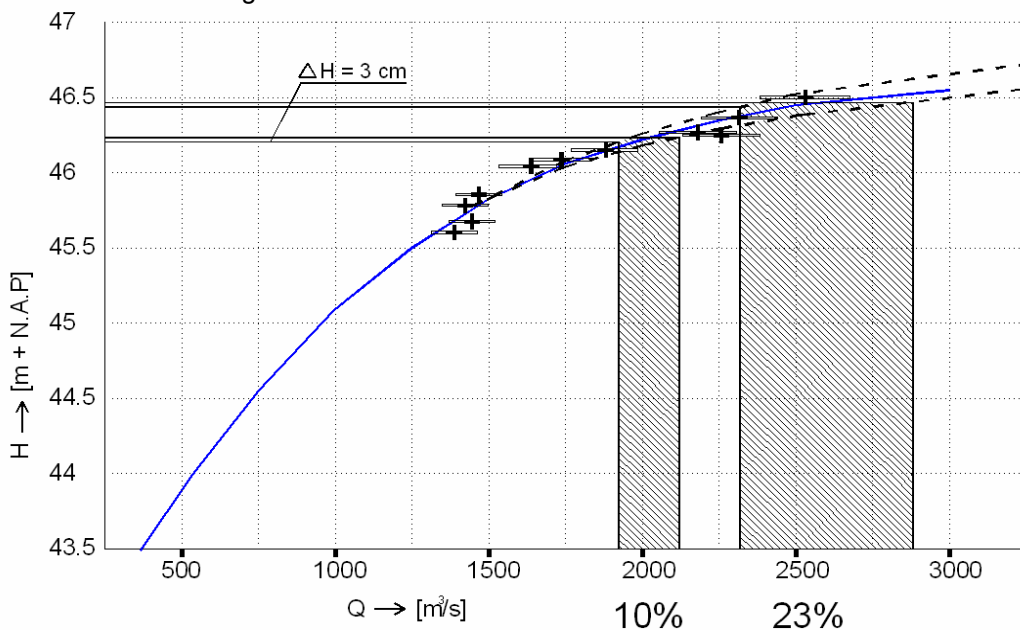
De vraag is hoe deze onzekerheidsbronnen zich voortplanten in de QH-relatie. Omdat de QH-relatie op een grafische wijze is bepaald, wordt de onzekerheid hier eveneens grafisch bepaald. Dat gebeurt door van een aantal afwijkende QH-relaties te maken ten opzichte van de 'originele' QH-relatie, gebaseerd op de onzekerheden in tabel 6.2. De mate waarin de onzekerheden doorwerken is voor een groot gedeelte afhankelijk van de vorm van de QH-relatie. Aangezien er naar de vorm van de curven twee soorten te onderscheiden zijn – vóór 1940 en ná 1955 – geschiedt de analyse op twee QH-relaties. Voor de analyse worden de relaties van 1926 en 1975 gebruikt. De werkwijze wordt aan de hand van Figuur 6.2 toegelicht.



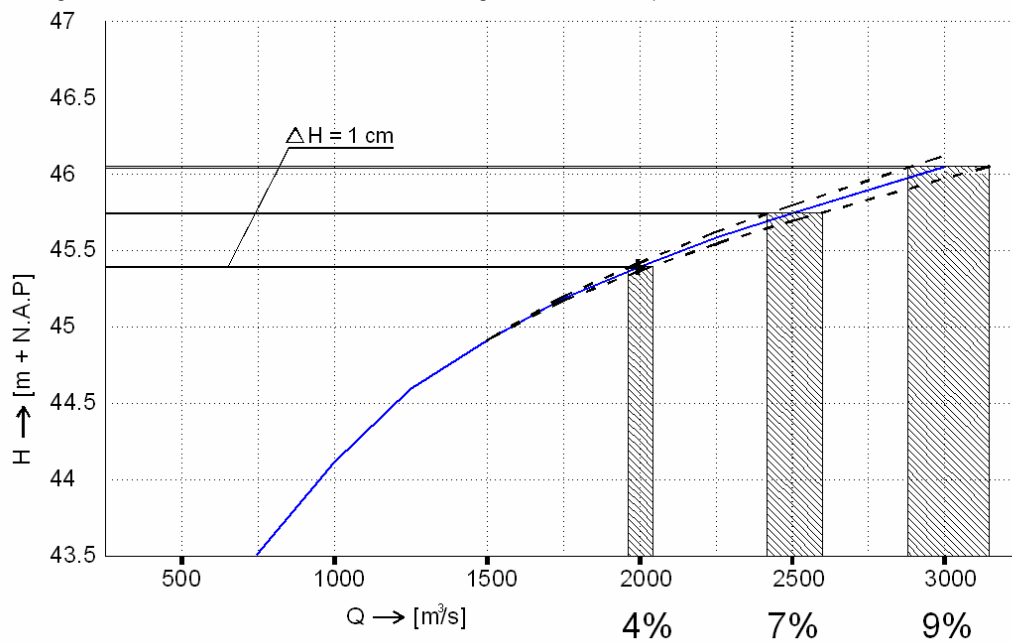
Figuur 6.1 QH-relaties 1926 en 1975 met spreiding meetdata en periode specifieke onzekerheid (stippellijnen)

De blauwe ononderbroken curves zijn de originele QH-relaties gebaseerd op de afvoermetingen die met een kruisje zijn aangegeven. De spreiding rond de afvoermetingen is aangegeven met de horizontale lijnen. De hoogste afvoermeting bij de relatie van 1926 was 2.508 m³/s. De spreiding van de afvoermeting in de periode 1911-1950 is 10%, wat neerkomt op 125 m³/s aan de linkerkant (-5%) en 125 m³/s aan de rechterkant (+5%) van de meting. Om de onzekerheid van de meting te laten doorwerken op de QH-relatie worden de meetpunten eerst links naar het uiterste van het

spreadingsinterval verschoven en daarna naar rechts. Voor de situatie met de ‘fictieve’ meetpunten aan de linkerzijde wordt een nieuwe QH-relatie ingetekend. Dit gebeurt ook voor de ‘fictieve’ meetpunten aan de rechterkant. Op deze manier ontstaan twee alternatieve QH-relaties. Tegelijk met het intekenen wordt rekening gehouden met de periode specifieke onzekerheid (zie Tabel 6.2). Deze is inherent aan de QH-relatie en geeft de minimale spreiding voor de te construeren alternatieve QH-relaties (stippelijnen). Daardoor is de horizontale afstand tussen de fictieve QH-relaties – voor de hoge afvoeren – altijd groter of gelijk aan de periode specifieke onzekerheid. Met de zo ontstane alternatieve QH-relaties kunnen opnieuw afvoeren worden afgeleid. Deze stap is afgebeeld in Figuur 6.2 en 6.3 voor de twee verschillende QH-relaties. Voor de waterstanden die als voorbeeld zijn ingevoerd is rekening gehouden met onzekerheid door het intekenen van een dubbele lijn (ΔH). Door voor deze waterstanden de twee alternatieve QH-relaties af te lezen ontstaan twee afgeleide afvoeren. De afstand tussen de afvoeren voor de twee uiterste curven is vervolgens de voortgeplante onzekerheid afkomstig uit tabel 6.2.



Figuur 6.2 QH-relatie 1926 met onzekerheid afgeleide Q voor resp 2.000 en 2.500 m³/s.



Figuur 6.3 QH-relatie 1975 met onzekerheid afgeleide Q voor resp. 2.000, 2.500 en 3.000 m³/s.

De alternatieve QH-relaties zijn evenals als de originele relatie 'handmatig' ingetekend. Hiervoor is ter ondersteuning het grafische softwarepakket AutoCAD gebruikt. Voor de voortplanting van de onzekerheden is het feit dat dit handmatig gebeurt een belangrijk gegeven. De onzekerheden die in de hoofdstukken 2 en 3 zijn geanalyseerd worden op grafische wijze bij elkaar gebracht, zonder rekenkundige hulpmiddelen. Het grafische element mist daardoor een objectieve toets. Voor de analyse naar de voortplanting van de onzekerheden is de subjectieve insteek van het handmatig opmaken van de QH-relatie een lastig aspect. Het objectief vaststellen van de gepropageerde onzekerheden na de processtap QH-relatie is bijna niet mogelijk. Het is eerder een schatting. Voor de eindanalyse is het daarom van belang om naast de gepropageerde gekwantificeerde onzekerheden de onafhankelijk bepaalde onzekerheden bij de beoordeling te betrekken. Nu de spreiding van de afgeleide Q's bekend is, kan deze worden meegenomen naar de volgende processtap.

3. Tijdserie hoge Q:

De gekwantificeerde onzekerheid van de tijdserie bestaat alleen uit de spreiding afkomstig van de QH-relaties. In hoofdstuk 4 zijn de methoden voor het samenstellen en omgaan met de tijdseries geëvalueerd en zijn alleen beoordeeld op gekwalificeerde onzekerheden. Voor de afvoeren tot 1950 wordt een spreiding zoals in Figuur 6.2 aangenomen. Voor de afvoeren na 1950, wordt een spreiding zoals in Figuur 6.3 aangenomen. Aangezien het een spreiding is wordt het gehalveerde percentage aan de originele tijdserie toegevoegd of er vanaf getrokken. Tabel 6.3 geeft hiervan een overzicht.

Tijdserie 1911-1950		Tijdserie 1951-2003	
$1.250 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q < 2.000 \text{ m}^3/\text{s}$	$\pm 5\%$	$1.250 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q < 2.000 \text{ m}^3/\text{s}$	$\pm 2\%$
$Q \geq 2.000 \text{ m}^3/\text{s}$	$\pm 11,5 \%$	$2.000 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q < 2.500 \text{ m}^3/\text{s}$	$\pm 3,5\%$
		$Q \geq 2.500 \text{ m}^3/\text{s}$	$\pm 4,5\%$

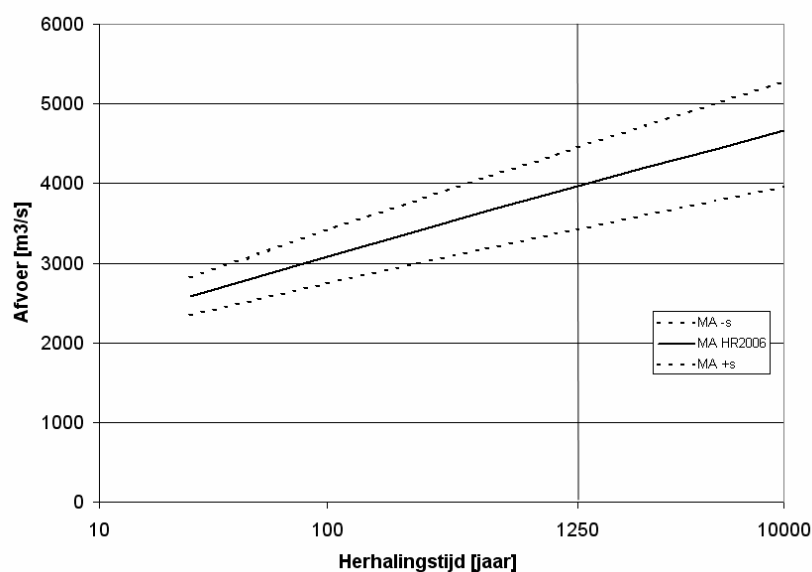
Tabel 6.3 Spreidingen voor de fictieve tijdseries

Voor het gehalveerde positieve en negatieve percentage door ontstaan twee fictieve tijdseries met respectievelijk lagere en hogere afvoeren dan de originele tijdserie.

4. Statistiek:

De gewijzigde tijdseries dienen als invoer voor de statistische berekeningen. De berekeningsresultaten bestaan vervolgens uit twee afwijkende maatgevende afvoeren. Het verschil tussen de maatgevende afvoeren ten opzichte van de huidige maatgevende afvoer kan in een percentage worden uitgedrukt. Dit percentage is de voortgeplante gekwantificeerde onzekerheid. Als voorbeeld volgt de berekening volgens de HR2006 en de daarbij gebruikte tijdseries voor de frequentieanalyse. De berekende maatgevende afvoer van de HR2006 is $3.965 \text{ m}^3/\text{s}$.

De hoogste schatting komt na middeling van de resultaten van de vier kansverdelingsfuncties - zoals ook gebruikt voor de gevoeligheidsanalyse - uit op $4.448 \text{ m}^3/\text{s}$ en de laagste op $3.421 \text{ m}^3/\text{s}$ voor een herhalingstijd van 1250 jaar. De verschil van beide afvoeren ten opzichte van de maatgevende afvoer van de HR2006 is verhoudingsgewijs $(4.448-3.421)/3.965 = 0,259$. De gekwantificeerde onzekerheid van de maatgevende afvoer na analyse van de doorwerking van onzekerheden is derhalve 25,9%. In Tabel 6.4 zijn de resultaten samengevat.



Figuur 6.4 Maatgevende afvoer met gepropageerde onzekerheden (stippellijnen)

Tijdserie	MA	verschil t.o.v. HR2006	95% Betrouwbaar- heidsinterval
HR2006 – gekwantificeerde onzekerheid	3.421 m³/s	13,7%	2878 - 3907
HR2006	3.965 m ³ /s		3250 - 4705
HR2006 + gekwantificeerde onzekerheid	4.448 m³/s	12,2%	3546 – 5025
Totaal spreiding		25,9%	

Tabel 6.4 Resultaten voortplanting gekwantificeerde onzekerheden

De asymmetrie in de verschillen ten opzichte van de HR2006 wordt veroorzaakt door de eveneens asymmetrische gevoeligheid van de kansverdelingsfuncties op symmetrische wijzigingen (zie Tabel 6.3) in de data.

De spreiding is na toepassing van de statistiek verder toegenomen. Dat heeft voornamelijk te maken met de extrapolatie voor bepaling van de maatgevende afvoer. Een extrapolatie gebaseerd op data met een gegeven 100 jarige herhalingstijd (de lengte van de tijdserie) naar een schatting met een herhalingstijd van 1.250 jaar maakt de frequentieanalyse gevoelig. De ‘verlenging’ van de herhalingstijd is in verhouding met de gegeven herhalingstijd immers erg groot. Een kleine verandering in de tijdserie heeft daardoor een groot effect op de uitkomst na extrapolatie.

Wanneer ook de betrouwbaarheidsintervallen worden meegenomen – als zijnde de toegevoegde statistische onzekerheid – dan neemt de spreiding van de onzekerheid nog verder toe. De laagste afvoer van de intervallen is 2.878 m³/s en de hoogste is 5.025 m³/s. Wordt dit interval in een procentuele onzekerheid uitgedrukt dan bedraagt deze 54%. Dit percentage bestaat uit een combinatie van de voortgeplante onzekerheden met de statistische onzekerheid na het extrapoleren.

6.1.2 Voortplanting gekwalificeerde onzekerheden

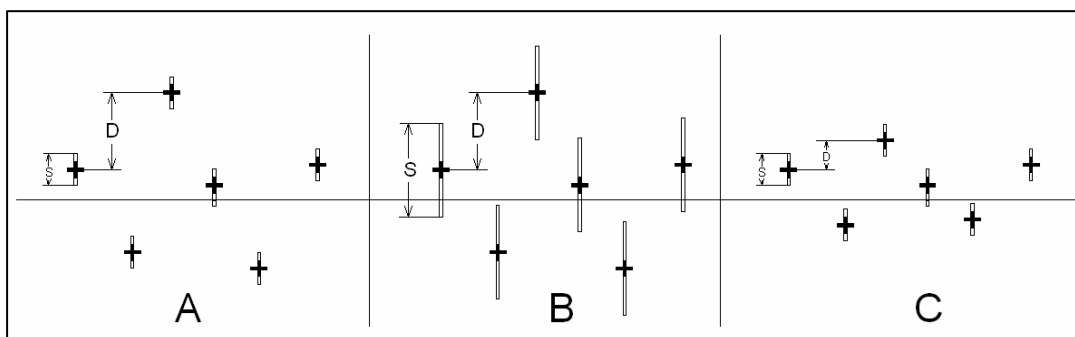
De gekwalificeerde onzekerheden zijn verkregen met behulp van de Pedigree tabel behorend bij de NUSAP methodologie. De statistische, empirische en methodische kwaliteit zijn volgens de Pedigree tabel gewaardeerd met een score. Van der Sluijs *et al.* (2005b) gebruikt een 'Pedigree calculator' waarmee de voortplanting van de individuele Pedigree scores zoals bepaald in de hoofdstukken 2 tot en met 5 berekend kan worden. In Van der Sluijs *et al.* (2005b) is de Pedigree calculator gebruikt voor het 'laten voortplanten' van een aantal simultaan aanwezige individuele parameters voor berekening van een 'overall' Pedigree score. Bovendien hebben alle parameters dezelfde eenheid of een bepaald percentage ervan. In het proces voor de berekening van de maatgevende afvoer is al een 'voortplanting gaande' waardoor eerst moet worden gecontroleerd welke regels van de Pedigree calculator eventueel gebruikt kunnen worden. De Pedigree calculator wordt gebruikt tussen de vijf processtappen door. De rekenregels zijn als volgt (8):

1. Optellen van parameters en variabelen: Gebruik het gewogen gemiddelde gebaseerd op de grootte van de parameter (mean weighted average = MWA) van de scores voor de individuele parameters. De MWA kan berekend worden met de volgende formule (Ellis *et al.* 2000):

$$MWA = \frac{\sum_i^n P_i \cdot \bar{X}_i}{\sum_i^n \bar{X}_i}$$

Met: P_i = Pedigree score van de parameter i
 \bar{X} = gemiddelde van parameter i
 n = aantal parameters dat wordt opgeteld

2. Vermenigvuldiging en deling van parameters: De laagste Pedigree score van alle individuele variabelen geldt (volgens het 'zwakste schakel' principe) als de resulterende Pedigree score;
3. Aftrekking van parameters en variabelen: De voortplanting van de Pedigree score is afhankelijk van de verhouding tussen de spreiding (S) en het verschil tussen de parameters (D). In Figuur 6.6 zijn drie situaties gegeven met verschillende verhoudingen tussen S en D. Van de meetpunten in situatie A is de zekerheid groot (want kleine spreiding). Maar vanwege de grote onderlinge afstand is er weinig eenstemmigheid over de vastlegging van een parameter op basis van de meetpunten. In situatie B zou volgens de verhouding D:S eenzelfde uitkomst verkregen kunnen worden als in situatie C, ondanks de hogere onzekerheid van de metingen. In de handleiding (Ellis *et al.* 2002) voor het gebruik van de Pedigree tabel is niet omschreven hoe hiermee moet worden omgegaan. Bij situatie C liggen de meetpunten dichter bij elkaar waardoor de vastlegging van de parameter met meer zekerheid kan geschieden.



Figuur 6.5 Voorbeeld van verhouding tussen de parameterspreiding (S) en de parameterafstand (D)

De volgende regels zijn bij aftrekking van variabelen en parameters van toepassing:

- Als $D/S > 5$, dan het gewogen gemiddelde gebaseerd op de grootte van de parameter (MWA) toepassen;
- Als $D/S < 2$, reduceer de MWA van de parameter die wordt afgetrokken met 50%;
- Als $5 > D/S > 2$, reduceer het gewogen gemiddelde van de parameter die wordt afgetrokken met $((5 - D/S) \times 50\% / 3)$.

4. Gewogen gemiddelde: Wanneer meer dan één parameter wordt gebruikt (zie Figuur 6.6) voor bepaling van de Pedigree score gelden de volgende regels, met D: het verschil tussen de parameters en S: de spreiding van de parameter:

- Als $D/S < 5$, verhoog de zekerheid door de WA (het gewogen gemiddelde) te verhogen. WA = weighted average, te berekenen met de volgende formule (Ellis *et al.* 2000):

$$WA = \sum_i^n (P_i \cdot W_i)$$

Met: P_i = Pedigree score van de parameter i
 W_i = gewicht van de parameter i

- Als $D/S < 2$, verhoog de zekerheid door $0,5(\text{MAP} - \text{WA})$ toe te voegen aan de gewogen Pedigree score.

MAP is de maximale Pedigree score, gelijk aan 4.

- Als $2 < D/S < 5$, dan $((5 - D/S) \times 50\% / 3)$ toevoegen aan de gewogen Pedigree score.

Voor de drie bovenstaande gevallen geldt dat een maximum van 1 Pedigree score mag worden toegevoegd.

Als de weging op basis van subjectieve schattingen is gebeurd dan geldt dat een maximum van 0,5 Pedigree score mag worden toegevoegd.

In Bijlage 9 is een flowchart van de Pedigree calculator weergegeven.

Ellis *et al.* (2000) concludeerde het volgende over het gebruik van de Pedigree calculator: *"In keeping with their subjective nature, Pedigrees are expressed as ordinals in the text. Using these methods, Pedigrees of subtracted variables are revised downward whenever their differences are more uncertain than their original values, and the Pedigrees of averaged estimates are always greater than single estimates, with significant increases (≤ 1) when multiple measurements on the same variable agree"*

Voor dit onderzoek kunnen niet alle rekenregels worden toegepast en wel vanwege het volgende. De Pedigree scores die in de voorgaande hoofdstukken zijn toebedeeld, zijn niet gebaseerd op individuele parameters maar op instrumenten, modellen en series met data. De meetpunten verkregen uit de stroomsnelheidsmetingen zijn niet individueel beoordeeld maar als groep in een bepaalde periode. Hierdoor wordt het bepalen van 'D' al bemoeilijkt. Hoe hiermee is omgegaan, wordt toegelicht bij het doorlopen van de processtappen.

In Hoofdstuk 3 'QH-relaties' is de weging deels op subjectieve schattingen gebeurd, waarvoor de laatste opmerking in rekenregel 4 is gehanteerd met als verschil dat ook aftrekking van het gewogen gemiddelde is meegenomen. In hoofdstuk 3 is deze rekenregel al verdisconteerd. De derde rekenregel kon niet worden gebruikt omdat van de parameters (beter gezegd: externe factoren) geen D en S berekend kon worden. De externe factoren zijn de meetomstandigheden, verifieerbaarheid hoge afvoermetingen en de actualiteit van de QH-relatie. Deze factoren hebben er in sommige gevallen voor gezorgd dat de score van de QH-relatie met 0,5 of 1 *verlaagd* is op grond van een subjectieve waarneming (zie hoofdstuk 3). Er is gekozen voor het verlagen van de score bij een slechte beoordeling en niet van een verhoging van de score bij een goede beoordeling omdat hiermee wordt beoogd de aandacht te trekken naar de punten waar kwaliteitsverbetering noodzakelijk is.

De afgeleide jaarmaxima zijn eveneens beoordeeld per periode en niet individueel. Hier is sprake van een gemiddelde waardering zoals ook is omschreven in de conclusie van Ellis *et al.* (2000). Maar de tijdserie is opgedeeld in perioden om een nauwkeuriger beoordeling uit te voeren. Voor de 'overall' beoordeling van de tijdserie worden de individuele scores weer bij elkaar gemiddeld. Dat is een ander geval dan bij het vinden van zoveel mogelijk brondata voor het doen van een beoordeling voor de parameter die de data vertegenwoordigt. Volgens Ellis *et al.* (2000): hoe meer data, hoe hoger de score. In het geval van de tijdserie zou verlenging een hogere score moeten verdienen, ware het niet dat de kwaliteit van de toegevoegde historische afvoeren bij de alternatieve onderzoeken lager is waardoor de regel niet opgaat.

De toegepaste statistiek is beoordeeld op de fit van de kansverdelingsfuncties aan de tijdserie zonder in te gaan op de individuele parameters. Een kansverdelingsfunctie met een groot betrouwbaarheidsinterval in verhouding tot de overige kansverdelingsfuncties zorgt voor een verlaging van de Pedigree score. De methode waarmee de parameters geschat zijn, heeft wel een beoordeling gekregen.

Voor een individuele beoordeling van alle parameters is het berekeningsproces van de maatgevende afvoer te omvangrijk voor dit onderzoek. De rekenregels in de Pedigree calculator lenen zich het beste voor Pedigree scores behorende bij individuele afhankelijke parameters. De Pedigree scores in dit onderzoek zijn gebaseerd op gegroepeerde indirect afhankelijke parameters. Ondanks dit verschil worden - waar mogelijk - de rekenregels toegepast. In een aantal gevallen wordt beargumenteerd van het gewogen gemiddelde uitgegaan.

Uiteindelijk leidt de berekening tot één score voor respectievelijk de empirische, methodische en statistische kwaliteit.

1. Meting Q en H:

De individuele scores van de empirische en methodische kwaliteit zijn in Tabel 6.3 gegeven. Hierbij is '0' de laagste waardering en '4' de hoogste waardering.

	1911 1917	1918 1932	1933 1950	1951 1955	1956 1964	1965 1970	1971 1974	1975 1987	1988 1999	2000 2003
Stroomsnelheid 'u'										
empirisch	2.5	2.5	2.5	2.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
methodisch	2	2	2	2	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3
Dwarsprofiel 'A'										
empirisch	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	4
methodisch	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Tabel 6.5 Overzicht kwalitatieve beoordeling meting u, Q en A

Het debiet 'Q' dat berekend is met $u \cdot A$ geldt voor de gehele periode 1911-2003. Hiervoor is de tweede rekenregel 'vermenigvuldiging en deling' van toepassing. In alle gevallen is de empirische kwaliteit van de stroomsnelheid lager dan het dwarsprofiel. De waarden van de stroomsnelheid worden aangenomen als voortgeplante empirische kwaliteit. De methodische kwaliteit van de dwarsprofielmeting is na 1956 lager dan de stroomsnelheidsmeting. De Pedigree scores worden daardoor gedeeltelijk overgenomen voor de voortgeplante methodische kwaliteit. Sinds 2000 is de debietmeting met de ADM (Q_{ADM}) er bijgekomen. Toevallig is de beoordeling van Q en Q_{ADM} ($e = 3.5$, $m = 3$) voor de periode 2000-2003 gelijk waardoor niet van een gewogen gemiddelde hoeft worden uitgegaan. De resulterende beoordeling van Q is gegeven in Tabel 6.6.

	1911 1917	1918 1932	1933 1950	1951 1955	1956 1964	1965 1970	1971 1974	1975 1987	1988 1999	2000 2003
Debiet 'Q'										
empirisch	2.5	2.5	2.5	2.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
methodisch	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3

Tabel 6.6 Overzicht kwalitatieve beoordeling Q

Voor het volgende deelproces 'QH-relatie' wordt de waterstandsmeting gebruikt. Deze dient als invoer voor de QH-relatie waarna de afvoer kan worden afgeleid. Het overzicht van de kwalitatieve beoordeling van de waterstandsmeting is in Tabel 6.7 weergegeven.

	1911 1917	1918 1932	1933 1950	1951 1955	1956 1964	1965 1970	1971 1974	1975 1987	1988 1999	2000 2003
Waterstand 'H'										
empirisch	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	4
methodisch	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4

Tabel 6.7 Overzicht kwalitatieve beoordeling H

Met de Pedigree scores van Q en H kan de analyse vervolgd worden voor de QH-relatie.

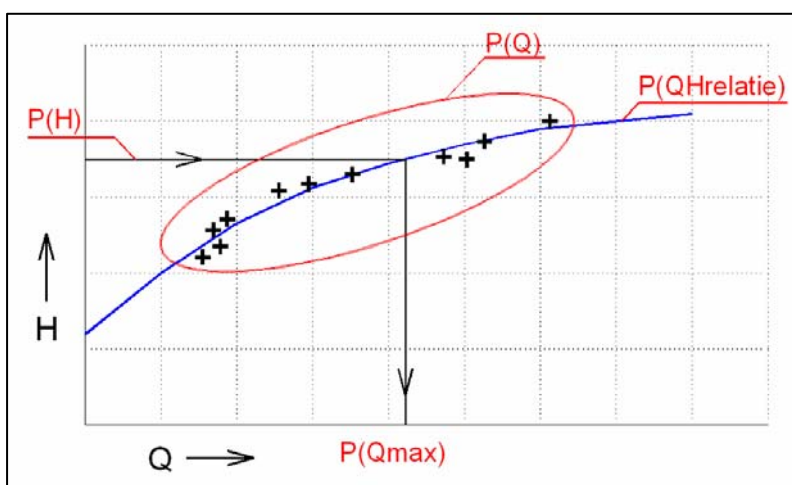
2. QH-relatie:

De beoordeling van de empirische en methodische kwaliteit van de QH-relatie is overgenomen uit hoofdstuk 3 en samengevat in Tabel 6.8.

	1911 1917	1918 1932	1933 1950	1951 1955	1956 1964	1965 1970	1971 1974	1975 1987	1988 1999	2000 2003
QH-relatie										
empirisch	1.5	1.5	2	2	2	2	1.5	1.5	1.5	4
methodisch	3	3	2.5	3	3	3	2.5	2.5	3	3

Tabel 6.8 Overzicht kwalitatieve beoordeling QH-relatie

Alvorens tot de beoordeling van de volgende processtap wordt overgegaan worden de individuele beoordelingen van de waterstandsmeting, afvoermetingen en de QH-relatie uit tabel 6.6, 6.7 en 6.8 samengevoegd tot één beoordeling (behorend bij de afgeleide afvoer Q_{max}). Het samenvoegen is verduidelijkt aan de hand van Figuur 6.6.



Figuur 6.6 Schematische weergave van de locaties van de gekwalificeerde onzekerheden

De locaties van de individuele Pedigree scores voor empirische en methodische kwaliteit van de waterstandsmeting (H), afvoermetingen (Q) en QH-relatie zijn in de Figuur weergegeven. Na het invoeren van de topwaterstand van een bepaald jaar in de QH-relatie kan de topafvoer - de Q_{max} - worden afgeleid. De Q_{max} wordt weer gebuikt in de volgende processtap voor berekening van de maatgevende afvoer. Afhankelijk van elkaar leiden de individuele parameters H, Q en de QH-relatie tot de Q_{max} .

De vierde rekenregel van de Pedigree calculator is hier van toepassing. Door uit te gaan van een gewogen gemiddelde. De parameters H, Q en de QH-relatie hebben invloed op de Q_{max} die wordt afgeleid, maar niet in dezelfde mate. Het gewicht is afhankelijk van de mate waarin de individuele parameter invloed heeft op het resultaat, de Q_{max} . Het meeste gewicht gaat zodoende naar de QH-relatie omdat de Q_{max} hiervan direct is afgeleid. De QH-relatie is gebaseerd op de afvoermetingen dus de afvoermetingen gaan qua invloed vóór de waterstandsmeting. De berekening van de empirische en methodische kwaliteit van het resultaat ($P(Q_{max})$) ziet er in formulevorm als volgt uit:

$$P(Q_{max}) = \eta_1 \cdot P(H) + \eta_2 \cdot P(Q) + \eta_3 \cdot P(QHrelatie) \quad \text{met } \eta_{1,2,3} \text{ het gewicht}$$

Het bepalen van de grootte van het gewicht is subjectief en zou eigenlijk met behulp van een Bayesiaanse analyse bepaald moeten worden. Daarmee is het ook mogelijk per periode een

individuele gewichtsberekening te maken. Voor dit onderzoek wordt deze methode niet toegepast. Er wordt gekozen voor een gewicht tussen 1 en 6. De verdeling is weergegeven in Tabel 6.9.

Parameter	Gewicht	η (%)
H	2	$\eta_1 = 18\%$
Q	3	$\eta_2 = 27\%$
QH-relatie	6	$\eta_3 = 55\%$
totaal	11	100%

Tabel 6.9 Gewichten van de parameters

Invulling van de gewichten in de formule voor $P(Q_{max})$ geeft voor de verschillende perioden het resultaat zoals gegeven in Tabel 6.10

	1911	1918	1933	1951	1956	1965	1971	1975	1988	2000
	1917	1932	1950	1955	1964	1970	1974	1987	1999	2003
Qmax										
empirisch	2.1	2.1	2.4	2.4	2.7	2.7	2.4	2.4	2.4	3.9
methodisch	2.7	2.7	2.5	2.7	3.1	3.1	2.9	3.0	3.3	3.2

Tabel 6.10 Empirische en methodische kwaliteit voor Q_{max}

De afgeleide topafvoeren (Q_{max}) van de QH-relatie dienen als invoer voor de tijdserie (zie Figuur 1.2). Bovenstaande beoordeling wordt overgenomen voor de beoordeling van de parameters in de tijdserie.

3. Tijdserie hoge Q:

Voor de analyse naar de tijdserie is gekeken naar de wijze waarop deze voor de verschillende onderzoeken is samengesteld. De beoordeling van de methodische kwaliteit is gebaseerd op doorgevoerde correcties en eventueel verlenging van de basismetreeks (de tijdserie vanaf 1911) met oudere afvoeren. De empirische kwaliteit van de tijdserie is gelijkgesteld aan de empirische kwaliteit van de Q_{max} . Alleen voor de alternatieve onderzoeken Klunhaar en Gerretsen wordt de beoordeling van de empirische kwaliteit aangevuld met een beoordeling voor de toegevoegde afvoeren van vóór 1911.

De analyse leidt uiteindelijk tot één score voor de empirische kwaliteit en één score voor de methodische kwaliteit. Dit wordt gedaan omdat in de volgende processtap 'Statistiek' de datum van de afvoeren geen rol meer speelt. Voor toepassing van de statistiek ligt het zwaartepunt op de fit van de kansverdelingsfunctie met het zwaartepunt gebaseerd op het gemiddelde en de standaarddeviatie (er worden nog meer specifieke parameters gebruikt maar de beschrijving wordt nu achterwege gelaten). De twee parameters beschrijven de gehele tijdserie. Hierdoor moet ook van de gekwalificeerde onzekerheden - die nu nog op basis van periodiek onderscheid zijn beoordeeld - één beoordeling gemaakt worden. Voor het berekenen van het gemiddelde en de standaarddeviatie worden optellingen, aftrekkingen en delingen toegepast. Om de analyse niet te complex te maken wordt de rekenregel van de Pedigree calculator toegepast die behoort bij het optellen van parameters. Voor optelling van parameters geldt regel 2 van de Pedigree calculator. De Pedigree scores per periode van de tijdserie worden daardoor gewogen gemiddeld afhankelijk van de lengte van de perioden. In Tabel 6.9 is de weging per periode gegeven.

De onderzoeken Boertien I, Boertien II, HR2001, Gerretsen en Klunhaar gebruiken allen een tijdserie die eindigt in de periode 1988-1999. Alleen voor de HR2006 is een tijdserie tot 2003 gebruikt, waardoor de beoordeling van de periode 2000-2003 is toegevoegd. Zodoende worden twee gewogen

gemiddelden uitgerekend, geldend voor de twee lengteverschillen (Tabel 6.11). Daarna worden de beoordelingen van de methodische en empirische kwaliteit van de verschillende onderzoeken aan de tijdserie toegevoegd.

	1911	1918	1933	1951	1956	1965	1971	1975	1988	2000
	1917	1932	1950	1955	1964	1970	1974	1987	1999	2003
Qmax										
empirisch	2.1	2.1	2.4	2.4	2.7	2.7	2.4	2.4	2.4	3.9
methodisch	2.7	2.7	2.5	2.7	3.1	3.1	2.9	3.0	3.3	3.2
Gewicht periode										
Tijdserie t/m 1999	8%	18%	21%	5%	10%	6%	4%	15%	14%	
Gewicht periode										
Tijdserie t/m 2003	7%	17%	20%	5%	10%	6%	4%	14%	13%	4%

Tabel 6.11 Gewichten voor de perioden in de twee tijdseries

De empirische en methodische kwaliteit voor de twee tijdseries kunnen na het vermenigvuldigen met de gewichten worden afgeleid (Tabel 6.12).

	Tijdserie t/m 1999	Tijdserie t/m 2003
empirisch	2.37	2.43
methodisch	2.86	2.87

Tabel 6.12 Gewogen gemiddelde Pedigree scores voor de tijdserie

De beoordeling van de verschillende onderzoeken uit hoofdstuk 4 kan daar nu aan worden toegevoegd. Het is een optelling van variabelen waardoor regel 2 van de Pedigree calculator wordt toegepast. De aanname hier is dat de omgang met de tijdserie door de onderzoeken even zwaar weegt als de tijdserie zelf. De correcties en verlenging hebben namelijk direct invloed op de omvang van de tijdserie. Het resultaat is in Tabel 6.13 weergegeven waarbij de gemiddelde waarde de eindscore vertegenwoordigt.

	Boertien I	Boertien II	HR 2001	HR 2006	Klunhaar	Gerretsen
Empirisch						
Tijdserie	2.37	2.37	2.37	2.43	2.19	2.19
Verlenging tijdserie					2	2
gemiddelde	2.37	2.37	2.37	2.43	2.10	2.10
Methodisch						
Tijdserie	2.86	2.86	2.86	2.87	2.86	2.86
correcties		1.5	1.5	1.5	1.5	
		1.5	2.5	2.5	1.5	
	1	2.5	3	3	2.5	
	1.5	3	2.5	2.5	3	1.5
Verlenging tijdserie					3	2
gemiddelde	1.79	2.27	2.31	2.31	2.39	2.23

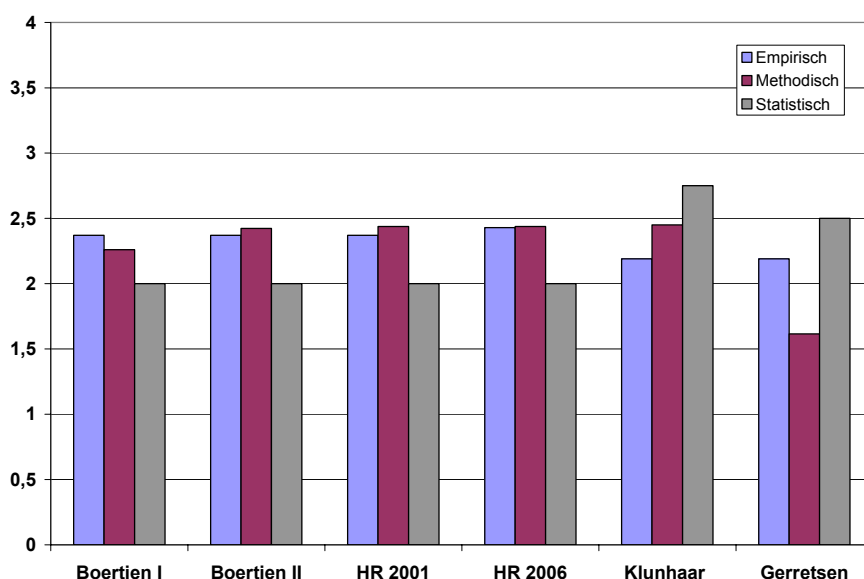
Tabel 6.13 Pedigree scores voor de tijdserie in de onderzoeken

4. Statistiek:

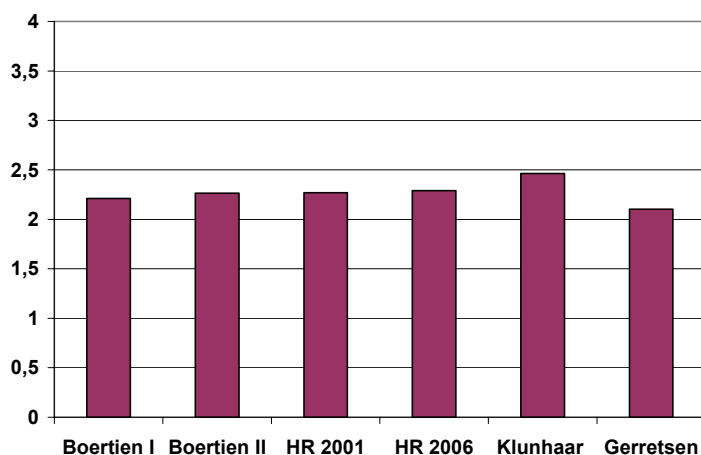
De beoordeling van de voorlaatste processtap is voor de verschillende onderzoeken in hoofdstuk 5 uitgevoerd met de eindresultaten zoals gegeven in Tabel 6.13. De empirische kwaliteit is gebaseerd op de invoerdata voor de frequentieanalyse. De invoerdata is gelijk aan de tijdserie dus wordt de empirische kwaliteitsbeoordeling overgenomen uit hoofdstuk 4. De statistische kwaliteit en de methodische kwaliteit zijn apart beoordeeld en overgenomen uit hoofdstuk 5. Hier is uitgegaan van een gemiddelde zonder weging. Uit de gevoeligheidsanalyse in hoofdstuk 5 is gebleken dat de omvang van de tijdserie veel invloed heeft op het berekeningsresultaat na de frequentieanalyse, de MA. Maar hetzelfde geldt voor de parameterschattingmethode en de wijze waarop de MA is bepaald uit de vier kansverdelingsfuncties. Allen hebben ze grote invloed op het berekeningsresultaat. Voor een exactere bepaling zou de gevoeligheidsanalyse verder gespecificeerd moeten worden. De aanname hier is om het gemiddelde van de drie parameters te nemen als uiteindelijke Pedigree score voor de methodische kwaliteit van de statistiek. De statistische kwaliteit is beoordeeld op de fit van de gebruikte verdelingsfuncties. Omdat bij de RWS onderzoeken alle verdelingsfuncties even zwaar hebben meegeteld voor de bepaling van de MA, wordt de gemiddelde beoordeling van de verdelingsfuncties gebruikt. Voor de alternatieve onderzoeken is de beoordeling gebaseerd op een enkele verdelingsfunctie die is gebruikt voor de frequentieanalyse. Dit zijn tevens de eindscores van de gepropageerde onzekerheden. In Figuur 6.7 en 6.8 zijn de scores schematisch weergegeven.

	Boertien I	Boertien II	HR 2001	HR 2006	Klunhaar	Gerretsen
Empirisch tijdserie	2.37	2.37	2.37	2.43	2.10	2.10
Methodisch Tijdserie	1.79	2.27	2.31	2.31	2.39	2.23
Parameter- schatting	3	3	3	3	2.5	1
Bepaling MA	2	2	2	2		
gemiddelde	2.26	2.42	2.44	2.44	2.45	1.62
Statistisch gemiddelde	2	2	2	2	2.75	2.5

Tabel 6.14 Overzicht voortgeplante Pedigree scores



Figuur 6.7 Pedigree scores gepropageerde onzekerheden



Figuur 6.8 Gemiddelde Pedigree scores gepropageerde onzekerheden

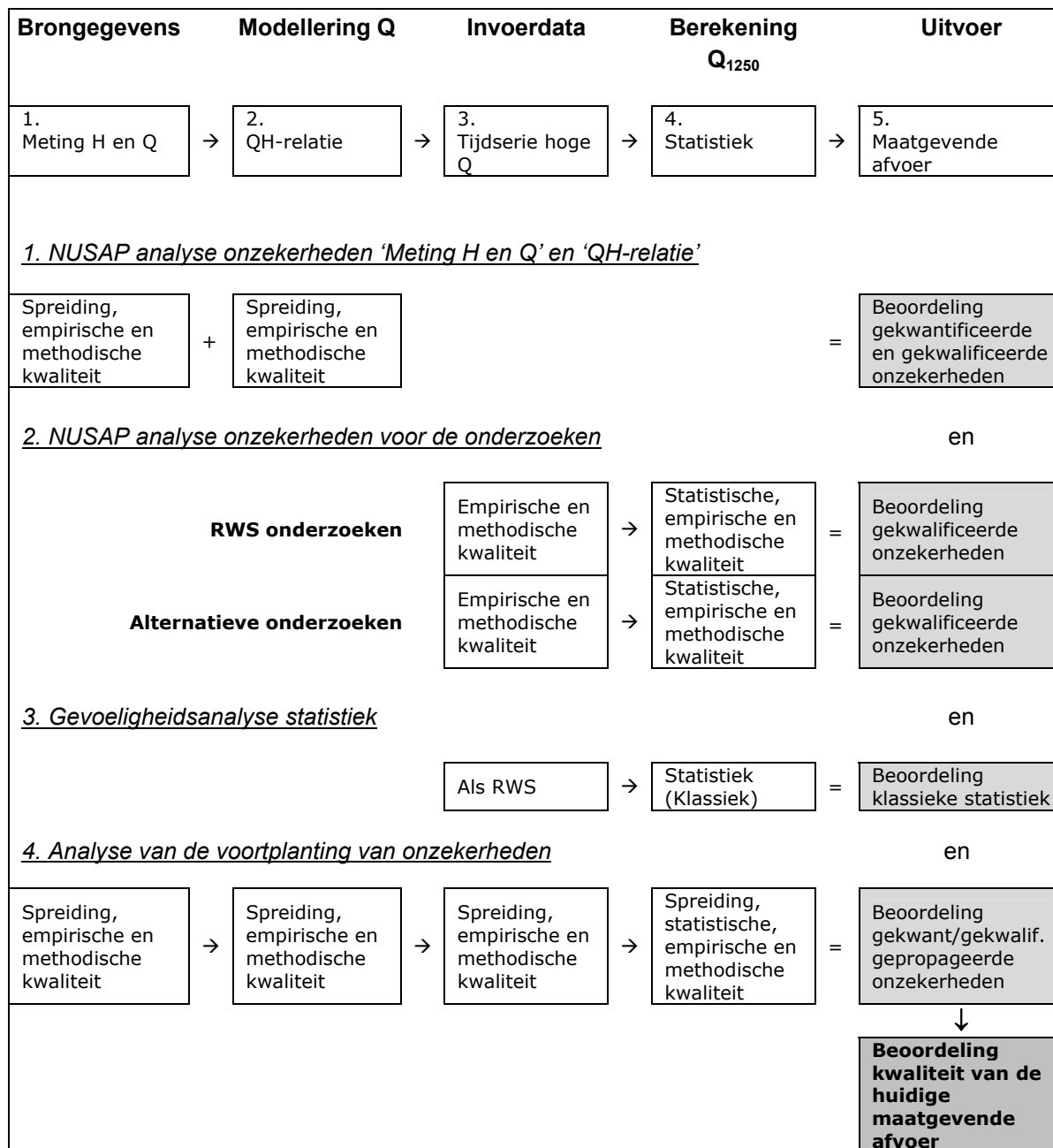
De beoordelingen van de RWS onderzoeken zijn vrijwel gelijk omdat telkens dezelfde procedure is gebruikt voor berekening van de MA. De empirische kwaliteit is in de loop van de jaren licht verbeterd vanwege verlenging van de basis-meetreeks. De methodische kwaliteit is na het Boertien I onderzoek verbeterd vanwege het uitgebreid uitgevoerde onderzoek naar het homogeniseren van de tijdserie. De toegepaste statistiek is onveranderd gebleven.

Het alternatieve onderzoek van Klunhaar heeft vanwege het gebruik van subjectieve waarnemingsgegevens (van historische topafvoeren) een wat lagere empirische kwaliteit dan de RWS onderzoeken. De Bayesiaanse statistiek verdient op de methodische kwaliteit een iets hogere score dan de klassieke statistiek volgens RWS omdat het de mogelijkheid biedt om extra historische gegevens in de vorm van subjectieve hoogwaterwaarnemingen, toe te voegen aan de frequentieanalyse. De Bayesiaanse statistiek wordt tegenwoordig steeds meer geaccepteerd als goed alternatief en kan in de toekomst de klassieke statistiek gaan overtreffen. De statistische kwaliteit scoort hoog vanwege de goede fit van de kansverdelingsfuncties en gebruikte toetsen.

Het onderzoek van Gerretsen kenmerkt zich door het gebruik van een gecombineerde verdelingsfit en met een aantal toegevoegde historische afvoeren. Ondanks de extra hoeveelheid gegevens voor de frequentieanalyse is de empirische kwaliteit lager geworden. Dat heeft twee oorzaken: vanwege de gebruikte ongecorrigeerde basis-meetreeks en het eenzijdige karakter van de toegevoegde historische afvoeren (alleen de vier meest extreme) welke zijn afgeleid van indirecte maten. De methode van de geknikte verdeling is te onbekend om de criteria van de Pedigree tabel goed te doorstaan en scoort daarom op dit aspect lager dan de overige onderzoeken. Statistisch scoort Gerretsen vrij hoog vanwege de gebruikte en bewezen toetsen voor de keuze van het beste kansverdelingstype.

6.2 Analyse resultaten en beoordeling

Voor de eindbeoordeling van de maatgevende afvoer worden de resultaten van de voorgaande analyses naast elkaar gelegd. Het overzicht van de analyses is weergegeven in Tabel 6.1.



Tabel 6.15 Overzicht van het onderzoek naar de kwaliteit van de maatgevende afvoer

Van de vier analyses volgt eerst een korte samenvatting met daarin de belangrijkste conclusies.

1. NUSAP analyse onzekerheden 'Meting H en Q' en 'QH-relatie'

De gegevens die aan de berekening van de maatgevende afvoer ten grondslag liggen zijn met betrekking tot de onzekerheden zeer verschillend van aard. De oudste afvoeren uit de 'stokdrijverperiode' krijgen een aanzienlijk lagere beoordeling dan de periode erna op zowel kwantitatieve als kwalitatieve aspecten. De spreiding door de onzekerheid in de meting en de additionele periode-onzekerheid liggen op respectievelijk 10% en 13%. Na 1950 zijn de spreidingen afgenomen tot 5% en 2%.

De kwalitatieve beoordeling geeft een vergelijkbaar resultaat. Voor de empirische en methodische kwaliteit ligt de score van de periode op 2,5 (gemodelleerde gegevens, indirecte maten, klein aantal directe metingen) en 2 (aanvaardbare methode, maar beperkte consensus op betrouwbaarheid). Voor de goede orde, de score ligt in de range van 0 tot 4 in overeenstemming met de laagste en hoogste kwalitatieve beoordeling. De periode daarna is de kwaliteit aanmerkelijk verbeterd met waarden van 3,5 (gecontroleerde experimenten, gemiddeld aantal directe metingen) en 3 (betrouwbare methode, die bekend is binnen het discipline). Vanaf 2000 heeft de digitale apparatuur het meten vergemakkelijkt en is de meetdichtheid nog verder toegenomen.

De meting kan dan wel van goede kwaliteit zijn, voor de beoordeling van de QH-relatie is de hoeveelheid verrichte metingen tijdens een hoogwater minstens zo belangrijk. Juist hieraan ontbrak het voor de meeste QH-relaties. Althans van de *beschikbaar gekomen* QH-relaties want het grootste aantal originele QH-relaties mét meetpunten blijkt niet meer gearchiveerd bij Rijkswaterstaat. Omdat er voor de gehele periode behalve na 2000 bijna geen meetdata beschikbaar is gekomen, ligt de empirische kwaliteit op een score van 2 (gemodelleerde gegevens, indirecte maten, handboek schattingen). De methodische kwaliteit voor het construeren van de QH-relatie heeft gemiddeld een score van 3 (betrouwbare methode, die bekend is binnen het discipline).

2. NUSAP analyse onzekerheden voor de onderzoeken

In Tabel 6.16 zijn de maatgevende afvoeren (MA) van de onderzoeken samengevat om een overzicht te geven van de verschillen die zijn ontstaan door de afwijkende berekeningsmethoden van de geëvalueerde onderzoeken. Bij de RWS onderzoeken is goed te zien dat de langer wordende tijdserie (vijfjaarlijkse herberekening) voor een verhoging van de MA zorgt. De diverse jaarmaxima > 2.000 m³/s in de jaren '90 en na 2000 zijn daarvan de oorzaak.

De correcties op de tijdserie van hoge afvoeren hebben een NUSAP score van ruim 2 (aanvaardbare methode, maar beperkte consensus op betrouwbaarheid). Het achteraf wijzigen van afvoerhoogtes mist enige verifieerbaarheid waardoor de scores niet bijzonder hoog zijn. De empirische kwaliteit is niet hoog omdat de afvoeren gemodelleerd zijn. De gemiddelde score is 2 (gemodelleerde gegevens, indirecte maten, handboek schattingen). Hetzelfde geldt voor de alternatieve onderzoeken, behalve dat daarvoor een extra beoordeling voor de toegevoegde historische afvoeren is gemaakt. De kwaliteit hiervan ligt nog wat lager dan de basismetreeks. Daardoor hebben de alternatieve onderzoeken een lagere gemiddelde score voor de tijdserie.

De toegepaste statistiek van de RWS onderzoeken scoort lager dan de alternatieve onderzoeken. Het ontbreekt bij de RWS onderzoeken vooral aan statistische toetsen om de optimale kansverdeling te kiezen. Beide alternatieve onderzoeken hebben van dergelijke toetsen gebruik gemaakt en komen zo tot één (zij het aangepaste) verdeling voor de frequentieanalyse. Het resultaat van het onderzoek van Klunhaar laat zich het beste vergelijken met het Boertien II onderzoek omdat dezelfde basismetreeks is gebruikt. De alternatieve statistiek (Bayesiaans model I) zorgt voor een duidelijk hogere MA. Wanneer historische afvoeren van vóór 1911 worden toegevoegd (model II) dan zakt de MA weer maar blijft nog altijd hoger dan de MA van het Boertien II onderzoek. Het onderzoek van Gerretsen

heeft een basismetreeks die vergelijkbaar is met de HR 2001, zij het met minder doorgevoerde correcties. De toevoeging van enkele historische afvoeren en een alternatieve omgang met de statistiek (geknikte verdeling) leidt weer tot een veel lagere MA dan berekend volgens de HR 2001 (zie Tabel 6.16).

Het toevoegen van oudere afvoeren heeft voor- en nadelen. Enerzijds is verlenging van de tijdserie gewenst om de statistische kwaliteit te verhogen (want dicht bij de herhalingstijd van 1250 jaar). Anderzijds is de kwaliteit van historische waarnemingen niet erg overtuigend. Het onderzoek van Klunhaar heeft vooral voor de statistische kwaliteit een aanmerkelijk hogere score gekregen dan de RWS onderzoeken omdat de Bayesiaanse statistiek meer gegevens 'toelaat' voor de frequentieanalyse. Het onderzoek van Gerretsen heeft bij de statistische en methodische kwaliteit punten laten liggen omdat de geschiktheid van een geknikte verdeling niet voldoende bewezen is.

3. Gevoeligheidsanalyse statistiek

De uitkomsten van de gevoeligheidsanalyse tonen eveneens aan dat de MLE parameterschattingmethode voor de klassieke van de RWS onderzoeken niet zonder meer de beste is. Een andere omgang met parameterschatting geeft voor de interpretatie van de resultaten meer bevredigende resultaten. Figuur 5.12 laat zien dat met MOM parameterschatting drie verdelingsfuncties bijna dezelfde resultaten geven. Met de MLE methode worden twee hoge en twee lage schattingen verkregen. Dat bemoeilijkt de keuze voor een voorkeursverdeling zodanig dat voor de RWS onderzoeken alle vier de verdelingen eenzelfde gewicht hebben gekregen bij het middelen van de resultaten. Het verkorten van de tijdserie door weglating van de oudste afvoeren maakt de kansverdelingsfuncties gevoeliger voor nieuwe afvoeren. De huidige meetreeks wordt met elke nieuwe vaststelling langer wat uiteraard beter is voor de empirische kwaliteit. Een nieuwe vijfjaarlijkse bijstelling leidt op den duur nauwelijks tot grote wijzigingen van de maatgevende afvoer. Dat geeft voor de toekomst meer zekerheid voor de waterbeheerders. Verkorting van de tijdserie leidt tot een nog hogere maatgevende afvoer omdat dat er een trend van hogere afvoeren waarneembaar is (Tabel 4.5 en Figuur 5.10).

4. Analyse van de voortplanting van onzekerheden

De doorwerking van de gekwantificeerde onzekerheden leidt volgens de analyse in paragraaf 6.1.1 tot een onzekerheid in de maatgevende afvoer van maar liefst 26%. De maatgevende afvoer heeft de herberekende afvoeren van 3.421 m³/s en 4.448 m³/s als onzekerheidsband om de huidige MA van 4.000 m³/s. De twee herberekende afvoeren vallen nog wel binnen het betrouwbaarheidsinterval van de HR2006 (3.250 – 4.705 m³/s). Voor de HR2006 is de statistische onzekerheid te berekenen door de grootte van het betrouwbaarheidsinterval te delen door de maatgevende afvoer maal 100%, en komt daarmee uit op 36% (Tabel 6.14).

Worden de betrouwbaarheidsintervallen van de twee alternatieve maatgevende afvoeren toegevoegd dan neemt de onzekerheid verder toe. De uitersten van de 95% betrouwbaarheidsintervallen zijn 2.878 m³/s en 5.025 m³/s (zie Tabel 6.4). De totale onzekerheid rond de huidige maatgevende afvoer op basis van de voortgeplante onzekerheden en de statistische onzekerheid is daardoor 54%.

De voortplanting van de gekwalificeerde onzekerheden is voor zowel de RWS onderzoeken als de alternatieve onderzoeken bepaald. Uiteindelijk heeft het onderzoek van Klunhaar de hoogste score, maar steekt er niet met kop en schouders bovenuit. Alle onderzoeken zitten rond een gemiddelde score van 2 (Figuur 6.8). Méér onderscheid tussen de RWS onderzoeken en de alternatieve onderzoeken is er tussen de individuele beoordelingen van de kwaliteitsaspecten (Figuur 6.7). De methodische kwaliteit van het alternatieve onderzoek van Klunhaar verschilt weinig met de RWS onderzoeken. Uit de beoordeling van de statistische kwaliteit blijkt duidelijk dat de Bayesiaanse statistiek beter scoort dan de klassieke statistiek. De volgens Gerretsen heeft voor toepassing van de

geknikte verdeling bewezen hulptests gebruikt in scoort daarom statistisch redelijk maar de methode is te onbekend waardoor op dat aspect een lage Pedigree score wordt gegeven. Welk kwaliteitsaspect het meeste gewicht verdient is van verschillende factoren afhankelijk. Vast staat dat de methodische en empirische kwaliteit door het gehele proces een rol hebben gespeeld. De statistische kwaliteit is alleen voor de laatste processtap beoordeeld en de empirische kwaliteit is vooral afhankelijk van de eerste twee processtappen. De empirische kwaliteit is bijna niet te verbeteren want de gegevens zijn niet reproduceerbaar en de statistische kwaliteit zegt alleen iets over de verdelingsfit. De methodische kwaliteitsbeoordeling zou om deze redenen een zwaarder gewicht kunnen krijgen. Anderzijds is de Pedigree score voor de methodische kwaliteit door het proces heen steeds minder gevoelig geworden voor nieuwe toegevoegde Pedigree scores (want uitmiddeling). Het is dus zinvol om de individuele beoordelingen van de processtap in overweging te nemen tijdens de eindbeoordeling. Wordt echter verlangd om de 'beste' methode (van de geëvalueerde onderzoeken) aan te wijzen dan verdient het criterium methodische kwaliteit de voorkeur maar dat is subjectief. Op basis van de methodische kwaliteit gaat de voorkeur naar de methode Klunhaar. Het verschil met de RWS onderzoeken is echter minimaal. Het onderzoeksresultaat van Klunhaar laat zich niet goed vergelijken met de huidige maatgevende afvoer volgens de HR2006 omdat de basismetreeks is overgenomen uit het Boertien II onderzoek. De MA volgens Kunhaar is $4.022 \text{ m}^3/\text{s}$, die van het Boertien II onderzoek $3.800 \text{ m}^3/\text{s}$. Was de huidige basismetreeks van de HR2006 gebruikt dan zou de MA – naar schatting – rond de $4.200 \text{ m}^3/\text{s}$ liggen.

Rijkswaterstaat Onderzoeken	Herhalingstijd (jaar)	Maatgevende afvoer (m ³ /s)	95% interval*		% spreiding
Commissie Boertien I (1993)	1250	3650	3035	4290	34
Commissie Boertien II (1994)	250 1250	3280 3800	2750 3090	3820 4540	33 38
Hydraulische Randvoorwaarden (2001)	250 1250	3280 3800	2765 3110	3810 4535	32 38
Hydraulische Randvoorwaarden (2006)	250 1250	3410 4000	2885 3250	3950 4705	31 36
Alternatieve onderzoeken					
	Klass. 250 1250	3297 3879	niet berekend		
Klunhaar (2003)	Bay.1 250 1250	3379 4132	3054	5256**	53
	Bay.2 250 1250	3329 4022	3107	4907**	45
Gerretsen (2001)	250 1250	2950 3340	2800 3120	3150 3550	12 13

Tabel 6.16 Overzicht berekende maatgevende afvoeren van de geëvalueerde onderzoeken

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1993), Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1994), Rijkswaterstaat (2001a), Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (2004), Klunhaar (2003), Gerretsen (2001).

*) De betrouwbaarheidsintervallen van de onderzoeken Boertien I, Boertien II, HR2001 en HR2006 zijn overgenomen uit de frequentieplots afgebeeld in de rapporten.

***) credible interval behorende bij de a posteriori verdeling

Beoordeling maatgevende afvoer

Op basis van het voorgaande kan het volgende worden geconcludeerd: Uit de analyse van de gepropageerde onzekerheden is gebleken dat de gekwantificeerde onzekerheid van de maatgevende afvoer maximaal 26% is. De statistische onzekerheid verhoogt deze tot 54%.

De gekwalificeerde onzekerheid omvat de beoordelingen op de empirische, methodische en statistische kwaliteit. Voor de eerste twee is een gecombineerde Pedigree omschrijving gegeven. Het onderstreepte gedeelte is daarbij het meest van toepassing.

Empirische kwaliteit (2,4): gemodelleerde gegevens, indirecte maten, handboek schattingen, Historische/veldgegevens, (on)gecontroleerde experimenten, klein aantal directe metingen.

Methodische kwaliteit (2,4): aanvaardbare methode, maar beperkte consensus op betrouwbaarheid, betrouwbare methode, die bekend is binnen het discipline.

Statistische kwaliteit (2): hulptests niet beduidend gepasseerd, model geen duidelijke betrekking op gegevens, of model gekozen op basis van gelijkaardige gegevens.

De analyse naar de kwaliteit van de maatgevende afvoer heeft tot de conclusie geleid dat de huidige methodiek zoals in Rijkswaterstaat onderzoeken is toegepast niet per definitie de beste is. Wordt uitgegaan van een gelijkwaardige zekerheid van alle onderzoeken dan bestaan er meerdere aanvaardbare schattingen voor de maatgevende afvoer, variërend van 3.340 m³/s tot 4.480 m³/s. De huidige maatgevende afvoer van RWS zit daar tussenin met 4.000 m³/s.

6.3 Perspectieven om de kwaliteit te verhogen

Om de kwaliteit van de huidige maatgevende afvoer te verhogen kunnen de gekwantificeerde en/of gekwalificeerde onzekerheden verkleind worden. De voortgeplante gekwantificeerde onzekerheid is het meest eenvoudig te verlagen door de oudste afvoeren van de tijdserie niet te gebruiken. Deze zijn verantwoordelijk voor het grootste gedeelte van de spreiding. De spreiding van deze data is inherent en kan niet verlaagd worden. De stokdrijvermetingen en de oudste QH-relaties hebben nu eenmaal een lagere nauwkeurigheid dan de meer recente afvoerbepaling. Een herberekening is niet uit voeren omdat er te weinig over de vroegere situatie bekend is.

Om de huidige spreiding van 26% te verlagen kunnen alle afvoeren van vóór 1955 uit de analyse weggelaten worden. Dit heeft echter gevolgen voor de onzekerheidsbeoordeling. De kwantificeerbare onzekerheid neemt toe vanwege een toename van de statistische onzekerheid, veroorzaakt door de lagere datadichtheid voor het fitten van de kansverdelingsfuncties. Dit uit zich in een breder 95% betrouwbaarheidsinterval. De kwaliteits'winst' door het weglaten van de meest onzekere parameters wordt dus vereffend door een toename van de statistische onzekerheid. Uit de gevoeligheidsanalyse in hoofdstuk 5 is eveneens gebleken dat het verkorten van de tijdserie met 30 of 60 jaar leidt tot een duidelijke verbreding van het betrouwbaarheidsinterval. Een bijkomend nadeel is dat de gevoeligheid van de kansverdelingsfuncties verder toeneemt waardoor de vijfjaarlijkse vaststelling van de maatgevende afvoer sterk kan fluctueren. Dat geeft weer conflicten met het 'gewenste' lange termijn plannen in het waterbeheer. De Pedigree score voor de empirische kwaliteit neemt vanzelfsprekend gelijktijdig af met het verminderen van de data.

De berekende spreiding is een indicatie van de maximaal mogelijke onzekerheid omdat uitgegaan is van onzekerheden zonder rekening te houden met toevalligheden. Het zou kunnen zijn dat de onzekerheden (fouten) in de metingen niet consequent maar toevallig zijn, en in de bepaling van de QH-relatie worden uitgemiddeld. Dat geldt weer alleen voor de curve met een 'mooie' fit die gelijkmatig door de meetpunten loopt. Een goed voorbeeld hiervan is gegeven in Figuur 2.19 op pagina 34. Met een grotere dichtheid aan meetgegevens is het mogelijk om de uitmiddeling door de QH-relatie in te schatten. Op basis van de QH-relatie met meetpunten in Figuur 2.19 is af leiden dat de QH-relatie de onzekerheid van de meetpunten weet uit te middelen. Een dergelijke meetdichtheid komt, dankzij de ADM pas sinds 2000 voor. Het kwantificeren van de toevalligheid kan vervolgens met een Monte Carlo analyse. Voor de oudste QH-relaties waarvan nauwelijks meetgegevens bekend zijn, is een dergelijke analyse vrijwel niet uit te voeren.

De empirische kwaliteit is afhankelijk van de kwaliteit én de kwantiteit van de data die wordt gebruikt. Data die is gemeten in het verleden kan niet opnieuw worden gemeten dus is de empirische kwaliteit niet te verbeteren. De methodische kwaliteit is wel te verhogen. De lage score van de methodische kwaliteit is voornamelijk te wijten aan het gebrek aan bewijskracht achter de keuze voor een bepaalde methode. Dit geldt voor het meten, de constructie van de QH-relatie, maar vooral de statistiek. Voor toepassing van de statistiek zijn veel aannames gedaan zonder een afweging te maken met alternatieve methoden. Als de keuze voor de methodiek niet goed is onderbouwd dan is de Pedigree score laag. De methode die wel redelijk tot goed scoort is het corrigeren ten behoeve van het

homogeniseren van de afvoeren in de tijdserie. Voor construeren van de tijdserie is in de RWS onderzoeken veel aandacht besteed aan het homogeniseren van de afvoeren. Daarvoor zijn modellen gebruikt die zijn getoetst aan een gevoeligheidsanalyse en kalibratie naar een bekende fysische situatie.

De frequentieanalyse voegt een groot percentage van de kwantitatieve onzekerheid toe aan de maatgevende afvoer. De betrouwbaarheidsintervallen geven hiervan een weerspiegeling. Een oplossing om de kwantitatieve onzekerheid van de frequentieanalyse te verkleinen is eigenlijk al beschreven in de HR2001. In de HR2001 is de Rayleigh verdeling betrokken in een alternatieve frequentieanalyse. Ondanks dat deze verdeling bijdroeg aan een aanzienlijk smaller betrouwbaarheidsinterval, is deze niet gebruikt bij de uiteindelijke bepaling van de maatgevende afvoer. De 95% betrouwbaarheidsintervallen van de maatgevende afvoer met en zonder Rayleigh verdeling waren respectievelijk: 3.170 – 4.227 m³/s en 3.110 – 4.535 m³/s. De bandbreedtes uitgedrukt in percentages zijn achtereenvolgens 29% en 37%. Een duidelijk verschil. De aanbeveling luidt om de Rayleigh verdeling te betrekken in de frequentieanalyse.

Een manier om de kwalitatieve onzekerheid van de statistiek te verlagen is het uitvoeren van een controle op de frequentieanalyse door het toevoegen van een model waarin een toekomstig scenario is verwerkt (aangezien de maatgevende afvoer gebruikt wordt als een veiligheidsnorm om rekening te houden met toekomstige scenario's). Een toets met een hydrodynamisch model dat is gekoppeld aan een neerslaggenerator kan hiervoor uitkomst bieden. Volgens een studie (Aalders *et al.* 2004) is met een dergelijk model een simulatie voor 3.000 jaar te geven van de neerslag en de bijbehorende afvoer. Een dergelijke controle kan de methodische kwaliteit van de maatgevende afvoer verder verhogen, afhankelijk van de gekwantificeerde en gekwalificeerde onzekerheden van de neerslaggenerator die verdisconteerd moeten worden.

De meeste perspectieven om de kwaliteit van de maatgevende afvoer te verhogen liggen dus in de twee laatste stappen, de frequentieanalyse en bepaling van de maatgevende afvoer.

6.4 Methodische reflectie

Voor het beoordelen van de kwaliteit van de maatgevende afvoer heeft de NUSAP methode als raamwerk gediend om de verschillende soorten onzekerheden te onderscheiden en te beoordelen. Voor de beschouwing van deze methode wordt ingegaan op de elementen van NUSAP en hoe deze zijn toegepast.

Het belangrijkste onderscheid wordt gemaakt tussen de kwantificeerbare en kwalificeerbare onzekerheden. Dit onderscheid is relatief eenvoudig te maken aangezien het kwantitatieve aspect zich beperkt tot bestudering van de gemeten waarden terwijl de kwalitatieve onzekerheden berusten op een onderbouwd oordeel. De eerste drie elementen (N, U en S) hebben betrekking op de kwantificeerbare onzekerheden. De 'N' staat voor Numeral. Het accent ligt daarbij op het individuele getal in relatie met de overige data. Daarmee wordt beoogd die data te gebruiken met proportionele verhoudingen. Bijvoorbeeld in het geval van de afvoeren in de tijdserie. Daarbij heeft de waarde 0,01 m³/s een verwaarloosbare betekenis. Vanwege deze aanname wordt de gewenste nauwkeurigheid van de data al enigszins vastgelegd. De 'U' staat voor Unit wat duidt op de eenheid en een eventuele additionele eenheid. In het onderzoek is de belangrijkste eenheid m³/s, maar de additionele eenheid 'de datum' heeft eveneens een belangrijke rol gespeeld voor de analyseopzet (periodiek onderscheid). De nadruk van de kwantificeerbare onzekerheid ligt op het bepalen van de spreiding (S).

Voor het bepalen van de spreiding geeft NUSAP geen richtlijnen, dit behoort tot het klassieke domein van de statistiek. In de meeste gevallen gaat om het aflezen van variaties in de data. Het wordt complexer als met de voortplanting van de spreiding rekening moet worden gehouden. In Van der Sluijs (2005b) wordt de NUSAP methode belicht en toegepast. Daarin is de Monte Carlo analyse gebruikt voor de berekening van de voortgeplante gekwantificeerde onzekerheden. In het berekeningsproces van de maatgevende afvoer zit echter een fysisch model (QH-relatie) dat grafisch is afgeleid. Daar is het bepalen van de voortplanting van onzekerheden niet meer zuiver rekenkundig en is een interpretatie nodig om dit proces een rekenkundige invulling te geven. Dat is uiteindelijk gebeurd door het verschil in uitkomsten van de alternatieve grafisch bepaalde QH-relaties (zie Figuur 6.3 en 6.4) aan te nemen als de voortgeplante gekwantificeerde onzekerheid. In dit onderzoek is voor het bepalen van de voortgeplante onzekerheden eveneens gekozen voor een grafische oplossing. Hiervoor bood de NUSAP methode uiteraard geen richtlijnen.

De kwalitatieve beoordeling (A) gaat vooraf aan het gebruik van de Pedigree tabel (P). In Van der Sluijs *et al.* (2005b), Costanza *et al.* (1992) en Ellis *et al.* (2000) wordt de beoordeling niet in detail toegelicht en is alleen het resultaat (P) gegeven. Er wordt in de artikelen op gewezen de beoordeling met hulp van meerdere experts uit verschillende disciplines uit voeren. Voor dit onderzoek is met een aantal experts in het waterbeheer gesproken over het voorkomen van onzekerheden in de processtappen van de maatgevende afvoer, maar niet over het beoordelen ervan volgens NUSAP. De onzekerheidsbeoordeling heeft daardoor een wat eenzijdig karakter gekregen. Voornamelijk de beoordeling van de methodische kwaliteit die gebaseerd is op de betrouwbaarheid / aanvaardbaarheid van een methode 'vraagt' om een subjectieve insteek. Dit geldt voor alle deelprocessen in de berekening van de maatgevende afvoer. De statistische en empirische kwaliteit zijn objectiever te beoordelen omdat de Pedigree criteria met omschrijvingen als: wel of geen gebruikte toetsen, of wel of geen directe metingen concreter omschreven zijn. Hierdoor is de behoefte aan meerdere experts lager dan bij de methodische kwaliteit.

De Pedigree tabel geeft aan op welke aspecten de beoordeling moet worden uitgevoerd. Er zijn in de tabel verschillende omschrijvingen gegeven voor empirische, methodische en statistische kwaliteit met bijbehorende scores voor de waardering. De uitkomstenruimte waar de beoordeling naartoe leidt, is daarmee al gegeven. De subjectiviteit van deze tabel is dus 'ingebakken' en vermindert de subjectiviteit van alleen het toekennen van een score. Een voorbeeld van deze ingebakken subjectiviteit is de omschrijving van de methodische kwaliteit bij score 1: "Niet bewezen methode, twijfelachtige betrouwbaarheid". Een niet bewezen methode scoort even laag als een methode met twijfelachtige betrouwbaarheid. Het is niet bekend of de niet bewezen methode een twijfelachtige betrouwbaarheid heeft. Waarschijnlijk heeft die onwetendheid de makers van de Pedigree tabel doen besluiten er een lage score voor te geven. De *discussie* over de beoordeling van de methodische kwaliteit ligt buiten het kader van de Pedigree tabel en gaat weer terug naar de kwalitatieve beoordeling (A). Vanwege de uitkomstenruimte waar de beoordeling naartoe leidt blijft de analyse overzichtelijk, en is het resultaat reproduceerbaar. Ook de diepgang van de analyse blijft op een consequent en aanvaardbaar niveau. De Pedigree tabel is voor het gehele berekeningsproces goed bruikbaar geweest wat mogelijk maakt dat een uitgebreide beoordeling van de kwaliteit op basis van verschillende soorten onzekerheidsbronnen is uit te voeren. Het grootste voordeel van de NUSAP methode is de mogelijkheid om de output - een score - eenvoudig te vergelijken.

Voor de voortplanting van de gekwalificeerde onzekerheden zijn rekenregels toe te passen over wanneer en hoe de Pedigree scores moeten worden doorgerekend. De Pedigree calculator (Ellis *et al.* 2000) geeft regels voor het bepalen van de voortplanting van de Pedigree scores. Het gebruik van de Pedigree calculator is niet probleemloos verlopen. De rekenregels in de Pedigree calculator zijn toegespitst op het rekenen met individuele parameters waarvan een Pedigree score bepaald is met dezelfde eenheden en een spreiding. De Pedigree scores in dit onderzoek zijn gebaseerd op gegroepeerde indirect afhankelijke parameters die zich in een proces bevinden. In de geanalyseerde cases van Van der Sluijs *et al.* (2005b), Costanza *et al.* (1992) en Ellis *et al.* (2000) zijn alle parameters in één model aanwezig. Ter voorbeeld: In Van der Sluijs *et al.* (2005b) is het aandeel gevaarlijke stoffen (VOC's) voorkomend in de Nederlandse verfindustrie gekwantificeerd. De kwaliteit waarop het aandeel VOC van de verschillende industrieën is gekwantificeerd, is beoordeeld met de Pedigree tabel. Vervolgens is de Pedigree calculator gebruikt om tot één Pedigree score te komen voor de kwaliteitsaspecten. Bij de bepaling van de MA daarentegen, planten de parameters zich door een proces voort en daarmee ook de Pedigree scores. De voortplanting is dus al inherent aan het proces. De Pedigree calculator had daarom meer een controlefunctie. In Van der Sluijs *et al.* (2005b) is de Pedigree calculator gebruikt om een voortplanting in gang te zetten zodat de losse en simultaan aanwezige Pedigree beoordelingen samenkomen tot één beoordeling. De toepassing van de Pedigree calculator op het proces van de MA gaf moeilijkheden daar waar de rekenregels van de calculator in conflict waren met de 'aanwezige' processtappen. Bij de voortplanting tussen de processtappen zijn de rekenregels toegepast wanneer de parametervortplanting beschreven kon worden als een optelling, vermenigvuldiging of deling. Waar de parametervortplanting alleen als afhankelijk omschreven kon worden (zoals de afleiding van de Q_{max} uit de QH-realtie) is de rekenregel behorende bij optelling toegepast, ofwel het gewogen gemiddelde. Voor de weging is nagegaan wat de sterkte van een parameter is ten opzichte van een andere parameter in het proces.

De relatie tussen alle parameters is vanwege de serie modellen in het berekeningsproces van de maatgevende afvoer moeilijk vast te stellen. Dit wordt veroorzaakt door de subjectieve afhankelijkheid van de QH-relaties, homogenisaties van de tijdserie en de keuze van het type kansverdeling. Door de aanwezige subjectiviteit bij de bepaling van de parameters is het lastig om het gewicht van een bepaalde parameter te bepalen. Subjectiviteit kan gemodelleerd worden met behulp van Bayesiaanse statistiek, maar is voor de QH-relatie praktisch onuitvoerbaar vanwege het grafische element. De methode voor het bepalen van de bijdrage van parameters beperkt zich in dit onderzoek tot een

inschatting van de invloed die een parameter heeft op een andere parameter. De manier van afleiden van de QH-relatie vormt de grootste belemmering voor het bepalen van de voortplanting van onzekerheden en dus ook voor het wegen van de parameters. De QH-relatie bemoeilijkt de analyse omdat er geen consequent veranderend resultaat (gewijzigde vorm) optreedt bij een veranderende parameter (nieuwe meting) en wel door het volgende: Het gewicht van de parameter 'gemeten Q' wordt door de ingenieur bepaald op het moment dat deze een nieuwe curve intekent nadat meetresultaten beschikbaar zijn gekomen. Het gewicht van de parameter 'gemeten Q' hangt onder andere af van het aantal Q's, de spreiding en de kennis over het fysische systeem. Het gewicht is daardoor aan een grote mate van subjectiviteit onderhevig. Dit is geen beperking van NUSAP, het is een beperking door het berekeningsproces van de maatgevende afvoer. Als de QH-relatie met software gemodelleerd zou zijn, waarin de curve zich automatisch aanpast na het invoeren van nieuwe afvoermetingen (bijvoorbeeld met behulp van een regressieberekening), dan wordt het een ander verhaal. Dan is het wel degelijk mogelijk om objectief het gewicht van de parameter te bepalen.

Ondanks de moeilijkheden bij het bepalen van de voortgeplante onzekerheden is de NUSAP methode een prima uitgangspunt voor de onzekerheidsanalyse. De beschouwing van de combinatie kwantitatieve en kwalitatieve aspecten van onzekerheden in gegevens en parameters is nuttig voor het prioriteren van onzekerheidsreductie en kwaliteitsverbetering (van der Sluijs *et al.* 2005b). Costanza *et al.* (1992) omschreef de methode als volgt: *"The key distinction between NUSAP and other notational systems is its incorporation of more of the components of uncertainty, in particular the assessment of the grade of the estimate. It is not intended as a final and complete system for this purpose, but as a starting point in the evolution of our management of uncertainties in data quality to compliment our management of other forms of uncertainty."*

Literatuur

- Aalders, P., Warmerdam, P.M.M., Torfs, P.J.J.F. (2004). *Rainfall Generator for the Meuse Basin*. Universiteit Wageningen
- Arnold, E. (2004). *Effectiviteit van een regelaar op de splitsingspunten van de Rijn*. Technische Universiteit Delft.
- Barneveld, H.J. (2004). *Qh-relaties Maas*. Rijkswaterstaat Directie Limburg, Maastricht.
- Berger, H.E.J. (1992). *Flow forecasting for the river Meuse*. Technische Universiteit Delft.
- Boiten, W. (1986). *Hydrometry*. Universiteit Wageningen.
- Booij, M., Xu, Y. (2006). *Propagation of Discharge Uncertainty in A Flood Damage Model for the Meuse River*. Universiteit Twente, Enschede.
- Costanza, R., S.O. Funtowicz, and J.R. Ravetz. (1992) *Assessing and communicating data quality in policy-relevant research*. Environmental Management 16:121-131.
- Ellis, E.C., R.G. Li, L.Z. Yang, en X. Cheng. (2000a). *Pedigree Matrix for Observational Uncertainty Analysis*. www.nusap.net.
- Ellis, E.C., R.G. Li, L.Z. Yang, en X. Cheng. (2000b) *Long-term change in village-scale ecosystems in China using landscape and statistical methods*. Ecological Applications 10: 1057-1073.
- Gerretsen, J.H. (2001). *Herhalingstijden van hoogwatergolven te Borgharen*. Universiteit Twente, Enschede.
- Hoekstra, A.Y. (2005). *Dealing with uncertainties and risk*. Universiteit Twente, Enschede.
- Jansen, P. Ph. (1994). *Principles of river engineering: The non-tidal alluvial river*. Delftse Uitgevers Maatschappij BV, Delft
- Klunhaar B. (2003). *The value of knowing how little you know*. Universiteit Twente, Enschede.
- Leeuwen, J. van. (1981). *Overzicht afvoerbepaling te Borgharen c.q. Maastricht (1851-1980)*. Rijkswaterstaat Directie Limburg, Maastricht.
- Luginbuhl, R. (2004). *Klassiek of Bayes?* Aenorm 2004, vol. 44, pag. 39-43.
- Maghrebi, M.F. (2006). *Application of the single point measurement in discharge estimation*. Advances in Water Resources 2006, vol. 29, no. 10, pag. 1504-1514.
- Maidment, D.R. (1993). *Handbook of Hydrology*. Universiteit Twente, Enschede.
- Milieu- en Natuurplanbureau – RIVM (2004). *Risico's in bedijkte termen*. RIVM, Bilthoven
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1993). *Toetsing uitgangspunten rivierdijkversterkingen. Aanvullend rapport 1: Maatgevende afvoer Maas*. Waterloopkundig Laboratorium, Delft.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1994). *Onderzoek Watersnood Maas. Deelrapport 4: Hydrologische aspecten*. Waterloopkundig Laboratorium, Delft.

- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2006). *Controle Maas 2015, Controle, analyse en een herberekening van de afvoerstatistiek 2015 voor de Maas*. RICG (Rivers and Inland Waterways Consultancy Group).
- Nikolaev, B.M., Troitskii, V.P. (1989). *Calculation of the longitudinal flow velocity field in the cross section of cylindrical channels*. Power Technology and Engineering. Volume 23, Number 7 / July, 1989.
- Oreskes, N., Frechette, K.S., Belitz, K. (1994). *Verification, validation and confirmation of numerical models in the earth sciences*. Science, Vol. 263, Issue 5147, pag. 641-646
- Ouwekerk, S.J. (2003). *Invloed op onzekere morfologische effecten op maatgevende hoogwaterstanden langs de Waal*. Technische Universiteit Delft.
- Poortema, K. (2002). *Statistiek I voor CT&M*. Universiteit Twente, Enschede.
- Rijkswaterstaat (1985). *Tienjarig overzicht der waterhoogten, afvoeren en watertemperaturen 1961-1970*, 's-Gravenhage.
- Rijkswaterstaat (1989). *Tienjarig overzicht der waterhoogten, afvoeren en watertemperaturen 1971-1980*, 's-Gravenhage.
- Rijkswaterstaat (2001a). *Analyse van de maatgevende afvoer van de Maas te Borgharen*. Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA), Arnhem.
- Rijkswaterstaat (2001b). *Hydraulische Randvoorwaarden 2001: maatgevende afvoeren Rijn en Maas*. Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA), Arnhem.
- Rijkswaterstaat (2001c). *Vergelijkingsmetingen ADCP- OTT - MSW Hoogwater januari 2001*. Rijkswaterstaat Directie Limburg, Maastricht.
- Rijkswaterstaat (2002). *Bayesiaanse statistiek voor de analyse van extreme waarden*. Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA), HKVLIJN IN WATER, Lelystad.
- Rijkswaterstaat (2003a). *Afvoermetingen met horizontaal opgestelde akoestische stroomprofielmeeters: evaluatie aan de hand van een testmeting*. Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ).
- Rijkswaterstaat (2003b). *Hoogwater op de Rijn en de Maas*. Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA), Arnhem.
- Rijkswaterstaat (2003c). *Weten wat te meten: Evaluatie Landelijke Fysische Monitoring*. Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ).
- Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (2004). *HR2006 Herberekening werklijn Maas*. WL | Delft Hydraulics.
- Shahin, M. (1993). *Statistical Analysis in Water Resources Engineering*. A.A.Balkema, Rotterdam, Brookfield.
- Sluijs, J.P. van der., Craye, M., Funtowicz, S., Klopogge, P., Ravetz, J., Risbey, J. (2005a). *Combining Quantitative and Qualitative Measures of Uncertainty in Model-Based Environmental Assessment: The NUSAP System*. Risk Analysis, Vol. 25, No. 2.
- Sluijs, J.P. van der., Risbey, J.S., Ravetz, J. (2005b). *Uncertainty Assessment of VOC emissions from Paint in the Netherlands*, Environmental Monitoring and Assessment 2005, Vol. 105, pag. 229–259

Walker, W.E., Warremoes, P., Rotmans, J., Sluijs, J.P. van der, Asselt, M.B.A. van, Janssen, P., Krayen von Krauss, M.P. (2003). *Defining Uncertainty, A conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support*. Integrated Assessment 2003, Vol. 4, Nr. 1, pag. 5-17.

Whalley, N., Iredale, R.S., Clare, A.F. (2001). *Reliability and uncertainty in flow measurement techniques - Some current thinking*. Physics and Chemistry of the earth part c-solar-terrestrial and planetary science, Vol. 26, pag. 743-749.

Wit, M. de (2004). *Hoeveel (hoog)water kan ons land binnenkomen via de Maas, nu en in de toekomst? (werkdocument)* Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA), Arnhem.

Gebruikte websites:

(1) www.actuelewaterdata.nl (02-2007)

(2) www.hydraulischerandvoorwaarden.nl (04-2006)

(3) www.nusap.net (06-2007)

(4) www.rws.nl (06-2006)

(5) www.usbr.gov/library (06-2006)

(6) www.waterstat.nl (02-2007)

(7) www.wikipedia.nl (08-2006)

(8) http://esapubs.org/archive/appl/A010/006/Pedigree_notes.htm (06-2007)

(9) www.ott-hydrometry.de (01-2006)

(10) www.waterbase.nl (02-2007)

Bijlage 1. ADCP metingen Borgharen en St. Pieter

datum	begin-tijd	eind-tijd	locatie	Aantal metingen	Gemeten debiet	MSW-debiet	Waterstand	Verschil	
								Gemeten - MSW	
				[-]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[cm+NAP]	[m ³ /s]	[%]
06-02-2001	9:40	10:10	Borgharen	4	1070	1032	4283	38	4
16-02-2001	12:20	12:40	Borgharen	3	589	569	4112	20	4
13-02-2002	11:30	11:30	Borgharen	1	1724	1945	4487	-221	-11
21-02-2002	10:20	10:40	Borgharen	3	1535	1767	4454	-232	-13
22-02-2002	10:20	10:50	Borgharen	4	1381	1580	4418	-199	-13

Tabel B1. Afvoermetingen ADCP Borgharen onder en boven de 1200 m³/s (Barneveld, 2004)

datum	begin-tijd	eind-tijd	locatie	Aantal metingen	Gemeten debiet	MSW-debiet	Waterstand	Verschil	
								Gemeten - MSW	
				[-]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[cm+NAP]	[m ³ /s]	[%]
16-02-2001	10:40	10:50	Sint Pieter	2	606	618	4432	-11	-2
12-12-2001	9:20	10:00	Sint Pieter	5	336	336	4414	0	0
17-12-2001	9:50	11:00	Sint Pieter	4	194	193	4407	1	1
28-01-2002	12:00	12:20	Sint Pieter	3	1886	1936	4638	-50	-3
29-01-2002	9:10	9:40	Sint Pieter	4	1756	1824	4614	-68	-4
14-02-2002	9:30	10:30	Sint Pieter	7	2181	2287	4686	-106	-5

Tabel B2. Afvoermetingen ADCP St. Pieter onder en boven de 1200 m³/s (Barneveld, 2004)

Datum	begin-tijd	eind-tijd	locatie	Gemeten debiet	locatie	Vertaalde debiet	Waterstand	MSW-debiet	Verschil	
									Gemeten - MSW	
				[m ³ /s]		[m ³ /s]	[cm+NAP]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]
06-02-2001	14:10	15:20	Sint Pieter	1165	Borgharen	1140	4315	1137	3	0
07-02-2001	9:50	10:50	Sint Pieter	1231	Borgharen	1209	4337	1223	-14	-1
13-02-2001	10:10	11:20	Sint Pieter	873	Borgharen	839	4208	816	23	3
17-12-2001	9:50	11:00	Sint Pieter	194	Borgharen	165	3892	148	17	10
28-01-2002	12:00	12:20	Sint Pieter	1886	Borgharen	1855	4485	1930	-75	-4
29-01-2002	9:10	9:40	Sint Pieter	1756	Borgharen	1729	4463	1813	-84	-5
14-02-2002	9:30	10:30	Sint Pieter	2181	Borgharen	2139	4524	2244	-105	-5
22-02-2002	9:10	9:40	Sint Pieter	1530	Borgharen	1512	4420	1590	-78	-5
27-02-2002	9:40	9:40	Sint Pieter	1968	Borgharen	1952	4492	1977	-25	-1

Tabel B3. Vertaalde afvoeren Borgharen n.a.v. afvoeren St. Pieter (Barneveld, 2004)

Bijlage 2. Overzicht veranderingen Grensmaas

Periode	Afvoer-waterstand relatie	Waterstands-meting	Afvoer-meting	Bijzonderheden
1911-1932	Q-h relatie Visé	Momentane 8-uur waterstand Visé beneden	Stuw afvoer metingen Visé	Afvoeren bepaald uit kromme Visé
1917-1926	Q-h relatie (Lely) Maastricht	Waterstand te Maastricht Hoofdsluis	Stokdrijver metingen	1918: start rivierwerken Waalse Maas en Maaskanaliseatie tussen Grave en Maasbracht
1926	Verschoven Q-h relatie (Lely) Borgharen	Waterstand te Borgharen (ben.)	Stokdrijver metingen	1926: Hoogwater Rivierwerken Waalse en Nederlandse Maas geïntensifieerd
1933-1952	Afvoer Borgharen versus waterstand Visé	Momentane 8-uur waterstand Visé (ben.)	Stokdrijver metingen	1931: stuw Borgharen Gereed 1935: Julianakanaal 1940: grote rivieraanpassing
1937/1939	Q-h relatie Maastricht	Waterstand te Maastricht Hoofdsluis	Stokdrijver metingen	
1937/1939	Verschoven Q-h relatie Borgharen	Borgharen 8-uur stand te Borgharen (ben.)	Stokdrijver metingen	
1953-1956	Q-h relatie Borgharen	Vereffende 8-uur waterstand te Borgharen (ben.)	Stokdrijver metingen	1955: grote rivieraanpassing
1957-1975	Diverse Q-h relaties Borgharen	Vereffende 8-uur waterstand te Borgharen. '73-'74 berekende gem. etmaalstand Borgh (ben.).	Ott-molen metingen	1973: grote rivieraanpassing
1975-1990	Diverse Q-h relaties Borgharen	Registrerende Peilschrijver (r.p.s.) constante meting Borgh. (dorp). Na 1987 Digitale Niveaumeter Borgh. (dorp).	Ott-molen metingen	1974: station Borgharen-dorp in gebruik en ook het Lateraalkanaal. 1980: Einde grote rivierverbeteringen
1995		Digitale Niveaumeter (DNM) constant Borgh. (dorp)	Ott-molen metingen	1995: Start deltaplan Grote rivieren tot in 1996: Deltawet grote rivieren inwerking.
1998	Nieuwe Q-h relatie Borgharen	Digitale Niveaumeter (DNM) constant Borgh. (dorp)	ADCP	
2000	Controle op de 1998 relatie	Digitale Niveaumeter (DNM) constant Borgh. (dorp)	ADCP	
2001	Laatste bepaling MA door RWS	Digitale Niveaumeter (DNM) constant Borgh. (dorp)	ADCP/ADM	MA geldend tot 2015
2007		Digitale Niveaumeter (DNM) constant Borgh. (dorp)	ADCP/ADM	Start uitvoering van het Grensmaasproject

Tabel B4. Overzicht veranderingen Grensmaas (Min.V&W, 1993), (4)

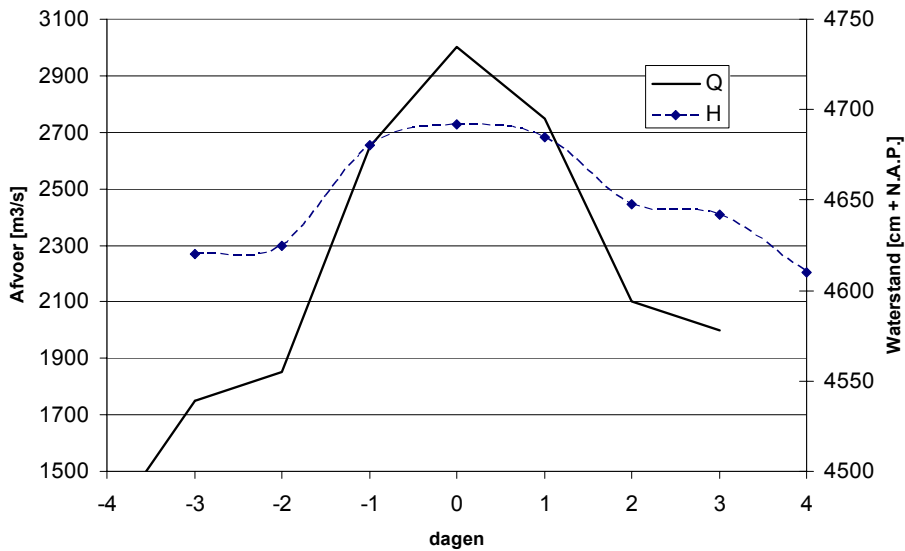
Bijlage 3. Overzicht basismeeetreeksen

Jaar	Boertien I	Boertien II	HR 2001-2	HR 2001-3	HR 2006	Gerretsen	Klunhaar
1911	1220	1333	1333	1333	1333	1377	1333
1912	1144	1243	1243	1243	1243	1295	1243
1913	1559	1733	1733	1733	1733	1741	1733
1914	1246	1364	1364	1364	1364	1405	1364
1915	1790	2031	2031	2031	2031	1990	2031
1916	1544	1716	1716	1716	1716	1725	1716
1917	1657	1874	1874	1874	1874	1847	1874
1918	1144	1243	1243	1243	1243	1295	1243
1919	2000	2279	2279	2279	2279	2279	2279
1920	612	669	669	669	669	673	669
1921	770	839	839	839	839	843	839
1922	1226	1339	1339	1339	1339	1383	1339
1923	1042	1131	1131	1131	1131	1135	1131
1924	1837	2086	2086	2086	2086	2040	2086
1925	2790	3175	3175	3175	3175	3175	3175
1926	1431	1582	1582	1582	1582	1604	1582
1927	1200	1309	1309	1309	1309	1335	1309
1928	1205	1315	1315	1315	1315	1361	1315
1929	1016	1103	1103	1103	1103	1107	1103
1930	1544	1712	1712	1712	1712	1725	1712
1931	1138	1236	1236	1236	1236	1289	1236
1932	1252	1338	1338	1338	1338	1383	1338
1933	515	553	553	553	553	557	553
1934	998	1061	1061	1061	1061	1065	1061
1935	1116	1186	1186	1186	1186	1190	1186
1936	1322	1415	1415	1415	1415	1457	1415
1937	1449	1556	1556	1556	1556	1590	1556
1938	1407	1513	1513	1513	1513	1546	1513
1939	1957	2147	2147	2147	2147	2125	2147
1940	1292	1384	1384	1384	1384	1425	1384
1941	1079	1152	1152	1152	1152	1151	1152
1942	1202	1284	1284	1284	1284	1330	1284
1943	706	759	759	759	759	950	759
1944	1848	2022	2022	2022	2022	2011	2022
1945	1615	1744	1744	1744	1744	1765	1744
1946	1420	1527	1527	1527	1527	1560	1527
1947	1463	1575	1575	1575	1575	1605	1575
1948	577	627	627	627	627	622	627
1949	1196	1282	1282	1282	1282	1324	1282
1950	1493	1576	1576	1576	1576	1572	1576
1951	1610	1706	1706	1706	1706	1700	1706
1952	1805	1938	1938	1938	1938	1900	1938
1953	625	678	678	678	678	673	678
1954	1311	1373	1373	1373	1373	1380	1373
1955	1739	1863	1863	1863	1863	1830	1863
1956	1379	1448	1448	1448	1448	1452	1448
1957	1950	1989	1989	1989	1989	1975	1989

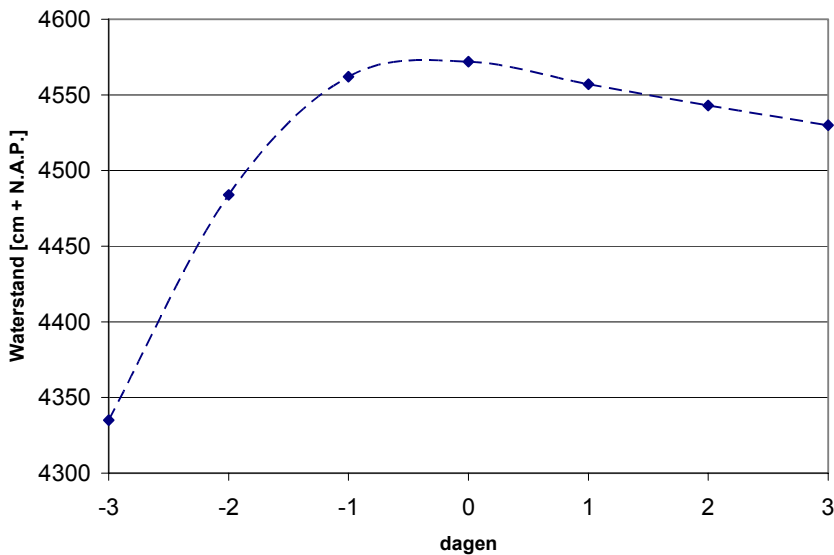
Jaar	Boertien I	Boertien II	HR 2001-2	HR 2001-3	HR 2006	Gerretsen	Klunhaar
1958	1254	1276	1276	1276	1276	1254	1276
1959	789	809	809	809	809	804	809
1960	2125	2171	2171	2171	2171	2125	2171
1961	1705	1714	1714	1714	1714	1705	1714
1962	1055	1075	1075	1075	1075	1077	1075
1963	1586	1588	1588	1588	1588	1670	1588
1964	1293	1317	1317	1317	1317	1373	1317
1965	1892	1924	1924	1924	1924	1892	1924
1966	1964	1999	1999	1999	1999	1964	1999
1967	1586	1590	1590	1590	1590	1586	1590
1968	735	758	758	758	758	777	758
1969	2165	2207	2207	2207	2207	2165	2207
1970	950	944	944	944	944	950	944
1971	477	506	506	506	506	477	506
1972	1071	1065	1065	1065	1065	1071	1065
1973	845	839	839	839	839	1071	839
1974	1259	1253	1253	1253	1253	1259	1253
1975	633	697	697	697	697	635	697
1976	1231	1225	1225	1225	1225	1231	1225
1977	1102	1096	1096	1096	1096	1102	1096
1978	1367	1364	1364	1364	1364	1367	1364
1979	2120	2142	2142	2142	2142	2200	2142
1980	1349	1351	1351	1351	1351	1349	1351
1981	1418	1421	1421	1421	1421	1418	1421
1982	1126	1126	1126	1126	1126	1165	1126
1983	2550	2573	2573	2300	2300	2550	2573
1984	1635	1641	1641	1584	1584	1635	1641
1985	1760	1766	1766	1682	1682	1760	1766
1986	1575	1578	1578	1526	1526	1575	1578
1987	1919	1924	1924	1924	1922	1919	1924
1988	1275	1275	1275	1275	1275	1275	1275
1989	1449	1449	1449	1450	1450	1449	1449
1990	1775	1845	1845	1843	1843	1843	1845
1991	1660	1660	1660	1660	1660	1660	1660
1992	2388	2388	2280	2280	2280	2280	2388
1993		3120	3039	3039	3039	3039	3120
1994			2746	2746	2746	2750	
1995			837	837	849	754	
1996			1124	1124	1133	1093	
1997			1280	1280	1118	1051	
1998			1823	1823	1823	1863	
1999					2122	2118	
2000					1933		
2001					2488		
2002					2731		
2003					1377		

Tabel B5. Overzicht geanalyseerde basismetreeksen van de geevalueerde onderzoeken

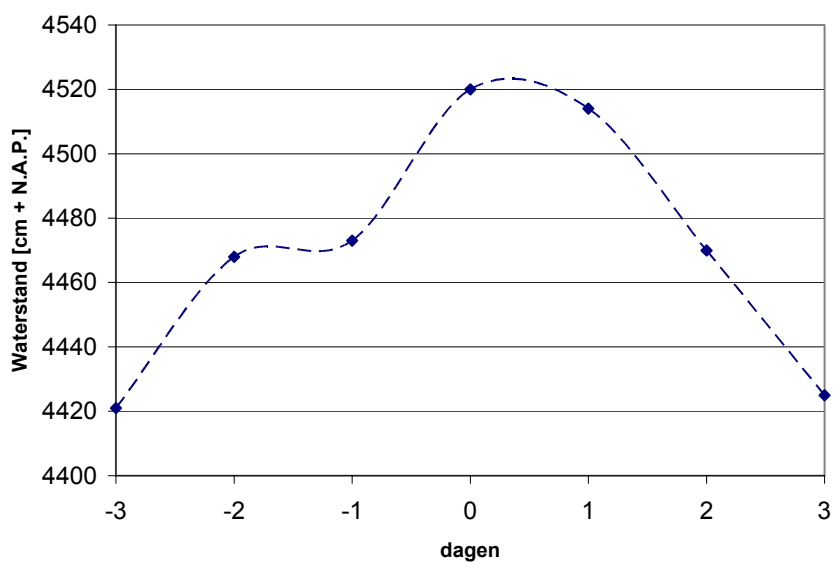
Bijlage 4. Gemeten waterstanden tijdens diverse jaarmaxima tussen 1925 en 1945



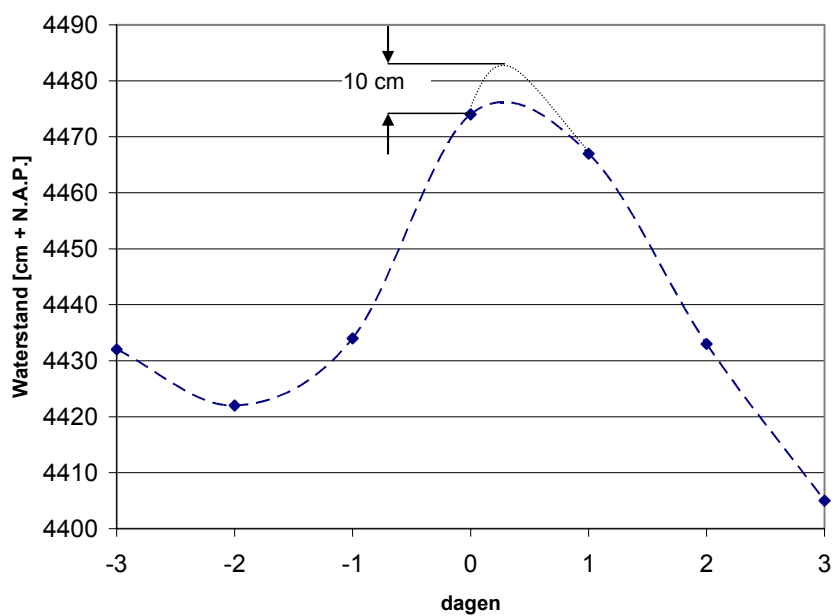
Figuur B1. Waterstanden (meetpunten met verwachtingslijn) en afvoer (onafgebroken lijn) tijdens hoogwater 1926



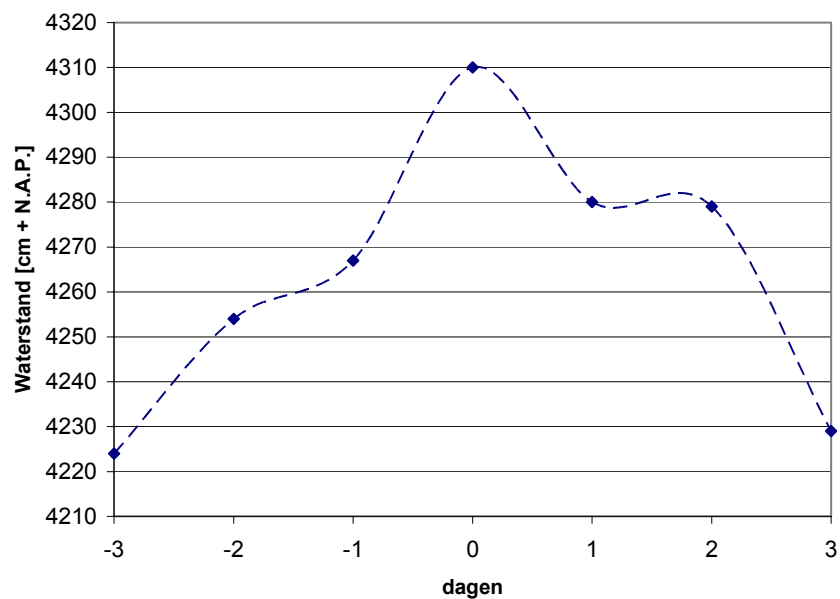
Figuur B2. Waterstanden (meetpunten met verwachtingslijn) tijdens hoogwater 1930



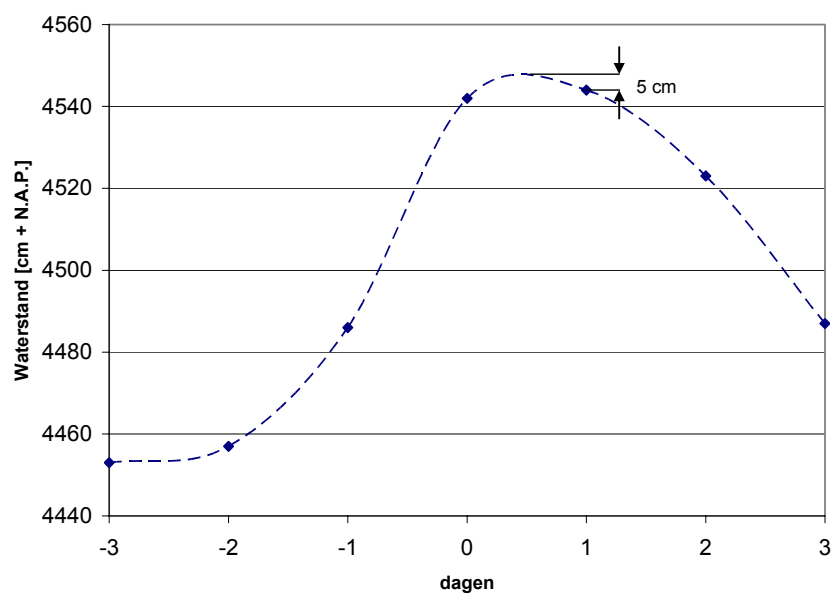
Figuur B3. Waterstanden (meetpunten met verwachtingslijn) tijdens hoogwater 1931



Figuur B4. Waterstanden (meetpunten met verwachtingslijn) tijdens hoogwater 1932 met verwachtingslijn Excel en handmatig getrokken



Figuur B5. Waterstanden (meetpunten met verwachtingslijn) tijdens hoogwater 1934



Figuur B6. Waterstanden (meetpunten met verwachtingslijn) tijdens hoogwater 1945

Bijlage 5. Methoden plot posities jaarmaxima

De analyse van de fit van de kansverdelingfunctie geschiedt in de RWS onderzoeken onder andere door de spreiding en ligging van de geplote jaarmaxima te visueel te beoordelen ten opzichte van de fit van de verdeling. De verdelingsfit volgt uit de relatie van herhalingstijd en afvoer. Ook voor de data (jaarmaxima) wordt een bijbehorende herhalingstijd berekend om deze samen met de verdeling af te beelden. De herhalingstijden kunnen met verschillende ‘plotting position’ formules manieren worden uitgezet. Voor aaneengesloten afvoerreeksen geldt:

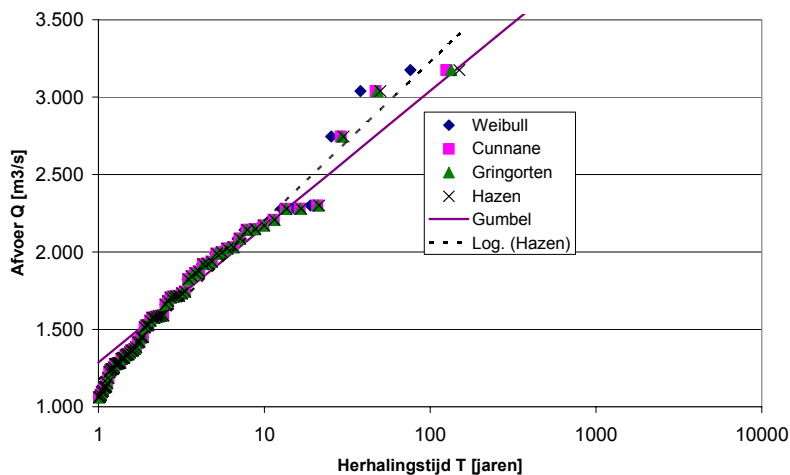
$$\hat{p}_i = \frac{i - a}{n + 1 - 2a}$$

Waarin: i = rangnummer
 n = hoogste rangnummer
 a = constante

Name	relationship	Name	relationship	Name	Relationship
Weibull	$m/N+1$	Excedence	$(m-1)/N$	Blom	$(m-0.375)/(N+0.25)$
California	m/N	Cunnane	$(m-0.4)/(N+0.2)$	Chegodayev	$(m-0.3)/(N+0.4)$
Hazen	$(m-0.5)/(N+1)$	Gringorton	$(m-0.44)/(N+0.12)$	Adamowski	$(m-0.26)/(N+0.5)$

Tabel B5. Plotpositie formules

Voor niet-aangesloten afvoerreeksen met historische overstromingen moet het rangnummer getransformeerd worden. Deze methode is toegepast voor het onderzoek van Gerretsen.

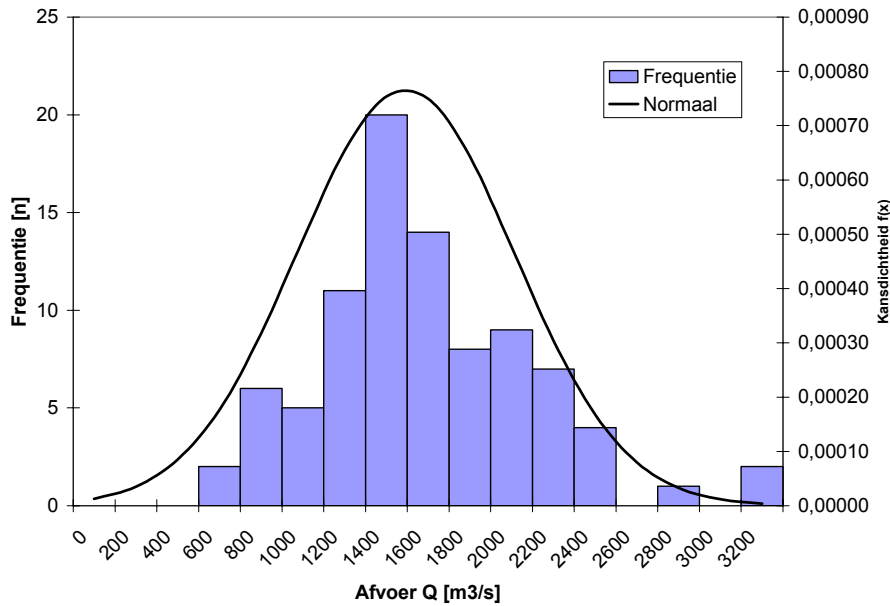


Figuur B7: Plot posities volgens Weibull, Cunnane, Gringorton en Hazen met gefitte Gumbel verdeling uit Hydraulische Randvoorwaarden 2001

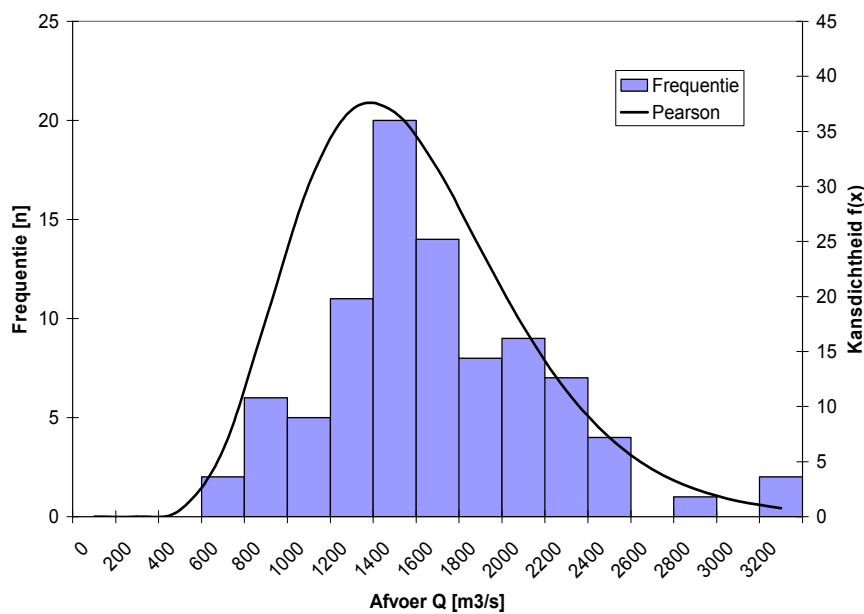
Bovenstaande Figuur geeft de verschillende plot-posities weer tezamen met de Gumbel verdeling. Daarin is duidelijk te zien dat de Weibull plot-positie het meest afwijkt van de Gumbel-fit.

Bijlage 6. Histogrammen met kansverdelingsfuncties

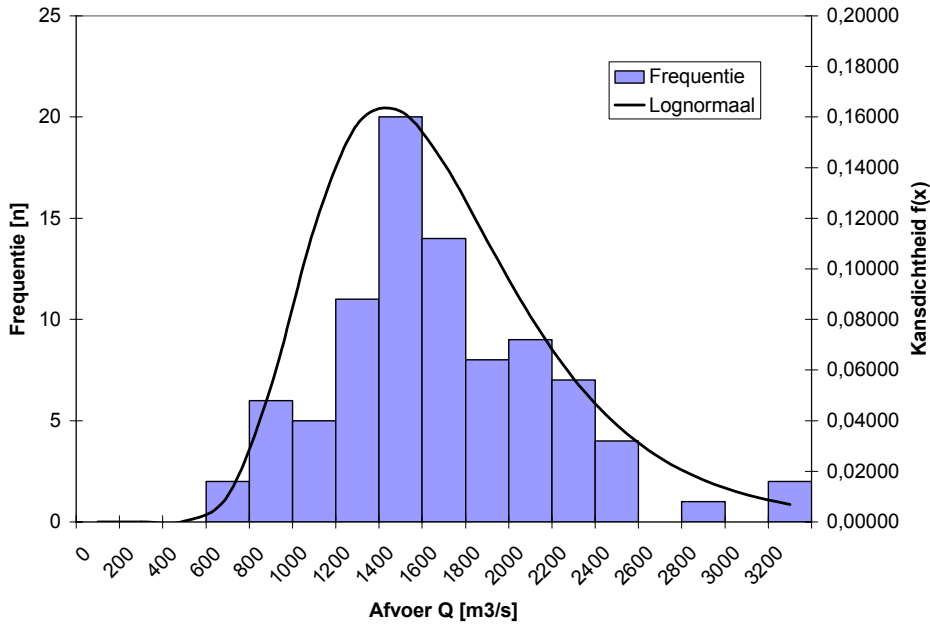
Histogram jaarmaxima en normale verdeling



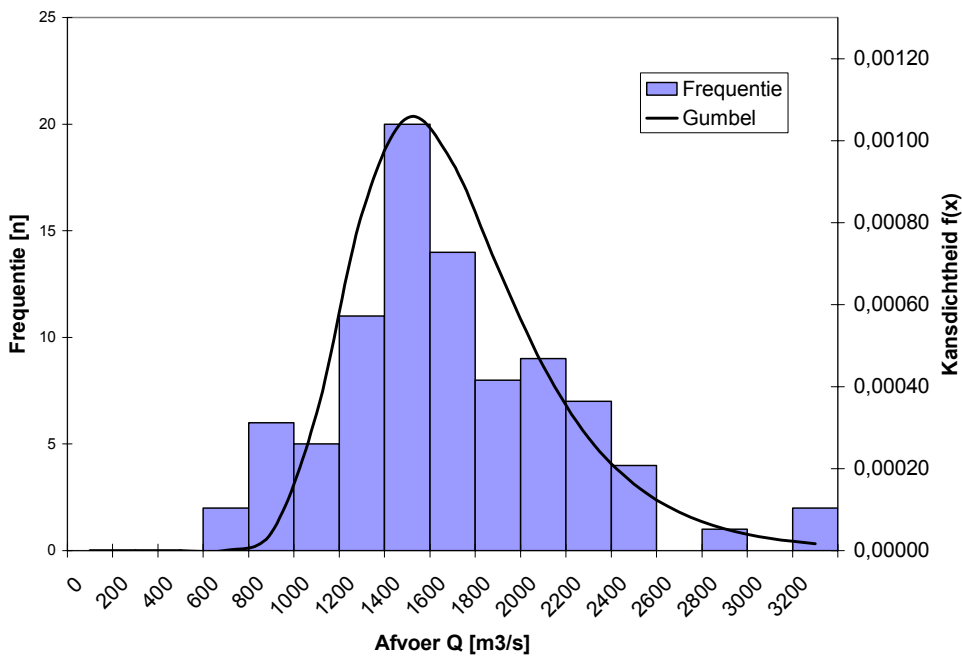
Histogram jaarmaxima en Pearson III verdeling



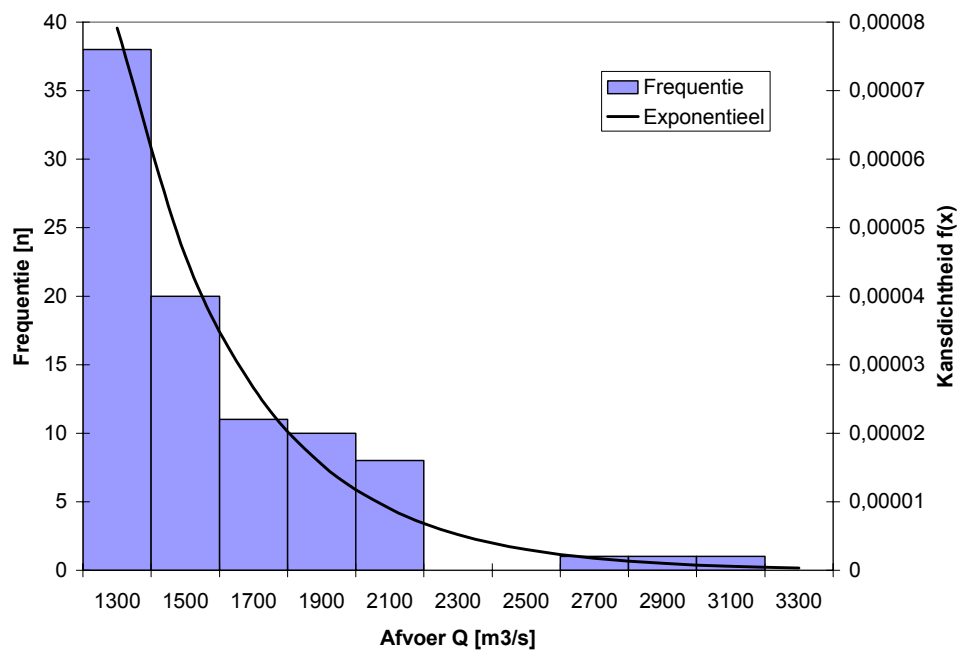
Histogram jaarmaxima en Lognormale verdeling



Histogram jaarmaxima en Gumbel verdeling (gefit op jaarmaxima >1.000 m³/s)



Histogram partiele reeks jaarmaxima >1.300 m³/s en Exponentiele verdeling



Bijlage 7. MOM Parameters klassieke statistiek

De vier verdelingen die bij de Rijkswaterstaatmethode en de gevoeligheidsanalyse zijn gebruikt, worden toegelicht aan de hand van hun functiebeschrijving. De afvoer 'Q' behorende bij een herhalingstijd 'T' is aangeduid als Q_T . De MOM parameterschattingmethode is gebruikt voor de gevoeligheidsanalyse in hoofdstuk 5. Dit in tegenstelling tot de wijze waarop de onderzoeken voor Rijkswaterstaat zijn uitgevoerd waarbij parameters zijn geschat volgens de MLE-methode. De MLE-methode wordt bij voorkeur met een voorgeprogrammeerd model uitgevoerd. Voor dit onderzoek is daar geen gebruik van gemaakt.

Pearson III verdeling

De invoerdata bestaat uit de jaarmaxima voor de periode 1911-1999 ten behoeve van de frequentieanalyse.

$$Q_T = 10^{\log Qr}$$

$$\log Qr = y + K(T) \cdot s_{\log Q_i}$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n \log Q_i}{n}$$

$$K(T) = \frac{2}{C_s} \left(\left(\left(z - \frac{C_s}{6} \right) \left(\frac{C_s}{6} + 1 \right) \right)^3 - 1 \right)$$

$$C_s = \text{scheefheidscoëfficiënt van } \log Q_i \text{ reeks}$$

$$z = z - \text{waarde behorende bij kans } P = 1 - \frac{1}{T}$$

$$T = \text{herhalingstijd in jaren}$$

$$s_{\log Q_i} = \text{standaarddeviatie van } \log Q_i \text{ reeks}$$

De berekeningsmethode voor het betrouwbaarheidsinterval van de Pearson III verdeling wordt overgenomen uit het 'Handbook of Hydrology' van D. R. Maidment. Het interval (in logvorm) wordt gegeven door:

$$\log \hat{Q}r + \eta(\zeta_{1-\alpha,p} - z) s_{\log Q_i} < \log Qr < \log \hat{Q}r + \eta(\zeta_{\alpha,p} - z) s_{\log Q_i}$$

Waarin:

$$\zeta_{\alpha,p} \approx \frac{z + z_\alpha \sqrt{\left(\frac{1}{n} + \frac{z^2}{2(n-1)} - \frac{z_\alpha^2}{2n(n-1)} \right)}}{1 - \frac{z_\alpha^2}{2(n-1)}}$$

$\zeta_{1-\alpha,p}$ wordt verkregen door z_α te vervangen door $z_{1-\alpha}$ welke gelijk is aan $-z_\alpha$. De z waarden wordt verkregen uit de Tabel van de standaardnormale verdeling. Voor een betrouwbaarheid van 95% is deze 1,96.

$$\eta = \sqrt{\left(\frac{1 + C_s \cdot K(T) + 0,5 \cdot (1 + 0,75 \cdot C_s^2) \cdot K(T)^2}{1 + 0,5 \cdot z^2} \right)}$$

Het betrouwbaarheidsinterval uitgedrukt in het debiet is vervolgens:

$$\left[10^{\log \hat{Q}_T + \eta (\zeta_{1-\alpha,p} - z) s_{\log Q_i}}, 10^{\log \hat{Q}_T + \eta (\zeta_{\alpha,p} - z) s_{\log Q_i}} \right]$$

Lognormaal verdeling

$$Q_T = B + EXP(\bar{Q} + z \cdot s_y)$$

Waarin:

$$B = \text{verschuivingsparameter} = \frac{(Q_{\min} \cdot Q_{\max} - Q_{\text{med}}^2)}{(Q_{\min} + Q_{\max} - 2 \cdot Q_{\text{med}})}$$

$$\bar{Q} = \text{gemiddelde } Q$$

$$z = z\text{-waarde behorende bij kans } P = 1 - \frac{1}{T}$$

uit tabel standaardnormale verdeling.

$$T = \text{herhalingsstijd in jaren}$$

$$s_y = \text{standaardevariantie van } y_1, \dots, y_n$$

$$y_i = \ln(Q_i - B)$$

Het betrouwbaarheidsinterval wordt berekend door de standaardfout te berekenen volgens (Shahin, Statistical Analysis in Water Resources Engineering, 1993):

Het interval wordt gegeven door:

$$Q_T - z_\alpha \cdot SE < Q_T < Q_T + z_\alpha \cdot SE$$

Waarin:

$$SE = \delta_T \frac{s_Q}{\sqrt{n}}$$

$$\delta_T = \sqrt{1 + (\eta^3 + 3\eta)K(T) + (\eta^8 + 6\eta^6 + 15\eta^4 + 16\eta^2 + 2)K(T)^2 / 4}$$

$$\eta = \frac{s_Q}{Q}$$

$$K(T) = \frac{1}{\eta} \left(\exp\left(-\frac{1}{2} \ln(1 + \eta^2) + z \cdot \sqrt{\ln(1 + \eta^2)}\right) - 1 \right)$$

Gumbel verdeling

De Gumbel verdeling heeft de eigenschap dat de extremen zwaarder meewegen dan bij de overige verdelingen. De verdeling geeft betere voorspellingen wanneer één zijde van de extremen (er zijn altijd hoge en lage extreme afvoeren) wordt weggelaten, in dit geval de lage jaarmaxima. Voor het Boertien II onderzoek en daaropvolgende onderzoeken is een ondergrens aangehouden van 1.000 m³/s.

$$Q_T = \bar{Q}_{1000} + K(T) \cdot s_Q$$

$$\bar{Q}_{1000} = \text{gemiddelde } Q \text{ voor alle } Q > 1000 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$K(T) = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left(\gamma + \ln \left(\ln \frac{T}{T-1} \right) \right)$$

$$\gamma = \text{constante van Euler (0,57721)}$$

$$T = \text{herhalingstijd in jaren}$$

$$s_Q = \text{standaarddeviatie van } Q$$

De methode voor de berekening van het betrouwbaarheidsinterval komt overeen met die van de Lognormale verdeling.

$$Q_T - z_\alpha \cdot SE < Q_T < Q_T + z_\alpha \cdot SE$$

Waarin:

$$SE(\hat{X}) = \frac{s_Q}{\sqrt{N}} \sqrt{(1 + 1,14 \cdot K(T) + 1,10 \cdot K(T)^2)}$$

Exponentiele verdeling

De Exponentiele verdeling is een eenzijdige verdeling en heeft dus niet zoals de overige verdelingen een verschoven Gauss-vorm. Voor gebruik van deze verdeling wordt daarom gekozen voor een partiele reeks met afvoeren boven een bepaalde drempelwaarde. Niet de jaarmaxima, maar alle afvoerpieken boven een bepaalde drempelwaarde worden meegenomen. Ook wel bekend als de 'Peaks over Threshold' (P.O.T.) -methode. Voor het onderzoek van Rijkswaterstaat zijn alle afvoerenpieken met een zichtduur van 8 dagen met ondergrens 1.300 m³/s gebruikt. Met een zichtduur van 8 dagen wordt verondersteld dat de afvoerpiek onderling onafhankelijk is met een voorgaande afvoerpiek. De Exponentiele verdeling heeft verder de eigenschap dat deze geheugenloos is. Als X een opgetreden extreme afvoer behorende bij een herhalingstijd voorstelt, dan stelt de Exponentiele verdeling dat de kans dat een afvoer X + Y wordt, gegeven dat er al een X afvoer is geweest, gelijk is aan de 'begin' kans dat een Y afvoer optreedt. De Exponentiele functie herinnert zich dus niet dat er al een X afvoer is opgetreden.

$$Q_T = \frac{\ln\left(\frac{1}{T}\right)}{-\lambda} + Q_{\min}$$

$$T = \text{herhalingstijd in jaren}$$

$$\lambda = \frac{1}{(\bar{Q} - Q_{\min})}$$

$$\bar{Q} = \text{gemiddelde } Q$$

$$Q_{\min} = \text{laagste } Q$$

Betrouwbaarheidsinterval:

$$Q_T \pm 1,96 \cdot z \cdot \sqrt{\left(\left(\frac{s_Q^2}{n}\right) \cdot (1 + 0,5 \cdot z^2)\right)}$$

