



# Inventarisatie van de laagwateromstandig- heden in de Rijn

Internationale  
Kommission zum  
Schutz des Rheins

Commission  
Internationale  
pour la Protection  
du Rhin

Internationale  
Commissie ter  
Bescherming  
van de Rijn

*Rapport Nr. 248*



**ICBR-expertgroep Laagwater (EG LW)**

Voorzitter: Gerhard Brahmer (HLNUG)

CH: Caroline Kan (BAFU)

FR: Anne Toussirost (DREAL)

DE: Herbert Walter (WWA Aschaffenburg)

LU: Noémie Patz, Daniel Göhlhausen (Administration de la Gestion de l'Eau)

NL: René van den Heuvel (Rijkswaterstaat)

AT (informele deelname): Ernst Überreiter (BMNT)

FL (informele deelname): Elija Kind (LLV)

CCR (waarnemer): Kai Kempmann

CHR (waarnemer): Eric Sprokkereef

Alsace Nature (waarnemer): Jean Wencker

WNF NL (waarnemer): Bas Roels

ICBR-secretariaat: Anne Schulte-Wülwer-Leidig, Adrian Schmid-Breton,

Dominique Falloux, Isabelle Traue, Fabienne van Harten, Marianne Jacobs

**Colofon**

Uitgegeven door de

Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn (ICBR)

Kaiserin-Augusta-Anlagen 15, 56068 Koblenz, Duitsland

Postbus 20 02 53, 56002 Koblenz, Duitsland

Telefoon: +49-(0)261-94252-0, fax +49-(0)261-94252-52

E-mail: sekretariat@iksr.de

[www.iksr.org](http://www.iksr.org)

© IKS-R-CIPR-ICBR 2018

## Rapport van de EG LW “Inventarisatie van de laagwateromstandigheden in de Rijn”

### Inhoudsopgave

Lijst van figuren .....	3
Lijst van tabellen .....	4
Lijst van bijlagen .....	5
1. Samenvatting .....	6
2. Aanleiding en probleemstelling .....	8
2.1 Aanleiding en probleemstelling .....	8
2.2 Mandaat van de expertgroep Laagwater .....	9
3. Uitgevoerde onderzoeken in het Rijnstroomgebied, in deelstroomgebieden en andere stroomgebieden .....	9
4. Begripsbepalingen, definities en werkwijze .....	12
5. Gegevensbasis en methodes .....	13
5.1 Selectie van meetlocaties en hydrologische gegevensbasis .....	13
5.2 Laagwaterparameters .....	14
5.3 Evaluatie- en analysemethodes .....	15
6. Inventarisatie .....	16
6.1 Hydrologische omstandigheden in het Rijngebied .....	16
6.2 Inventarisatie van de invloeden op de afvoeromstandigheden (onttrekking, aanvoer, omleiding, waterretentie en uitgestelde waterafgifte) .....	17
6.3 Inventarisatie van de gevolgen van laagwater in de Rijn .....	21
6.4 Nationaal laagwaterbeheer .....	26
7. Onderzoek naar historische meetreeksen van meetpunten aan de Rijn .....	30
7.1 Gedrag van laagwaterparameters op lange termijn .....	30
7.2 Referentieperiode en laagwaterparameters .....	34
7.3 Laagwaterafvoer .....	37
7.4 Laagwaterduur .....	42
7.5 Beschrijving en classificatie van geselecteerde historische laagwatergebeurtenissen (voorbeeld: het laagwater in augustus/september 2003) .....	44
8. Mogelijke effecten van klimaatverandering op de toekomstige laagwateromstandigheden in de Rijn .....	45
8.1 Resultaten van uitgevoerde onderzoeken in het Rijnstroomgebied .....	45
8.2 Onderzoek van de afvoerprojecties COSMO-CLM4.8-A1B .....	47
8.3 Effecten waarmee rekening moet worden gehouden vanuit het oogpunt van laagwaterpreventie .....	49
9. Laagwatermonitoring .....	50
9.1 Afleiding van een classificatie van laagwateromstandigheden .....	50
9.2 Validatie van de laagwaterclassificatie aan de hand van historische tijdreeksen .....	51
10. Conclusies .....	55
Bibliografie .....	57
Bijlagen .....	61

## Lijst van figuren

Figuur 1: Ligging van de onderzochte meetpunten aan de Rijn inclusief langjarig gemiddelde laagwaterafvoer over zeven opeenvolgende dagen (MNM7Q) .....	14
Figuur 2: Typisch afvoerregime in het Rijnstroomgebied volgens Pardé; referentieperiode 1961-1990 .....	16
Figuur 3: Belangrijkste locaties aan de Rijn en in het Rijnstroomgebied waar af- dan wel aanvoer van water plaatsvindt .....	20
Figuur 4: Systeem voor de toevoer van water vanuit de Donau naar de Main .....	21
Figuur 5: Vereenvoudigde weergave van de effecten van laagwater op de gebruiksfuncties van water .....	21
Figuur 6: Cyclus van het laagwaterbeheer en bijbehorende actieterreinen .....	26
Figuur 7: Nationale verdringsreeks Nederland .....	29
Figuur 8: Afvoergolven van de laagwatergebeurtenis in augustus/september in het hydrologische jaar 2003 .....	33
Figuur 9: Jaarlijkse NM7Q-waarden op het meetpunt Diepoldsau en vastgestelde breekpunten .....	34
Figuur 10: Jaarlijkse NM7Q-waarden op het meetpunt Maxau en vastgestelde breekpunten .....	35
Figuur 11: Jaarlijkse NM7Q-waarden op het meetpunt Kaub en vastgestelde breekpunten .....	35
Figuur 12: Jaarlijkse NM7Q-waarden op het meetpunt Keulen en vastgestelde breekpunten .....	36
Figuur 13: Trendanalyse van de NM7Q-serie op het meetpunt Bazel .....	37
Figuur 14: Trendanalyse van de NM7Q-serie op het meetpunt Keulen .....	38
Figuur 15: Trendanalyse van de NM7Q-serie voor het zomerhalfjaar (april-september) op het meetpunt Mainz .....	39
Figuur 16: Trendanalyse van de NM7Q-serie voor het winterhalfjaar (november-maart) op het meetpunt Mainz .....	40
Figuur 17: Jaarserie van de parameter onderschrijdingsduur MaxD (in dagen) voor het meetpunt Kaub .....	44
Figuur 18: Retrospectieve monitoring op de meetpunten Bazel, Kaub en Lobith .....	52

## Lijst van tabellen

Tabel 1: Stuwvolume van de stuwmeren in het stroomgebied van de Rijn (gewijzigd op basis van Wildenhahn & Klaholz, 1996 in Belz et al., 2007) .....	18
Tabel 2: Overzicht van de laagwatergebeurtenissen in de Rijn van 1920 t/m 2015 met vermelding van de herhalingstijd (statistische kans van optreden) van de laagste afvoer "NM7Q" en de maximale duur van de onderschrijding "MaxD" < MNM7Q (meetpunten Rekingen tot Lobith) .....	31
Tabel 3: Kengetallen van de gemiddelde afvoer en de laagwaterafvoer op meetpunten aan de Rijn .....	32
Tabel 4: Procentueel aandeel van de afvoer van het meetpunt Bazel.....	32
Tabel 5: Tijdstippen (jaren) waarin op basis van een breekpuntanalyse sprake is van een breekpunt.....	36
Tabel 6: Resultaten van de trendanalyse van de NM7Q-series voor de gehele onderzoeksperiode en de homogene referentieperiode (MK = Mann-Kendall-test; FQS/t-test = t-test van de stijgingscoëfficiënt van de trendlijn).....	38
Tabel 7: Resultaten van de trendanalyse van de NM21Q-series voor de gehele onderzoeksperiode en de homogene referentieperiode (MK = Mann-Kendall-test; FQS/t-test = t-test van de stijgingscoëfficiënt van de trendlijn).....	39
Tabel 8: Laagwaterafvoeren NM1Q met een bepaalde herhalingstijd, afgeleid voor jaarreeksen (j) gerelateerd aan het hydrologische jaar van april t/m maart (4,3).....	40
Tabel 9: Laagwaterafvoeren NM3Q met een bepaalde herhalingstijd, afgeleid voor jaarreeksen (j) gerelateerd aan het hydrologische jaar van april t/m maart (4,3).....	41
Tabel 10: Laagwaterafvoeren NM7Q met een bepaalde herhalingstijd, afgeleid voor jaarreeksen (j) gerelateerd aan het hydrologische jaar van april t/m maart (4,3) .....	41
Tabel 11: Laagwaterafvoeren NM21Q met een bepaalde herhalingstijd, afgeleid voor jaarreeksen (j) gerelateerd aan het hydrologische jaar van april t/m maart (4,3) .....	41
Tabel 12: Laagwaterafvoeren NM60Q met een bepaalde herhalingstijd, afgeleid voor jaarreeksen (j) gerelateerd aan het hydrologische jaar van april t/m maart (4,3) .....	42
Tabel 13: Gemiddeld aantal dagen per jaar waarop de drempelwaarde MNM7Q is onderschreden .....	42
Tabel 14: Duur van de periode (aantal dagen) dat een laagwater met een herhalingstijd van n jaar de drempelwaarde MNM7Q onderschrijdt .....	43
Tabel 15: Toekenning van herhalingstijden aan de laagwaterparameters van de gebeurtenis van 2003.....	43
Tabel 16: Bandbreedte van de verandering van de NM7Q op verschillende meetpunten van de Rijn (bron: ICBR-rapport 188, ICBR, 2011).....	46
Tabel 17: Veranderingen in de laagwateromstandigheden in de nabije toekomst op het meetpunt Kaub (verandering van de afvoer in %, verandering van de duur in dagen).....	47
Tabel 18: Laagwaterparameters voor de afvoerprojectie COSMO-CLM4.8-A1B.....	47
Tabel 19: Modelprojectie onderschrijdingsduur MaxD < NM7Q2 in dagen.....	49
Tabel 20: Vaststelling van laagwaterklassen .....	50
Tabel 21: Jaargemiddeld aantal laagwaterdagen op het meetpunt Bazel.....	53
Tabel 22: Jaargemiddeld aantal laagwaterdagen op het meetpunt Kaub .....	53
Tabel 23: Jaargemiddeld aantal laagwaterdagen op het meetpunt Lobith.....	53

---

## Lijst van bijlagen

Bijlage 1: Vergelijking van de effecten van de laagwatergebeurtenissen van 2003 en 2011 op basis van de European Drought Impact Inventory (EDII) (Kohn, 2017).....	62
Bijlage 2: Beschrijving van geselecteerde laagwatergebeurtenissen .....	63
Bijlage 3: Weergave van de laagwaterduur (max D) .....	82
Bijlage 4: Validatie van de laagwaterclassificatie aan de hand van historische tijdreeksen .....	87

## 1. Samenvatting

De laagwatergebeurtenis tijdens de extreme zomer van 2003, die een negatieve invloed had op de ecologie van de Rijn, en daaropvolgende, meer gematigde gebeurtenissen hebben ervoor gezorgd dat de laagwaterproblematiek weer meer in de publieke aandacht is komen te staan. Dit komt na een rustigere periode op het gebied van laagwater, die begin van de jaren tachtig van de twintigste eeuw aanbrak. Als gevolg van effecten van de klimaatverandering kunnen de genese en de omvang van laagwatergebeurtenissen bovendien veranderingen ondergaan. Tijdens de vijftiende Rijnministersconferentie in 2013 is dit onderwerp opgepakt en verankerd in het ICBR-werkprogramma voor de periode 2016-2021.

Om in de Rijnsoeverstaten te komen tot een gedeeld begrip van laagwatersituaties en in het bijzonder hun grensoverschrijdende effecten en om mogelijkheden voor samenwerking te ontwikkelen, heeft de expertgroep Laagwater de opdracht gekregen om de beschikbare kennis over laagwatergebeurtenissen in het Rijngebied te inventariseren en te analyseren. Van centraal belang zijn daarbij de laagwaterafvoeren in de Rijn, waarvan het ontstaan en de intensiteit in een natuurlijk verband staan met de hydrometeorologische omstandigheden in het stroomgebied.

De talloze definities van het begrip "laagwater" hebben gemeen dat er sprake is van een onderschrijding van een bepaalde drempelwaarde voor de waterstand of afvoer. Voor de onderhavige, vergelijkende inventarisatie zijn er daarom afvoeren onderzocht waarvan de statistische laagwaterparameters in relatie worden gezet tot daarmee samenhangende afvoerdrempelwaarden voor een aantal meetstations langs de Rijn. Een veel gebruikte parameter die is onderzocht, is de NM7Q, het laagste rekenkundige afvoergemiddelde over zeven opeenvolgende dagen in een referentieperiode (jaar), evenals overeenkomstige parameters voor langere periodes. Teneinde over de gehele Rijn vergelijkbare drempelwaarden te verkrijgen, zijn deze parameters op tien onderzoekslocaties van Diepoldsau bovenstrooms van het Bodenmeer tot en met Lobith aan de Duits-Nederlandse grens onderworpen aan een extreme waardenanalyse, waarna er drempelwaarden zijn afgeleid op basis van de kans van optreden ( $T = 2, 5, \dots$  tot 100 jaar). Met het aspect van de duur van een laagwatergebeurtenis is rekening gehouden door het aantal aaneengesloten dagen met afvoeren onder deze drempelwaarden te analyseren.

Voor de natuurlijke laagwateromstandigheden zijn de kwantitatieve aandelen uit verschillende deelstroomgebieden van de Rijn van belang. De meetpuntgerelateerde evaluaties van meetwaarden in de loop van de Rijn verduidelijken ook voor laagwater de betekenis van het afvoeraandeel uit de (Voor-)Alpen, dat zelfs in Nederland nog ongeveer de helft van de gemiddelde laagwaterafvoer uitmaakt. Bovendien zorgt het variërende afvoerregime met in het nivale gedeelte (tot Bazel) minima in de winter en in het pluviale gedeelte (benedenstrooms van Worms) minima in de zomer voor een zekere veerkracht tegenover extreme laagwatergebeurtenissen die zich over de gehele Rijn uitstrekken.

De laagwateromstandigheden in de Rijn worden beïnvloed door de onttrekking en aanvoer van water evenals het beheer van waterreservoirs. Belangrijke wateromleidingen vinden plaats vanuit het Inng gebied naar het Rijngebied ( $7,8 \text{ m}^3/\text{s}$ ) en vanuit het Donaugebied naar het Main-/Rijngebied (tot  $16 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Daarentegen wordt er vanuit het Rijngebied ongeveer  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  afgevoerd naar het Ticinogebied en ongeveer  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  naar het Rhônegebied. Aan de noordelijke Duits-Franse Bovenrijn wordt er direct water onttrokken uit de Rijn: tot  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$  voor grondwaterinfiltratie en ongeveer  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  voor de irrigatie en beregening van landbouwgewassen. Over het geheel genomen is de balans voor de Rijn positief en wint de Rijn aan afvoer dankzij de bovengenoemde maatregelen. Een nog grotere positieve invloed op het laagwater in de Rijn heeft het beheer van waterreservoirs ten behoeve van de opwekking van energie in de (Voor-)Alpen. Hier wordt ruim  $1,8$  miljard  $\text{m}^3$  opslagruimte gebruikt om water dat in de zomer beschikbaar is vast te houden en tijdens de winter, de dominante laagwaterperiode voor de Rijn, af te geven om energie te produceren. De laagwaterafvoeren van de Rijn worden hierdoor in de winter met ongeveer  $100$  à  $120 \text{ m}^3/\text{s}$  verhoogd.

Laagwater heeft directe gevolgen voor de waterkwaliteit en de ecologie; effecten op de gebruiksfuncties doen zich voor op het gebied van scheepvaart, energieproductie, industrie, landbouw, toerisme en recreatie alsmede veiligheid van infrastructuurvoorzieningen.

In de hoofdstroom van de Rijn zijn er geen ernstige, lang aanhoudende, negatieve effecten op de waterkwaliteit waargenomen tijdens laagwatergebeurtenissen. Dit is hoofdzakelijk te danken aan de enorme inspanningen die de afgelopen decennia in de afvalwaterzuivering zijn gedaan. Ecologische problemen treden voornamelijk op als laagwatergebeurtenissen zich in de zomer voordoen en gepaard gaan met verhoogde watertemperaturen en bijgevolg lage zuurstofgehaltenes (vis- en schelpdiersterfte in 2003). Bij de totstandbrenging van het rapport heeft er afstemming plaatsgevonden met de ICBR-werkgroepen "Ecologie" (WG B) en "Waterkwaliteit/emissies" (WG S).

Voor de binnenvaart en de personen en bedrijfstakken die hiervan afhankelijk zijn heeft laagwater grensoverschrijdende gevolgen, die nadelig zijn voor de economie en leiden tot knelpunten in de voorziening met energieproducten en grondstoffen. In de watervoorziening in Nederland treedt bij laagwater verzilting van het oppervlaktewater als gevolg van zoutindringing vanuit zee op. Dit kan leiden tot stopzetting van de drinkwaterinname of beperking van de waterinname voor landbouwgebruik. De energiesector wordt enerzijds getroffen door een afname van de productie in waterkrachtcentrales en anderzijds door restricties bij de inname of lozing van koelwater. Hierdoor kunnen ook industriebedrijven en MKB's onder druk komen te staan. In Nederland kunnen bij laagwater lokaal problemen met instabiele veenkades ontstaan.

De analyse van historische afvoerreeksen heeft aangetoond dat de Rijn in de eerste helft van de vorige eeuw te maken had met laagwatergebeurtenissen die duidelijk intensiever waren, lagere afvoeren hadden en langer aanhielden dan in de laatste vijftig jaar. Voor de gehele periode van 1901 tot 2010 kan er een significant stijgende trend worden waargenomen in de laagwaterafvoeren in de Rijn van Diepoldsau tot Andernach. Deze trend is niet over de gehele, ongeveer honderd jaar durende periode gelijkmatig, maar is gebaseerd op een knikpunt rond de periode 1960-1970. Dit knikpunt kan voornamelijk worden toegeschreven aan de invloed van het beheer van waterreservoirs in het Alpengebied, dat vanaf de jaren '60-'70 voor een verandering in de laagwaterafvoer gezorgd heeft. Ook de stijgende tendens in de jaarlijkse neerslag die het Rijnstroomgebied in de twintigste eeuw liet zien, kan een rol spelen in de waargenomen trend. In de periode van 1961 tot 2010 kunnen er geen significante trends worden ontdekt in de laagwaterafvoeren. De huidige perceptie van laagwatergebeurtenissen wordt enerzijds beïnvloed door de lange afwezigheid van belangrijke laagwaters en anderzijds door de grotere gevolgen.

Klimaatverandering brengt veranderingen teweeg in laagwaterafvoeren. In de bekeken afvoerprojecties voor de periode 2021-2050 reikt de bandbreedte voor de Rijn van - 10% tot + 10%, hetgeen geen uitsluitel geeft over de ontwikkeling. In de verre toekomst (2071-2100) laten de afvoerprojecties voor het hydrologische zomerhalfjaar steeds duidelijke afnames in de laagwaterafvoeren zien.

In een pessimistisch scenario met dalende laagwaterafvoeren, waarbij de MNM7Q (langjarig gemiddelde laagwaterafvoer over zeven opeenvolgende dagen) in de periode 2021-2050 5 tot 10% afneemt, wordt de daling in de laagwaterafvoeren steeds groter naarmate de herhalingstijd langer wordt (daling van 7 tot 14% voor een laagwaterafvoer die eens in de twee tot vijftig jaar voorkomt). Met de afname in de afvoer gaat een duidelijke toename van de laagwaterduur gepaard.

In de toekomst zouden laagwatergebeurtenissen in het zomerhalfjaar steeds meer ecologische effecten kunnen hebben aan de Rijn. Bij lage afvoeren kunnen de watertemperaturen in de zomer sterker stijgen. Voorbeelden hiervan zijn de laagwatergebeurtenissen van 2003 en 2006. Onderzoek van de ICBR-expertgroep STEMP heeft uitgewezen dat er rekening moet worden gehouden met een stijging van de Rijnwatertemperatuur in de zomer, die in de nabije toekomst 1,5 °C zal bedragen en in de verre toekomst meer dan 3 °C. Voor de nabije toekomst (2021-2050) betekent dit



onder andere een verdubbeling van het aantal dagen waarop de watertemperatuur van de Rijn hoger is dan 25 °C (ecologisch kritische drempelwaarde).

Het lijkt zinvol om een laagwatermonitoring voor de Rijn te ontwikkelen, teneinde over de gehele rivier op dezelfde manier zicht te houden op de verschijnselen. Hierdoor kunnen actuele gebeurtenissen direct worden vergeleken en geclassificeerd, en mogelijke veranderingen in de laagwateromstandigheden worden vastgesteld.

Op basis van een uitgebreide analyse van historische afvoerreeksen zijn er in overleg met de Internationale Commissies ter Bescherming van de Moezel en de Saar (IKSMS) afvoegerelateerde drempelwaarden afgeleid voor de classificatie van de laagwatersituatie in de Rijn, waarbij er vijf intensiteitsniveaus worden gehanteerd, van "normaal" tot "extreem zeldzaam laagwater". Deze classificatie is toegepast op de historische afvoerreeksen en blijkt geschikt te zijn, aangezien ze een onderscheidende classificatie van laagwatergebeurtenissen oplevert. Extreme gebeurtenissen kunnen duidelijk worden onderscheiden van kleinere gebeurtenissen, zonder dat daarbij de gevoeligheid voor kleinere laagwatergebeurtenissen verloren gaat.

De belangrijkste bevinding is dat laagwater in de Rijn nu niet erger is dan honderd jaar geleden, maar vandaag de dag wel meer gevolgen heeft voor een groter aantal gebruiksfuncties (scheepvaart, industrie, landbouw, energieproductie, enz.). De vraag naar water en de socio-economische invloeden zouden kunnen toenemen in het Rijnstroomgebied. Daarnaast kan laagwater een negatieve weerslag hebben op aquatische ecosystemen, zeker als lage afvoeren gepaard gaan met hoge watertemperaturen. In enkele klimaatprojecties wordt voor de toekomst uitgegaan van frequentere laagwatergebeurtenissen in de zomer gecombineerd met verhoogde watertemperaturen. Al deze zaken zijn aanleiding om de ontwikkelingen in de Rijn te blijven monitoren.

## 2. Aanleiding en probleemstelling

### 2.1 Aanleiding en probleemstelling

Tijdens de vijftiende Rijnministersconferentie van 2013 zijn de opdrachten voor de ICBR geformuleerd voor de komende jaren. In het ICBR-werkprogramma voor de periode 2016-2021 zijn deze opdrachten uitgewerkt en geconcretiseerd. Onder het thema "Klimaatverandering en adaptatie" is het onderwerp laagwater opgenomen. Hierin is gesteld dat het onderwerp laagwater een concretere invulling moet krijgen. Een eerste stap daarvoor is een nadere analyse van laagwatergebeurtenissen. Laagwater kent zowel hydrologische aspecten alsook kwalitatieve aspecten (temperatuur en chemie).

De WG H is gevraagd om de hydrologische aspecten van laagwatergebeurtenissen in beeld te brengen en nader te analyseren. De WG S en B beschouwen de kwalitatieve aspecten van laagwater.

De WG H heeft hiervoor een nieuwe expertgroep Laagwater (EG LW) ingesteld. Deze EG LW is voor het eerst bijeengekomen op 17 januari 2017.

#### Probleemstelling

Op dit moment hebben de Rijnsoeverstaten geen gedeeld beeld over laagwatersituaties, terwijl elk land te maken heeft met periodiek optredende (extreme) laagwatersituaties. Ook is er geen gezamenlijk beeld over de relevantie van grensoverschrijdende effecten van laagwater noch van mogelijke kansen op grensoverschrijdende samenwerking bij de aanpak van knelpunten ten gevolge van laagwater.

Met de instelling van de EG LW wordt een begin gemaakt met het verkrijgen van een gezamenlijk beeld over laagwater in de Rijn.

De opdracht van de EG LW is om de bestaande kennis over laagwatergebeurtenissen Rijnstroomgebiedbreed te inventariseren, een analyse uit te voeren hierop en om de mogelijke ontwikkelingen hierin te monitoren op Rijnstroomgebiedsniveau. Hierbij wordt rekening gehouden met mogelijke effecten van klimaatverandering.

De EG LW heeft ook tot taak om de kennis die hiermee wordt opgedaan actief met de andere werkgroepen (m.n. S en B) te delen om zo de impact van

laagwatergebeurtenissen op het ecologisch functioneren en het menselijk gebruik van de watersystemen te kunnen inschatten/beoordelen.

## 2.2 Mandaat van de expertgroep Laagwater

De expertgroep Laagwater (EG LW) heeft zijn mandaat in onderstaande taken uitgewerkt. Deze rapportage vormt de verslaglegging over de uitvoering van de activiteiten die voor deze taken zijn ontplooid. Tegelijkertijd is deze rapportage één van de beoogde producten die de EG LW ter invulling van zijn mandaat tot stand heeft gebracht.

### 1. Inventarisatie van de kennis over laagwater in het internationaal Rijndistrict

- Analyse van de laagwatersituatie o.b.v. een meetpuntgerelateerde evaluatie van meetgegevens (langjarig);
- Analyse en beschrijving van een selectie van extreme laagwatergebeurtenissen;
- Overzicht van invloeden op en gevolgen van laagwater;
- Beschouwing van effecten van klimaatverandering op laagwater op basis van de resultaten van de EG KLIMA / CHR-Rheinblick2050 en doorvertaling van de in dit verband vastgestelde variabelen;
- Informatie-uitwisseling over nationale laagwatermonitoring en aspecten van het laagwaterbeheer, inclusief grensoverschrijdende aspecten.

### 2. Ontwikkeling van laagwatermonitoring (meetnet en observatieparameters)

3. Informatie-uitwisseling met de andere werkgroepen S en B, en eventueel andere gebruiksfuncties in verband met de specifieke, ondervonden gevolgen.

4. **Totstandbrenging van een bijdrage** (rapport) aan het antwoord van de WG H op de opdracht van de Rijnministersconferentie van 2013 (en in de aanloop naar de volgende Rijnministersconferentie). **Totstandbrenging van een bijdrage** aan het advies van de WG H in relatie tot de resultaten van de werkzaamheden, de stand van de kennis en de vraag naar de relevantie/noodzaak van een ICBR-laagwaterbeheerplan.

## 3. Uitgevoerde onderzoeken in het Rijnstroomgebied, in deelstroomgebieden en andere stroomgebieden

Gelet op de betekenis van de Rijn als een van de grootste rivieren van Europa zijn onderzoeken naar de afvoeromstandigheden zeer belangrijk. Een tot voorbeeld strekkend, fundamenteel en uitvoerig overzicht van de afvoeromstandigheden in de Rijn en zijn belangrijkste zijrivieren en van de situatie in het Rijnstroomgebied is de zogenaamde "Rijnmonografie" (CHR, 1978), bestaande uit kaarten, teksten en tabellen. Dit werk bevat al informatie over het extreme laagwaterjaar 1947 evenals "beschouwingen in verband met de laagwaterperiodes van 1959 en 1964".

Een overzicht van de invloeden van menselijk handelen op de afvoer in de Rijn is opgenomen in Buck et al. (1993). Vooral de aanleg van stuwdammen, waardoor bovenstrooms van Bazel een totale opslagcapaciteit van ruim 1,8 miljard m<sup>3</sup> is gecreëerd, verduidelijkt deze invloed op laagwatersituaties (de afvoer vloeit gelijkmatiger af). Een analyse van de afvoeromstandigheden in de Rijn en zijn zijrivieren over de gehele twintigste eeuw is uitgevoerd door Belz et al. (CHR, 2007). Dit is de eerste analyse en weergave van de kwantitatief-hydrologische ontwikkelingsdynamiek in het Rijngebied als geheel over een dermate lange, uniforme periode. Naast ontwikkelingen in het afvoerregime, de omstandigheden bij gemiddelde waterstand en hoogwater, zijn ook de ontwikkelingen in de laagwateromstandigheden in de twintigste eeuw onderzocht. In de samenvatting van de laagwaterresultaten worden deze ontwikkelingen beschreven, met een duidelijke uitkomst als conclusie:

*"De waargenomen laagwaterextremen in het Rijngebied zijn in de loop van de twintigste eeuw matiger geworden. Dit geldt vooral voor de hoofdstroom van de Rijn zelf en voor zijn grote zijrivieren; in het stroomgebied van secundaire, kleinere zijrivieren is er sprake van sterkere, regionale verschillen. De hierboven geschetste context maakt duidelijk dat de matiging zich intensiever voltrekt in gebieden waar het winterseizoen samenvalt met*

*het eigenlijke laagwaterseizoen, dus in het zuidelijke, nivale Rijngebied. In de pluviale zone in het middelgebergte en het laagland, waar de laagwatertijd in de late zomer of herfst pleegt te vallen, is er daarentegen geen sprake van een matigende trend, omdat de neerslag in deze maanden aan weinig veranderingen onderhevig is. Alleen andersoortige invloeden, zoals bijvoorbeeld extra watertoevoer naar de Main, verklaren uitzonderingen op deze constellatie.” (Belz et al., 2007)*

In het KLIWAS-project zijn de effecten van klimaatverandering op waterwegen en scheepvaart in Duitsland onderzocht (BMVBS, 2009). KLIWAS komt tot het volgende resultaat: *“Voor het zuidelijke Rijngebied, waar het winterhalfjaar voor oppervlaktewateren doorgaans de tijd met de laagste afvoer is, betekent het voorgaande een markante toename van de afvoer en bijgevolg een matiging van de laagwaterextremen. Echter, ten noorden van de Mainlijn vallen de maanden met de laagste waterstanden in de late zomer en herfst; hier is er sprake van een ongerichte, deels ook enigszins dalende tendens in de laagwaterextremen. De lichte verscherping van de laagwaterextremen in het noordelijke Rijngebied is evenwel zo zwak dat ze statistisch als niet significant dient te worden beschouwd.” (BMVBS, 2009)*

In het project “Rheinblick2050” (Görgen et al., 2010) is een omvangrijk ensemble van klimaatprojecties voor de 21e eeuw gebruikt om de toekomstige, door klimaatverandering beïnvloede afvoerstandigheden in het Rijngebied te modelleren. In de samenvatting komen de auteurs met betrekking tot laagwater tot de volgende slotsom: *“With respect to low flow we see no strong development in the near future; while most ensemble members show no clear tendency in summer (ranging from +/- 10%), winter low flow is even projected to be alleviated (0% to +15%). For the far future, the change signal is stronger in summer, with a tendency towards decreased low flow discharges (-25% to 0%), while for winter no clear signal is discernible (bandwidths are mainly from -5% to +20% depending on discharge diagnostic and gauging station)” (Görgen et al. 2010).*

De projecten “Afvoerregime van de Rijn” (Belz et al., 2007) en “Rheinblick2050” (Görgen et al. 2010) hebben duidelijk gemaakt dat er een gebrek was aan een betrouwbare kwantificering van het sneeuw- en gletsjeraandeel aan de totale afvoer van de Rijn. Deze lacune is aangevuld door het CHR-project “Aandeel van de afvoer in de Rijn en zijn zijrivieren uit het smelten van sneeuw en gletsjers in het licht van de klimaatverandering” (Stahl et al., 2016). Geanalyseerd en weergegeven is het dagelijkse afvoeraandeel uit smeltende sneeuw en gletsjers op verschillende meetpunten over de gehele Rijn in de periode 1901-2006. Hierdoor kan ook de omvang van deze invloed op laagwater worden gekwantificeerd.

In een studie naar scenario's voor het afvoerregime van de Rijn, opgesteld door de EG KLIMA van de ICBR (ICBR, 2011), is er vooral rekening gehouden met de resultaten van Görgen et al. (2010).

Op basis van de ontwikkelingen in de luchttemperatuur en de afvoer die in de studie naar scenario's voor het afvoerregime van de Rijn zijn vastgelegd (ICBR, 2011) heeft de ICBR (expertgroep STEMP) in 2014 een rapport uitgegeven waarin voor het eerst een inschatting wordt gemaakt van de gevolgen van de klimaatverandering voor de ontwikkeling van de temperatuur van het Rijnwater in de nabije toekomst (2021-2050) en in de verre toekomst (2071-2100) (ICBR, 2014). Dit rapport is een aanvulling op de ICBR-publicaties in verband met de langjarige ontwikkeling van de temperatuur van het Rijnwater in de periode 1978-2011 (ICBR, 2013a) en in verband met mogelijke effecten van deze veranderingen op aquatische levensgemeenschappen (ICBR, 2013b). In laatstgenoemd rapport wordt aangetoond dat tijdens bijzonder warme zomers met zeer lage afvoeren de watertemperatuur zodanig kan stijgen dat er negatieve effecten kunnen optreden op het aquatische ecosysteem (ICBR, 2013b).

Daarnaast heeft de ICBR de volgende rapporten uitgegeven met informatie over zowel de gevolgen van voorbije laagwatergebeurtenissen als de maatregelen die hiertegen zijn genomen: rapport 142, getiteld “Warmtebelasting van de wateren in de zomer van 2003 - Samenvatting van de nationale situatierapporten” (ICBR, 2004, alleen beschikbaar in het Duits en het Frans), rapport 152, getiteld “Maatregelen inzake de warmtebelasting van de Rijn tijdens extreem warme en droge periodes - Overzicht en samenstelling van

de nationale rapporten" (ICBR, 2006) en rapport 198, getiteld "Laagwaterperioden in het Rijnstroomgebied in 2011" (ICBR, 2012).

De Duitse werkgroep KLIWA (klimaatverandering en waterbeheer) heeft onderzoek gedaan naar (ontwikkelingen in) de laagwatersituatie op een groot aantal meetpunten in Baden-Württemberg, Beieren en Rijnland-Palts (Arbeitskreis KLIWA, 2009). In het kader van een samenwerking tussen de KLIWA-partners en de Duitse deelstaat Hessen zijn er afvoerprojecties en evaluaties uitgevoerd, ook voor laagwaterparameters in de Rijn (HYDRON, 2015).

In Belz (2005) en op het informatieplatform Undine ([www.undine.bafg.de](http://www.undine.bafg.de)) (BfG, 2016) zijn beschrijvingen van voorbije laagwatergebeurtenissen in het Rijngebied gebundeld.

Voor het Moezelgebied is door de IKSMS (Internationale Commissies ter Bescherming van de Moezel en de Saar) een rapport gepubliceerd met een inventarisatie van de laagwaterproblematiek (IKSMS, 2014). Verder was het project FLOW MS 2009-2013 (IKSMS, 2009-2013) gewijd aan het onderwerp "Beheer van hoog- en laagwater in het stroomgebied van Moezel en Saar". Op dit moment voert de IKSMS operationele laagwatermonitoring uit en in 2018 zal er een geactualiseerd rapport over laagwater verschijnen. Bovendien heeft er in het kader van het onderhavige ICBR-onderzoek afstemming plaatsgevonden tussen de ICBR en de IKSMS.

Beieren, dat een zeer groot aandeel inneemt in het stroomgebied van de Main, heeft een uitgebreid overzicht gemaakt, van basisgegevens tot informatie over laagwaterbeheer en maatregelen in verschillende sectoren (BY-LfU, 2016).

De CHR heeft samen met de twee andere "Rijncommissies" ICBR en CCR (Centrale Commissie voor de Rijnvaart) en met de steun van het BAFU (Zwitserse Milieudienst) op 20 en 21 september 2017 in Bazel een internationaal symposium over laagwater in het Rijnstroomgebied, getiteld "Low flows in the Rhine catchment" georganiseerd, dat stond in het teken van "science meets practice". Tijdens deze bijeenkomst heeft een zeventigtal deelnemers meer kennis vergaard over hydroklimatologische processen en parameters en over effecten van laagwater. Zo zijn de eerste resultaten van de expertgroepen Laagwater van de ICBR en de IKSMS voorgesteld en is door de CCR zicht gegeven op de effecten van laagwater op de scheepvaart. Verder zijn er voorbeelden van monitoring, management en mitigatiemaatregelen voorgesteld.

Tijdens dit symposium is duidelijk geworden dat laagwater in de Rijn vanuit hydrologisch oogpunt nu niet erger is dan honderd jaar geleden, maar vandaag de dag wel meer gevolgen heeft voor een groter aantal gebruiksfuncties (scheepvaart, industrie, landbouw, energieproductie, enz.). Aangenomen wordt dat de vraag naar water en de socio-economische invloeden toenemen in het Rijnstroomgebied. Er wordt van uitgegaan dat we in de toekomst vaker zullen worden geconfronteerd met laagwater in de zomer, gecombineerd met hogere watertemperaturen. De resultaten van het symposium zullen als input worden gebruikt voor de komende werkzaamheden van de drie betrokken "Rijncommissies". Meer informatie is te vinden op [www.chr-khr.org](http://www.chr-khr.org) (CHR, 2017) en op [www.iksr.org](http://www.iksr.org) (onder "Bijeenkomsten").

De bovengenoemde projecten en studies hebben tal van resultaten en werkwijzen opgeleverd die ook zijn meegenomen in het onderhavige onderzoek.

Hoewel het onderwerp "hoogwater" in de meeste andere Europese riviercommissies nog altijd prioritair blijft, wordt het onderwerp "laagwater" (of droogte) ook vermeld in de KRW-beheerplannen, in jaarverslagen en in verschillende documenten of strategieën over de effecten van klimaatverandering of -adaptatie. In dit verband kunnen bijvoorbeeld worden genoemd: de Internationale Commissie ter Bescherming van de Donau (IKSD), die een artikel heeft gepubliceerd over de droge periode in 2003 en een uitvoerig rapport over invloeden en effecten van de droogte op gebruiksfuncties in 2015 (op basis van een enquête in de landen) of de Internationale Maascommissie (IMC), die in november 2003 een desbetreffende workshop heeft georganiseerd, die is bijgewoond door zestig vertegenwoordigers van overheden, het bedrijfsleven, belangengroepen en universiteiten, met als resultaat dat er een automatisch en permanent informatiesysteem voor de melding van laagwatersituaties is ingevoerd. De Internationale Commissie ter Bescherming van de Elbe (IKSE) zet het 18e "Magdeburger Gewässerschutzseminar"

(Magdeburg seminar over waterbescherming) in het teken van “laagwater en eisen aan de gebruiksfuncties in het stroomgebied van de Elbe” (18 en 19 oktober 2018 in Praag).

Op Europees niveau wordt het onderwerp waterschaarste en droogte, dat ook relevant is voor laagwater, voornamelijk afgedekt door de Kaderrichtlijn Water (KRW) en de bepalingen in deze richtlijn in verband met het bereiken van de goede watertoestand (oppervlakte- en grondwater), onder meer rekening houdend met wateronttrekkingen. Deze bepalingen zouden moeten worden opgenomen in de KRW-stroomgebiedbeheerplannen en de bijbehorende maatregelenprogramma's. In 2007 heeft de EU de mededeling “De aanpak van waterschaarste en droogte in de Europese Unie” (Europese Commissie, 2007) gepubliceerd. In het “Drought Management Plan Report” (Europese Commissie, 2008) wordt een gedetailleerd beeld gegeven van benaderingen voor het beheer van droogte. Er worden onder meer verplichte onderdelen van droogtebeheer genoemd: 1) vroegtijdig waarschuwingssysteem voor droogte, 2) droogteindicatoren en grenswaarden voor verschillende droogtestadia, 3) maatregelen die in de verschillende droogtestadia moeten worden genomen om specifieke doelen te bereiken.

Verder is er een strategie ontwikkeld (Europese Commissie, 2012) en een netwerk van experts rond dit onderwerp opgetuigd (Europese Commissie, 2008). Het Gemeenschappelijk Centrum voor Onderzoek (EU-JRC) heeft het “European Drought Observatory” opgericht (JRC 2017, Cammaleri 2017). Ook het Europees Milieuagentschap (EEA, 2009) en verschillende onderzoeksprojecten (DROUGHT-R&SPI, 2015) houden zich met dit thema bezig. Het “European Drought Impact Inventory” is een inventarisatie van de effecten van droogte in heel Europa. Het bevat ook informatie over voorbije laagwatergebeurtenissen in het Rijnstroomgebied (zie ook hoofdstuk 6.3 en bijlage 2) (DROUGHT-R&SPI, 2015; Kohn, 2017). In het kader van de Common Implementation Strategy (CIS) ter ondersteuning van de implementatie van de KRW in de lidstaten zijn er enkele interessante technische rapporten of richtsnoeren opgesteld en gepubliceerd, zoals bijvoorbeeld het droogtemanagementplan (Europese Commissie, 2008) en het document “stroomgebiedbeheer in een veranderend klimaat”, dat ook laagwatergegevens bevat (Europese Commissie, 2009).

Op mondiaal niveau kunnen onder andere worden genoemd: de “Manual on Low-flow Estimation and Prediction” (WMO, 2009) en het “Integrated Drought Management Programme” (IDMP) (WMO - GWP, 2014) met waardevolle informatie over de inschatting en analyse van laagwater en integraal droogtebeheer. In dit verband heeft de VN in 2013 het startschot gegeven voor het initiatief “Capacity development to support national drought management policies” (ontwikkeling van de randvoorwaarden voor de ondersteuning van nationaal droogtebeheer) (UN, 2013; BY-LfU, 2016). In december 2017 heeft de VN-ECE de “International Workshop on Water Scarcity: Taking action in transboundary basins and reducing health impacts” georganiseerd (UN-ECE, 2017). Tijdens deze bijeenkomst zijn de voorlopige resultaten van de EG LW voorgesteld.

#### **4. Begripsbepalingen, definities en werkwijze**

Laagwater in rivieren ontstaat doordat hydrologische en meteorologische gebeurtenissen elkaar overlappen. Doorslaggevend voor de ontwikkeling van laagwater is een lang aanhoudende droge periode in combinatie met afnemende afvoer uit grondwater in het stroomgebied. De oorzaken van laagwater houden voornamelijk verband met de neerslaghoeveelheid (er valt minder dan gemiddeld of neerslag blijft in het geheel uit) en de neerslagretentie (een grote hoeveelheid wordt vastgehouden in de vorm van sneeuw en ijs).

In de Duitse DIN-norm 4049 wordt “laagwater” omschreven als “een toestand in een bovengronds water waarbij de waterstand of afvoer een bepaalde waarde (drempelwaarde) heeft bereikt of onderschreden”.

Deze definitie biedt verschillende interpretatiemogelijkheden voor laagwater, en kan bij een gebeurtenis tot zeer uiteenlopende inschattingen leiden, afhankelijk van de vraag of de waterstand of de afvoer de relevante parameter is en afhankelijk van de plaats waar een bepaalde gebruiksfunctie is getroffen. Deze “getroffenheid” is verbonden met een “drempelwaarde”, die hetzij overeenkomt met een hydrologische classificatie, hetzij fungeert als waarde waaronder de gebruiksfunctie steeds meer hinder ondervindt hoe lager de waarde wordt (bijv. scheepvaart) of die geldt als grenswaarde waaronder de gebruiksfunctie direct moet worden stopgezet (bijv. omleiding of onttrekking van water).

Belangrijke gevolgen van laagwater in de Rijn zijn opgevraagd in de (deel)staten en geïnventariseerd. Ook zijn belangrijke antropogene invloeden op de (laagwater)afvoer uitgezocht en ingedeeld bij de afzonderlijke Rijntrajecten.

Laagwater kan worden beschreven met behulp van verschillende parameters en hun kans van optreden (zie hoofdstuk 5). Lage waterstanden of afvoeren zijn het eerste, duidelijke teken van laagwater, dat verder wordt gekenmerkt door de duur van de gebeurtenis. Deze parameters kunnen voor verschillende referentieperiodes (bijv. zomerhalfjaar) of meetreeksen worden bepaald en afgezet tegen langjarige gemiddelden of drempelwaarden.

Voor de onderhavige, vergelijkende inventarisatie van de laagwateromstandigheden in de Rijn is er onderzoek gedaan naar afvoeren, die vervolgens zijn afgezet tegen statistische, hydrologische laagwaterparameters in de vorm van drempelwaarden. Op die manier kunnen de omvang en de ontwikkeling van het optreden van laagwater voor de gehele hoofdstroom van de Rijn worden weergegeven. De gebruikte afvoerdrempelwaarden en laagwaterparameters kunnen in principe via de waterstand-afvoerrelatie op de meetpunten worden omgezet in waterstanden. Echter, deze waterstanden gelden uitsluitend voor het dwarsprofiel op de meetpunten in kwestie; om lokale invloeden te kunnen meenemen, zouden de waterstanden moeten worden doorvertaald naar de desbetreffende locaties.

Om laagwaterklassen (als drempelwaarden) voor een monitoring vast te stellen, zijn de beschikbare tijdreeksen na een homogeniteitsanalyse beperkt tot een referentieperiode van vijftig jaar, die een goed beeld geeft van de huidige toestand. De gevolgde werkwijze is toegelicht in hoofdstuk 5. Het optreden van laagwater in de historische tijdreeksen is op basis van de vastgestelde laagwaterklassen retrospectief geanalyseerd en weergegeven in hoofdstuk 7.

## 5. Gegevensbasis en methodes

### 5.1 Selectie van meetlocaties en hydrologische gegevensbasis

Het onderzoek in de EG LW concentreert zich op de beschrijving en analyse van de laagwateromstandigheden langs de Rijn, waarbij er rekening moet worden gehouden met de invloeden uit het stroomgebied van zijrivieren. Er zijn referentiemeetpunten afgesproken voor de afzonderlijke Rijntrajecten, waartussen hydrologische veranderingen kunnen optreden als gevolg van de invloed van grotere zijrivieren. De waarden van de referentiemeetpunten worden bepaald door het bovenstrooms gelegen stroomgebied en zijn, met uitzondering van het meetpunt Diepoldsau, representatief voor het Rijntraject tot het volgende meetpunt (zie figuur 1).

Meetpunt **Diepoldsau** aan de Alpenrijn bovenstrooms van het Bodenmeer

Meetpunt **Rekingen** aan de Hoogrijn benedenstrooms van het Bodenmeer en de monding van de Thur

Meetpunt **Bazel** aan de Hoogrijn benedenstrooms van de monding van de Aare

Meetpunt **Maxau** aan de Duits-Franse Bovenrijn met de zijrivieren uit het Zwarte Woud en de Voegen

Meetpunt **Worms** aan de Duits-Franse Bovenrijn na de monding van de Neckar

Meetpunt **Mainz** aan de Duits-Franse Bovenrijn na de monding van de Main

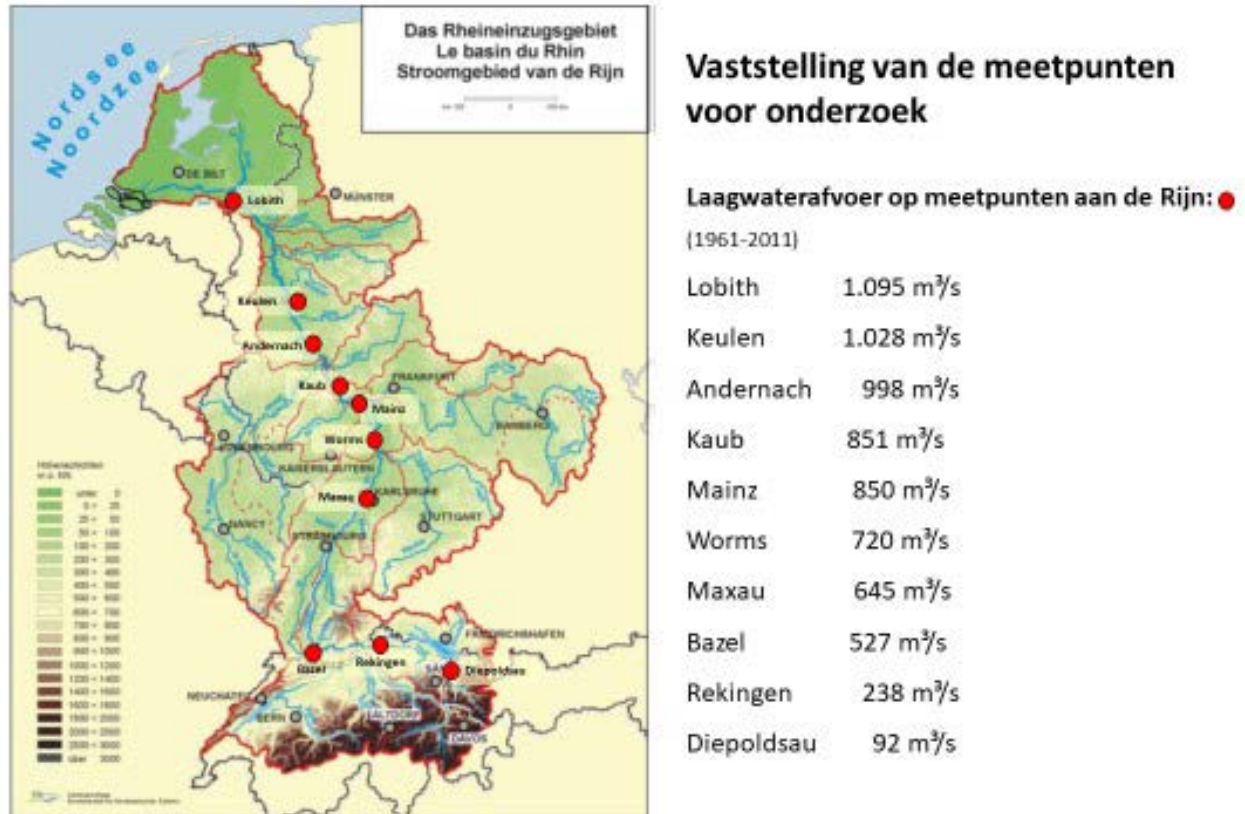
Meetpunt **Kaub** aan de Middenrijn na de monding van de Nahe

Meetpunt **Andernach** aan de Middenrijn na de monding van de Lahn en de Moezel

Meetpunt **Keulen** aan de Duitse Nederrijn na de monding van de Ahr en de Sieg

Meetpunt **Lobith** aan de Duitse Nederrijn na de monding van de Wupper, de Erft, de Ruhr en de Lippe tot aan de Duits-Nederlandse grens. Na Lobith wordt in Nederland het water over de drie Rijntakken verdeeld.

Deze referentiemeetpunten zijn hydrologische meetpunten (waar de afvoer wordt geanalyseerd) waarvoor langjarige afvoerreksen (gemeten, of op basis van gemeten waterstand berekend) beschikbaar zijn (zie figuur 1). Omdat in het kader van laagwateronderzoek doorgaans daggemiddelde afvoeren worden geanalyseerd en de temporele resolutie van deze waarden in het onderhavige geval hoog genoeg is, gelet op de omvang van de meetpuntstroomgebieden aan de Rijn, is er een gegevensbasis samengesteld met de daggemiddelde afvoeren van 1900 t/m 2015, voor zover er gegevens beschikbaar waren. Voor het meetpunt Diepoldsau zijn er pas vanaf 1919 gegevens en voor het meetpunt Mainz pas vanaf 1931.



Figuur 1: Ligging van de onderzochte meetpunten aan de Rijn inclusief langjarig gemiddelde laagwaterafvoer over zeven opeenvolgende dagen (MNM7Q) (gewijzigd op basis van Bundesanstalt für Gewässerkunde - BfG)

## 5.2 Laagwaterparameters

De omvang van een laagwatergebeurtenis wordt enerzijds gekenmerkt door de laagte van de afvoer en anderzijds door de duur van de lage afvoer, en weergegeven door middel van een afvoergolf. Voor statistische analyses en vergelijkende onderzoeken zijn er parameters nodig die zijn afgeleid van de afvoergolven, en het laagwater beschrijven. Uitgaande van de daggemiddelde afvoeren in de verschillende referentieperiodes wordt er gebruik gemaakt van de laagste daggemiddelde afvoer in een te beschouwen periode (1901 tot nu) (**NNQ**), de laagste daggemiddelde afvoer in een referentieperiode (**NQ**) of de gemiddelde laagste daggemiddelde afvoer over een aantal jaren (**MNQ**). Om verstoringen van afzonderlijke beïnvloede of door meetfouten vertekende daggemiddelden te beperken in de analyse worden parameters bepaald op basis van meerdere, opeenvolgende dagen. Een gebruikelijke waarde is bijv. het laagste rekenkundige gemiddelde over zeven opeenvolgende dagen (**NM7Q**) in een referentieperiode (bijv. jaar). Als drempelwaarde wordt in deze analyse de **MNM7Q** gehanteerd over een langdurige homogene periode (zie figuur 1 en hoofdstuk 5.3).

De duur van een laagwatergebeurtenis is het aantal dagen waarop een (vast te stellen) drempelwaarde  $Q_s$  wordt onderschreden. Deze drempelwaarde kan voortvloeien uit een lokale gebruiksfunctie of ten behoeve van vergelijkende onderzoeken zijn gedefinieerd door middel van statistische hydrologische parameters. Bij de parameter laagwaterduur wordt een onderscheid gemaakt tussen de langste, ononderbroken periode waarin een

drempelwaarde binnen een zeker tijdsbestek is onderschreden (**MaxD**) en de som van alle periodes waarin een drempelwaarde binnen een zeker tijdsbestek is onderschreden (**SumD**) (DVWK, 1983).

Een complexere laagwaterparameter is het afvoerdeficit (DVWK, 1983). Dit is de grootste hoeveelheid afvoer die binnen een zeker tijdsbestek ontbreekt tussen een drempelwaarde  $Q_s$  en de afvoergolf (**MaxV** [ $m^3$ ]) of de som van alle ontbrekende afvoerhoeveelheden tussen een drempelwaarde en een afvoergolf (**SumV** [ $m^3$ ]).

Als referentieduur voor de laagwaterparameters is het "hydrologische jaar" van 1 april t/m 31 maart het jaar erop gebruikt, om de neerslaggebeurtenissen die zich in de late herfst of winter voordoen niet te onderbreken bij de afleiding van jaarreeksen, en hun eventuele waarden niet in twee opeenvolgende jaren mee te nemen.

Voor de analyse van lokale gevolgen kunnen laagwaterparameters ook worden bepaald op basis van waterstandswaarden in plaats van afvoeren, maar dan zijn ze niet vergelijkbaar met andere referentiemeetpunten (aan rivieren).

### 5.3 Evaluatie- en analysemethoden

Voor het onderzoek naar de laagwateromstandigheden is er gebruik gemaakt van klassieke statistische procedés en in handboeken gepubliceerde methodes voor laagwateranalyse (DVWK, 1983; DVWK, 1992). De statistische analyses en de hieraan voorafgaande vorming van reeksen en series van parameters zijn uitgevoerd met het programma HyStat van het Duits Instituut voor toegepast waterbeheer en geoinformatica (IAWG).

Na een plausibiliteitscontrole en eventuele correctie van de verzamelde gegevens zijn uit alle tijdreeksen van de meetpunten **jaarseries** van laagwaterparameters  $NM_xQ$  ( $x = 1, 3, 7, 21, 60$ ) gevormd. Hiervoor wordt per jaar de kleinste gemiddelde laagwaterafvoer over  $x$  opeenvolgende dagen opgezocht. Het rekenkundige gemiddelde van de jaarwaarden is dan de laagwaterparameter  $MNM_xQ$  ( $MNQ, MNM3Q, MNM7Q, MNM21Q$  en  $MNM60Q$ ) voor de verschillende periodes dat een laagwater op elk meetpunt aanhoudt (bijv. "**langjarig gemiddelde laagwaterafvoer** over zeven opeenvolgende dagen",  $MNM7Q$ ).

Met de series van de  $NM_xQ$ -waarden zijn **breekpuntanalyses** uitgevoerd om te bepalen of er zich op een bepaald tijdstip veranderingen voordoen in het gedrag van de waarden in de serie. Met de methode van Bernier en Pettit wordt een tijdstip gezocht waarop het statistische karakter van een tijdreeks verandert. Het gevonden breekpunt splitst een tijdreeks in twee tijdspannes met een significant verschillend gedrag. Op basis van de resultaten van de breekpuntanalyse en de grafische weergave van de temporele kenmerken van de parameters is er uit de gehele onderzoeksperiode (1901-2015) een referentieperiode voor de huidige toestand (1961-2010) afgeleid.

Ten behoeve van het onderzoek van de **laagwaterduur** zijn er uitgaande van de reeksen van daggemiddelde afvoeren series gevormd van de absolute som van het aantal dagen per jaar en van het maximum aantal opeenvolgende dagen per jaar waarop een drempelwaarde  $Q_s$  wordt onderschreden. Als drempelwaarde is de parameter  $MNM7Q$  gekozen evenals de  $NM7Q$ -waarden met een verschillende kans van optreden op de verschillende meetpunten, zodat alle meetpunten aan de Rijn wat de duur van laagwatergebeurtenissen betreft direct met elkaar kunnen worden vergeleken.

Door middel van **trendanalyses** zijn tijdreeksen onderzocht op de aanwezigheid van toe- dan wel afnemende trends in het laagwaterafvoergedrag. De tijdreeksen zijn geanalyseerd ten aanzien van de significantie van een lineaire trend door aanpassing van een trendlijn middels minimalisatie van de residuele kwadratensom. De significantietest (betrouwbaarheidsdrempel van 5%) gebeurde met een (non-parametrische) Mann-Kendall-test en de t-test van de stijgingscoëfficiënt van de lijn.

Om de **kans van optreden** van laagwaterafvoeren van een bepaalde omvang en duur (laagwaterperiode) te kunnen classificeren, zijn de gegevens onderworpen aan een analyse op basis van extreme waarden. De waarden van de jaarseries van de laagwaterparameters in de referentieperiode (1961-2010) zijn aangepast aan een



theoretische kansverdeling en op basis daarvan zijn de overeenkomstige kwantielen voor een gebeurtenis met een herhalingsduur van T jaar bepaald ( $T = 2, 5, 10, 20, 50, 100$  jaar). Voor de laagwaterparameters  $NM \times Q$ , waarvoor voor elk jaar een waarde beschikbaar is, is een **klassieke kansanalyse** uitgevoerd. Omdat bij de waarden die de laagwaterduur aangeven er ook afzonderlijke jaarwaarden zijn die geen drempelwaarde onderschrijden en voor deze jaren de waarde nul geldt, kunnen deze series niet met de gebruikelijke hydrologische verdelingsfuncties worden aangepast. Daarom is er voor de kansanalyse van de laagwaterduur gebruik gemaakt van de **indirecte methode** van de Duitse Vereniging voor Waterbeheer en Cultuurtechniek (DVWK, 1992). Hiervoor wordt voor een hele waaier van drempelwaarden de duur van de onderschrijding in afzonderlijke jaren bepaald. Zodoende kan per onderschrijdingsduur een steekproef van de bijbehorende drempelwaarden  $Q_s$  worden verkregen, waarvan de elementen groter zijn dan nul. Na de aanpassing van een verdelingsfunctie kunnen in een eerste stap drempelwaarden worden bepaald afhankelijk van de herhalingsduur T en de onderschrijdingsduur D. In een tweede stap kan omgekeerd de relevante grootte van de onderschrijdingsduur D worden bepaald op basis van de drempelwaarde  $Q_s$  en de herhalingsduur T.

## 6. Inventarisatie

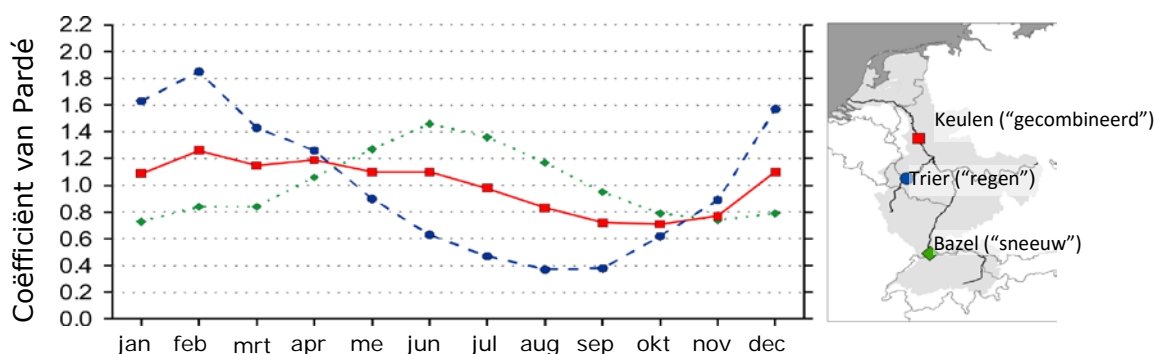
### 6.1 Hydrologische omstandigheden in het Rijngebied

Het afvoerregime beschrijft het algemene afvoergedrag van rivieren ten aanzien van het langjarig gemiddelde jaarlijkse verloop en de kenmerkende ontwikkelingen van extreme hoog- en laagwatersituaties (Belz et al., 2007). In het Rijnstroomgebied is er een overlap tussen verschillende afvoerregimes (zie figuur 2).

Het zuidelijke gebied rond de Alpen (meetpunt Bazel) wordt gekenmerkt door de afwisseling tussen de vorming van een sneeuwdek in de winter en het smelten van de sneeuw in de zomer en door relatief veel zomerneerslag (**“sneeuwregime” of nivaal regime**). Deze omstandigheden hebben tot gevolg dat **laagwatersituaties voornamelijk in de winter** en hoogwatersituaties voornamelijk in de zomer optreden.

Kenmerkend voor de rivieren uit het Middelgebergte (Neckar, Main, Nahe, Lahn, Moezel, enz.; meetpunt Trier) is een **“regenregime” (of pluviaal regime)**. Hoogwater zien we hier hoofdzakelijk in de winter en **laagwater in de zomer**.

Door de overlapping van de twee regimes **verdeelt de afvoer zich Rijnafwaarts steeds gelijkmatiger over het jaar (“gecombineerd regime”; meetpunt Keulen)**.



Figuur 2: Typisch afvoerregime in het Rijnstroomgebied volgens Pardé<sup>1</sup>; referentieperiode 1961-1990 (ICBR, 2011)

Voor laagwatersituaties zijn de kwantitatieve aandelen uit verschillende deelstroomgebieden van de Rijn van belang (zie ook hoofdstuk 7.1). Zo levert de langjarig gemiddelde laagwaterafvoer uit het (Voor-)Alpengebied die wordt gemeten op het meetpunt Bazel nog bijna drie vierde van de laagwaterafvoer op het meetpunt Worms benedenstrooms van de monding van de Neckar. Op het meetpunt Mainz na de

<sup>1</sup> Coëfficiënt van Pardé = verhouding van de langjarig gemiddelde maandafvoer tot de langjarig gemiddelde jaarafvoer

monding van de Main worden de laagwaterparameters nog voor circa twee derde gedomineerd door het meetpunt Bazel, terwijl op het meetpunt Lobith altijd nog ongeveer de helft van de laagwaterafvoer kan worden toegeschreven aan het meetpunt Bazel. Het leeuwendeel van de gemiddelde laagwaterafvoer komt dus uit het (Voor-)Alpengebied (vooral als gevolg van het afvoerregime dat daar heerst en het effect van de meren aan de voet van de Alpen). De watertoevoer vanuit de grote zijrivieren verhoogt de laagwaterparameters gemiddeld met 12% (Neckar) tot 18% (Main en Moezel). In stroomgebieden met een pluviaal regime doen uitgesproken laagwatersituaties zich dus voor als de afvoer vanuit het (Voor-)Alpengebied vanaf september/oktober begint terug te lopen en als de winters droog zijn (of zeer koud, waardoor de neerslag grotendeels wordt vastgehouden in het sneeuwdek).

De variabele aandelen uit smeltende sneeuw en gletsjers hebben een niet te verwaarlozen invloed op zomerse laagwatergebeurtenissen in de Rijn. Smeltende sneeuw levert een belangrijk aandeel van de afvoer, en smeltende gletsjers spelen een belangrijke rol in de ondersteuning van extreme laagwaterfases in de Middenrijn en de Duitse Nederrijn in de late zomer (Stahl et al., 2016). Tijdens de gebeurtenis van 2003 bestond de afvoer in Bazel procentueel gesproken voor ongeveer een derde en in Lobith voor ongeveer een vijfde uit gesmolten gletsjerijs als maximale bijdrage op dagbasis. Onder gemiddelde omstandigheden is de invloed van smeltende gletsjers echter gering in Lobith (< 2%).

## **6.2 Inventarisatie van de invloeden op de afvoerstandigheden (onttrekking, aanvoer, omleiding, waterretentie en uitgestelde waterafgifte)**

Antropogene invloeden op laagwater kunnen maar moeilijk worden onderscheiden van natuurlijke schommelingen in de hydrologische parameters. Over het algemeen geldt dat veranderingen in laagwater het directe gevolg kunnen zijn van het beheer van waterreservoirs, de onttrekking en aanvoer van water, dan wel indirect kunnen worden veroorzaakt door wijzigingen in de gebruiksfuncties in het stroomgebied (LAWA, 2007; Belz et al., 2007). In het onderhavige hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de antropogene invloeden dat is gebaseerd op een gegevensopvraging bij de landen, op rapporten over voorbije laagwaterperiodes en op literatuurevaluaties (zie figuur 3). Het voorliggende onderzoek concentreert zich op directe invloeden en laat de indirecte invloeden, die moeilijk te kwantificeren zijn, buiten beschouwing (landgebruik, bosbouw, landbouw, bijzondere gebruiksfuncties zoals bijv. mijnbouw, enz.). In figuur 3 worden de belangrijkste locaties aan de Rijn en in het Rijnstroomgebied waar af- dan wel aanvoer van water plaatsvindt schematisch weergegeven (bron: nationale informatie, ICBR (intern), 2017).

### **Beheer van waterreservoirs**

Bij het beheer van waterreservoirs wordt water in periodes van wateroverschot opgeslagen en in periodes waar er behoefte is aan water weer vrijgegeven, wat leidt tot een dynamiek van seizoensgebonden afvoerverschuiving en -compensatie. Het gaat hierbij om een belangrijke antropogene invloed die er in grote mate toe bijdraagt dat de afvoervariabiliteit afneemt ondanks de toenemende neerslagvariabiliteit. Dit is in het bijzonder bovenstrooms van Bazel het geval, waar van het begin van de twintigste eeuw tot de jaren zestig stuwmereen zijn aangelegd (en een totale opslagcapaciteit van ruim 1,8 miljard m<sup>3</sup> is gecreëerd) (zie figuur 3). Buiten het Alpengebied zijn de doelen van het beheer van waterreservoirs veel minder uniform, waardoor deze parameter hier een minder grote invloed uitoefent op de Rijn. Naast de bovengenoemde effecten mag niet vergeten worden dat stuwmereen altijd ook uitgestrekte kunstmatige wateroppervlakken zijn waar veel verdamping plaatsvindt, en als gevolg van de opstuwning van kunstmatige meren en de aanleg van kanalen of stuwpanden kan er vergeleken met de vroegere toestand bovendien sprake zijn van meer aanvulling van het grondwater (LAWA, 2007; Belz et al. 2007). Het stuwvolume (d.w.z. het bergend vermogen dan wel de waterretentiecapaciteit) van de stuwmereen in het stroomgebied van de Rijn is weergegeven in tabel 1. De actuele sturing in de alpiene regio van het Rijnstroomgebied leidt tot een verschuiving van de afvoer in de tijd met als gevolg dat de afvoeren, en

meer bepaald de laagwaterafvoeren, in het anders veeleer door lage afvoeren gekenmerkte winterhalfjaar met ca. 120 m<sup>3</sup>/s zijn gestegen (Weingartner, 2017).

Tabel 1: Stuwvolume van de stuwmeren in het stroomgebied van de Rijn (gewijzigd op basis van Wildenhahn & Klaholz, 1996 in Belz et al., 2007)

Rijntraject dan wel zijrivier	Volume [miljoen m <sup>3</sup> ]	Som van het volume [miljoen m <sup>3</sup> ]
Voor-Rijn	253,14	253,14
Achter-Rijn	289,36	542,50
Tamina	38,50	581,00
III (AT)	183,40	764,40
Bregenzerach	8,40	772,80
Bodenmeer	1,40	774,20
Thur	0,60	774,80
Hoogrijn (CH)	7,26	782,06
Aare	496,95	1279,01
Reuss	153,19	1432,20
Limmat	314,86	1747,06
Hoogrijn (DE)	112,85	1859,91
Duits-Franse Bovenrijn	27,63	1887,54
III (FR)	24,29	1911,83
Neckar	37,99	1949,82
Main (inclusief opslagsysteem voor de watertoevoer van de Donau naar de Main: Nahe	180,00	2129,82
Lahn	14,05	2143,87
Moezel (FR)	6,63	2150,5
Moezel (DE; zonder Sauer)	103,58	2254,08
Sauer (zijrivier van de Moezel)	50,53	2304,61
Wied	71,40	2376,01
Ahr	4,45	2380,46
Sieg	0,73	2381,19
Wupper	123,10	2504,29
Erft	140,43	2644,72
Ruhr	51,00	2695,72
Lippe	496,06	3191,78
	50,01	3241,79

### Aan- en afvoer van water

Het directe onttrekken, afvoeren en terugleiden van gebruikt water behoren tot de antropogene maatregelen met een directe invloed op het debiet. Hieronder valt met name het gebruik van water ten behoeve van drinkwaterwinning, irrigatie of koeling van thermische centrales. Soms wordt water daarenboven omgeleid naar andere stroomgebieden, waardoor het wordt onttrokken aan zijn oorspronkelijke gebied. Dergelijke grootschalige omleidingen komen bijv. voor aan de Neckar (drinkwatertoevoer vanuit het Bodenmeer) en aan de Main (in het bijzonder toevoer vanuit het Donaugebied sinds het midden van de jaren negentig van de twintigste eeuw via het Donau-Maintoevoersysteem inclusief het Rijn-Main-Donaukanaal ter ondersteuning van de afvoer/verhoging van het laagwaterpeil in met name de Regnitz, wat ook ten goede komt aan de Main) (Belz et al., 2007).

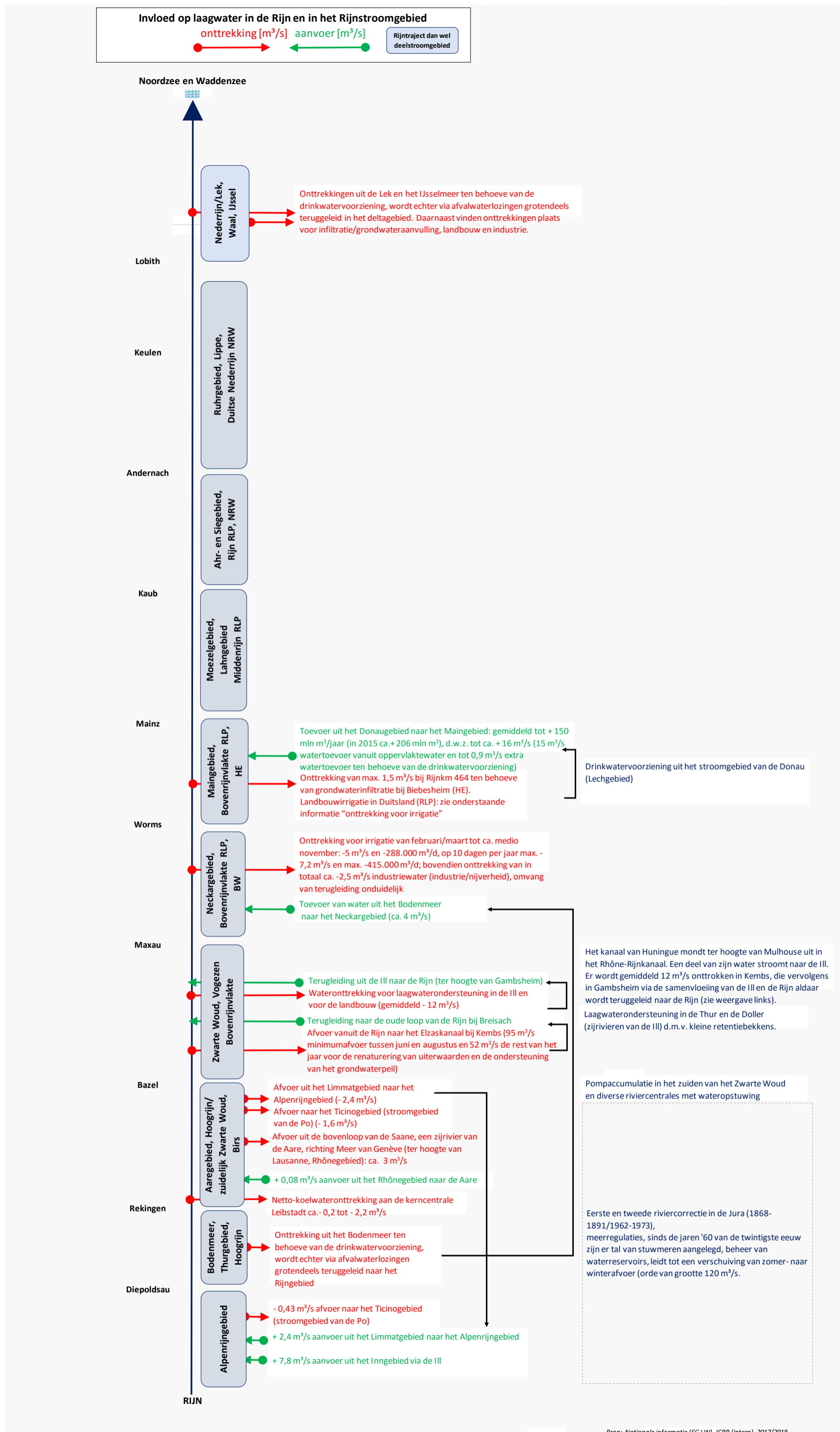
In figuur 3 worden de belangrijkste locaties aan de Rijn en in het Rijnstroomgebied waar af- dan wel aanvoer van water plaatsvindt schematisch weergegeven (bron: nationale informatie, ICBR (intern), 2017/2018). Het stroomgebied verliest ongeveer 2 m<sup>3</sup>/s door afvoer naar het Ticinogebied en ongeveer 3 m<sup>3</sup>/s door afvoer vanuit het Aaregebied naar het Rhônegebied. Echter, het Rijngebied wint bijna 8 m<sup>3</sup>/s door aanvoer vanuit het Inngebied. De onttrekking uit het Bodenmeer (ten behoeve van de drinkwatervoorziening) wordt na de monding van de Neckar grotendeels via afvalwaterlozingen weer teruggeleid naar de Rijn. In de noordelijke Bovenrijnvlakte wordt in bepaalde periodes op enkele locaties tot 6,3 m<sup>3</sup>/s onttrokken voor irrigatie en grondwaterinfiltratie. Via de Main komt er tot 15 m<sup>3</sup>/s vanuit het Donaugebied (water uit

de Donau en de Altmühl, opgeslagen hoogwater uit de Altmühl) naar de Rijn. Deze afvoer wordt gebruikt om in de Redniz, de Regnitz en de Main de afvoer te ondersteunen<sup>2</sup> en het laagwaterpeil te verhogen (zie figuur 4). Daarnaast wordt er vanuit winningsinstallaties aan de monding van de Lech nog tot 0,9 m<sup>3</sup>/s drinkwater naar het stroomgebied van de Main gevoerd. Tussen Mainz en Lobith doen zich geen significante af- of aanvoeren voor. Benedenstrooms Lobith begint de delta van de Rijn. De rivier splitst zich al snel in drie takken. Bij de Pannerdensche Kop splitst de Rijn zich in de Waal en het Pannerdensch Kanaal. Het Pannerdensch Kanaal gaat na enkele kilometers over in de Nederrijn en bij Arnhem splitst de IJssel zich van die rivier af. Nederrijn en Waal monden uiteindelijk uit in de Noordzee. De IJssel mondt uit in het IJsselmeer. Overtollig IJsselmeerwater wordt via sluizen op de Waddenzee geloosd.

De voorgenoemde waterstromen, vooral de onttrekking ten behoeve van irrigatie en de omleiding van water uit het Donau- naar het Rijngebied, doen zich niet allemaal tegelijkertijd voor en kennen ook geen gelijkmatig verloop, maar toch blijkt uit het overzicht dat de balans voor de Rijn over het geheel genomen positief uitvalt. Deze positieve balans moet nog worden aangevuld met de vanuit kwantitatief oogpunt veel belangrijkere ondersteuning van de laagwaterafvoer in de winter dankzij het beheer van waterreservoirs in het Alpengebied (zie hierboven).

---

<sup>2</sup> Opmerking: Er wordt niet alleen in laagwaterperiodes, maar het hele jaar door - in variabele hoeveelheden - water vanuit de Donau naar de Main gevoerd. Het doel van deze watertoevoer is onder meer om mogelijke nadelen voor de economische ontwikkeling in Franken te ondervangen (beschikbaarheid van genoeg water, daardoor ondersteuning van de waterkwaliteit).



Figuur 3: Belangrijkste locaties aan de Rijn en in het Rijnstroomgebied waar af- dan wel aanvoer van water plaatsvindt



Figuur 4: Systeem voor de toevoer van water vanuit de Donau naar de Main (StMUV, 2011)

### 6.3 Inventarisatie van de gevolgen van laagwater in de Rijn

Lage waterstanden en afvoeren zijn net zoals hoogwater onvermijdelijke, natuurlijke fenomenen. Als laagwater gepaard gaat met een sterke opwarming van het water, kan de daling van het zuurstoftransport (lage afvoeren gecombineerd met lage zuurstofconcentraties als gevolg van stijgende temperaturen) negatieve effecten hebben op het ecosysteem.

Lage afvoeren en waterstanden kunnen ook leiden tot beperkingen voor de scheepvaart op de Rijn en ervoor zorgen dat waterkrachtcentrales terug moeten in hun productie. De effecten van laagwater vallen uiteen in:

- effecten op de waterkwaliteit en de ecologie
- effecten op de gebruiksfuncties

In figuur 5 wordt een samenvatting gegeven van de verschillende gebruiksfuncties die kwalitatief of kwantitatief kunnen worden beïnvloed of benadeeld door laagwater.



Figuur 5: Vereenvoudigde weergave van de effecten van laagwater op de gebruiksfuncties van water (Arbeitskreis KLIWA, 2017)

Hoewel de gevolgen van laagwater kunnen verschillen tussen de regio's en de seizoenen, heeft de ICBR een inventaris opgesteld van de effecten van laagwater (bron: nationale informatie, ICBR (intern), 2017), die deels ook zijn opgenomen in het overzicht van de gevolgen van voorbije laagwatergebeurtenissen (vooral 2003 en 2011) (ICBR, 2004, 2006, 2012). De samenvatting van de European Drought Impact Inventory (EDII) van de effecten van het laagwater van 2003 en 2011 in het Rijnstroomgebied reflecteert de informatie die de landen in het kader van de ICBR over beide gebeurtenissen hebben aangeleverd (omvang, effecten, gevolgen, ...) (Kohn, 2017) (zie bijlage 1). Er wordt onder andere vastgesteld dat de effecten in 2003 intensiever en verstrekkender waren (ook in het stroomgebied) dan in 2011, toen de effecten beperkt bleven tot de Rijn (zie bijlage 1).

Van grensoverschrijdende relevantie voor de Rijn als internationale corridor zijn in het bijzonder het Verdrag inzake de onttrekking van water uit het Bodenmeer ten behoeve van de drinkwatervoorziening, de algemene effecten van het debiet van de Rijn op benedenstrooms gelegen gebieden en de scheepvaart.

### 6.3.1 Effecten op de waterkwaliteit en de ecologie

#### Waterkwaliteit

Laagwater dat zich in de zomer voordoet, gaat gepaard met verschillende aspecten die relevant zijn voor de waterecologie. De temperatuur is een belangrijke parameter voor de waterkwaliteit. Ze is bepalend voor de snelheid van alle chemische en biochemische processen, ze beïnvloedt de oplosbaarheid van stoffen en speelt een belangrijke rol in het behouden van het fysisch-chemische evenwicht in het water en in zelfreinigende processen (ICBR, 2013, 2015).

Hoe hoger de watertemperatuur, hoe minder goed zuurstof oplost in water en hoe groter de zuurstofbehoefte voor chemische en biologische processen. Deze twee tegengestelde effecten kunnen tijdens laagwaterperiodes crises doen ontstaan.

Als gevolg van de afgenomen verdunning bij lagere afvoeren stijgen de concentraties van stoffen uit het (gezuiverde) afvalwater vanuit puntbronnen (biologisch afbreekbare stoffen, nutriënten en schadelijke stoffen, evenals zouten en ziekteverwekkers). Echter, in periodes met meteorologische droogte of als neerslag in vaste vorm wordt opgeslagen, komt de ontbrekende afspoeling tot uitdrukking in een vermindering van diffuse emissies. In de **hoofdstroom** van de Rijn zijn er geen ernstige, lang aanhoudende, negatieve effecten op de waterkwaliteit waargenomen na laagwatergebeurtenissen.

Dankzij de consequente aanleg van installaties voor afvalwaterzuivering door gemeenten en industriebedrijven is de chemische verontreiniging de afgelopen decennia over het geheel genomen duidelijk verminderd. Kritische concentraties van schadelijke stoffen of zuurstof werden doorgaans niet bereikt. Deze in principe positieve balans werd bijvoorbeeld in 2003 ook ondersteund door het gebrek aan neerslag, waardoor er geen diffuse emissie vanuit het stroomgebied plaatsvond (o.a. erosie en afspoeling) en evenmin overstorten uit gemengde rioolstelsels. In 2003 waren er effecten die werden veroorzaakt door ontbrekende verdunning, zoals concentratietoenames, maar daarnaast leidden opwarming en intensieve zonbestraling ten minste in de Hoogrijn tot overmatige algenbloei. Er was sprake van zuurstofoververzadiging, als gevolg van de fotosyntheseactiviteit van de algen, en van biogene ontkalking (opvallende kalkuitscheidingen).

**Door stuwen gereguleerde zijrivieren** warmen door de lage stroomsnelheden sterker op, waardoor het als gevolg van de restbelastingen uit afvalwaterlozingen kan komen tot gespannen zuurstofomstandigheden. Bedreigd zijn vooral de gebieden direct benedenstrooms van afvalwaterlozingen. Dit bleek in 2003, toen er bijvoorbeeld lokale vissterfte werd waargenomen (zie hieronder).

Bij langdurige laagwaterperioden stijgt het risico op zoutindringing vanuit zee in het grond- en het oppervlaktewater, en op bodemdaling in de polders in het westen van Nederland. Ook kan verzilting een serieuze bedreiging vormen voor waterkwaliteit en -ecologie.

## Ecologie

Laagwater, dat door de mens als ernstig versturende en zorgwekkende gebeurtenis kan worden ervaren, is het hele jaar door voor een groot deel een natuurlijk proces dat kenmerkend en belangrijk is voor het ecosysteem van rivieren. Veel soorten hebben hier specifieke overlevings- en adaptatiestrategieën voor ontwikkeld. Echter, soorten die minder mobiel zijn, kunnen schade ondervinden als de kleine bovenloop van de rivier waarin ze hun habitat hebben uitdroogt (bijv. stroom- of parelmossels). Bij laagwater in de Rijn kunnen ecologisch waardevolle kribvakken en ondiepe zones buiten de vaargeul droogvallen of kan het mondingsgebied van zijrivieren worden losgekoppeld van de hoofdstroom. Hierdoor zijn belangrijke habitatstructuren (lommerrijke oevers die bescherming bieden tegen stroming) minder goed te bereiken of ondervinden vissen problemen bij de stroomopwaartse intrek in zijrivieren.

Qua ecologisch effect is de watertemperatuur waarschijnlijk echter relevanter. De mogelijkheden om op veranderingen in de watertemperatuur te reageren, zijn zeer beperkt. De temperatuur is voor planten en dieren een van de belangrijkste milieufactoren, want ze stuurt onder andere de voortplanting, groei, ontwikkeling en migratie. Van langdurig of zelfs permanent verhoogde watertemperaturen ondervinden vooral koudbloedige organismen effecten, zoals vissen en macrozoöbenthos, die geen eigen lichaamswarmte produceren, maar waarvan de lichaamstemperatuur zich aanpast aan de omgevingstemperatuur (ICBR, 2013, 2015, 2017). Bij hoge temperaturen stijgt hun energie- en zuurstofbehoefte, terwijl precies dan het O<sub>2</sub>-aanbod in het water daalt. De stofwisseling kan daarbij zo versneld worden dat de dieren niet meer genoeg voedsel vinden en hun vetreserves gaan aanspreken om het lichaam te voorzien van energie. Dit leidt tot stress en een grotere gevoeligheid voor ziektes.

In 2003 waren er als gevolg van de stijging van de watertemperaturen in combinatie met de verkleining van het leefgebied voornamelijk berichten over vis- en schelpdiersterfte (dit probleem is van de Duits-Franse Bovenrijn tot de Duitse deelstaat Noordrijn-Westfalen waargenomen bij de uitheemse korfmossel uit Azië).

In Zwitserland zijn er in 2003 massaal veel vlagzalmen bezweken in de Hoogrijn en de Untersee van het Bodenmeer. Tal van vissen zijn vanuit kleinere rivieren overgebracht naar een ander leefgebied. Ook zijn er in de Rijn in Zwitserland en Duitsland vrij veel palingen het slachtoffer geworden van de roodziekte. In Frankrijk zijn er in 2003, ondanks lokale vissterfte, geen verstrekkende negatieve effecten op de visfauna vastgesteld. In de Nederlandse wateren was er sprake van explosieve algenbloei (o.a. blauwalgen), overwoekering door waterplanten en botulisme (bij watervogels). De afgelopen jaren wordt er in de Rijn en zijn zijrivieren, geholpen door de antropogene gebruiksfuncties, een aanzienlijke verandering in de levensgemeenschappen waargenomen als gevolg van immigrerende exoten. Hogere watertemperaturen (vooral in de winter) kunnen voor bepaalde soorten de vestiging vergemakkelijken of een concurrentievoordeel bieden, waardoor hun populatie kan groeien. Er mag worden aangenomen dat de vooruitgang van deze soorten over het algemeen zal leiden tot een achteruitgang van de ecologische toestand conform KRW.

Echter, over het geheel genomen zijn ingrijpende en blijvende ecologische effecten (schade) bij afgelopen laagwatergebeurtenissen in het Rijngebied overal uitgebleven, dankzij de verbeterde waterkwaliteit en de veerkracht van de fauna en flora.



### 6.3.2 Effecten op gebruiksfuncties

De economische schade als gevolg van door laagwater ingegeven gebruiksbeperkingen kan deels maar moeilijk worden gekwantificeerd, maar afhankelijk van hoe lang de verstoring duurt, hoe groot het getroffen gebied is en welke regionale omstandigheden er heersen, kan er sprake zijn van negatieve effecten op de gebruiksfuncties en van grote economische schade (LAWA, 2007). Het Rijnstroomgebied wordt intensief gebruikt en veel actoren en gebruiksfuncties worden getroffen door uitgesproken laagwatersituaties, onder andere de watervoorziening, scheepvaart, energieproductie, industrie, landbouw, recreatie en veiligheid.

#### Watervoorziening

In droge periodes kunnen er lokale gebruiksrestricties en knelpunten in de drinkwatervoorziening ontstaan. Dit is in het bijzonder het geval in gebieden waar de watervoorziening voornamelijk is aangewezen op oppervlaktewater of ondiepe en/of gevoelige grondwaterbronnen. In sommige gebieden kunnen er afhankelijk van de ernst van de laagwatersituatie tijdelijk beperkingen worden opgelegd aan het gebruik van oppervlakte- en grondwater. Deze beperkingen hebben onder meer betrekking op het beregenen van tuinen en parken, het irrigeren of beregenen van landbouwgewassen en het onttrekken en lozen van water door bepaalde energiecentrales en industriebedrijven. In Nederland treedt verzilting van het oppervlaktewater als gevolg van zoutindringing vanuit zee op. Dit kan leiden tot stopzetting van de drinkwaterinname of de waterinname voor landbouwgebruik. De zoete rivierafvoer wordt normaal gesproken als natuurlijke barrière tegen zoutindringing gebruikt. Echter, bij laagwater is er niet altijd genoeg zoet water om deze zoutindringing tegen te houden, en dringt het zoute water verder oostwaarts/landinwaarts. Hierbij kunnen kritische functies, zoals onder andere drinkwaterinname, onder druk komen te staan (Beijk, 2017).

#### Scheepvaart

De scheepvaart (binnenvaart op de Rijn en zijn zijrivieren) is een van de meest getroffen, grensoverschrijdende gebruiksfuncties bij laagwatersituaties. Bij lage waterstanden heeft de scheepvaart te lijden onder ernstige restricties, in vrij afstromende rivieren bijvoorbeeld omdat de vaargeul minder diep en breed is. Dit betreft ook gestuwde zijrivieren en kanalen, zij het in mindere mate. Bij extreem lage afvoeren is het bijvoorbeeld mogelijk dat de werking van sluizen niet meer voor 100% kan worden gewaarborgd. Als gevolg van het voorgaande kan er minder lading worden vervoerd via de binnenvaart, wat meerdere nadelige, economische gevolgen heeft. Zo daalt het totale vervoersvolume van de binnenvaart en treden er verschuivingen op tussen de verschillende vervoersmodaliteiten (het marktaandeel van de scheepvaart neemt af als gevolg van concurrentienadeel). Ook stijgen de kosten voor de scheepvaartbedrijven als hun vloot niet optimaal kan worden ingezet (met name de grotere schepen). Een belangrijk sterk punt van de binnenvaart - het economisch voordeel van een groot laadvermogen - wordt bij laagwater voor een belangrijk deel buiten werking gesteld.

Naast de vrachtscheepvaart kunnen ook passagiersschepen (zie ook onder "Toerisme, vrije tijd, recreatie") en veerboten getroffen worden, omdat zij als gevolg van de lage waterstand eventueel ook hun aanlegplaats niet meer kunnen bereiken.

#### Energieproductie

Door de lage afvoer kan er automatisch minder energie worden opgewekt in de waterkrachtcentrales langs de rivier. Omdat warmtelozingen (uit koel- en industriewater) op de wateren aan restricties onderhevig zijn, moeten sommige energiecentrales (kerncentrales, kolencentrales, enz.) hun productie terugschroeven. Door bijzondere vergunningen kan de lozingsnorm tijdelijk worden verruimd, wat zorgt voor warmere lozingen en daarmee een hogere mengtemperatuur in het oppervlaktewater dan in normale bedrijfsomstandigheden.

## Industrie

Laagwater kan ook gevolgen hebben voor de verwerkende industrie en nijverheid, hetgeen ernstige schade kan berokkenen aan de economie.

Als laagwaterperiodes langer aanhouden, kunnen er als gevolg van beperkingen in de scheepvaart (zie hiervoor de paragraaf "Scheepvaart") knelpunten dreigen in de voorziening met bijv. kolen, vloeibare minerale olieproducten (zoals stookolie en brandstoffen), ertsen en agrarische grondstoffen.

## Landbouw

Kleine neerslaghoeveelheden en door hoge temperaturen veroorzaakte toegenomen verdamping kunnen negatieve gevolgen hebben voor de landbouw. In 2003 is het onttrekken van water uit kleinere rivieren bijv. op regionaal niveau beperkt of verboden, wat sporadisch conflicten heeft doen ontstaan tussen de overheid en de landbouwsector. Naast forse productie- en opbrengstverliezen in de plantenteelt (bijv. verbouw van voedergewassen, graan en groenten) kunnen er ook gunstige voorwaarden voor de wijnbouw ontstaan (wijnen van goede kwaliteit, maar in kleinere hoeveelheden). In 2011 dreigden door hoge chloridegehalten in het water als gevolg van verzilting verminderde oogstopbrengsten in het westen van Nederland, en om bodemdaling en verzilting te voorkomen moest het water in de polders op peil worden gehouden.

## Toerisme, vrije tijd, recreatie

Op het vlak van toerisme, vrije tijd en recreatie hebben droogte en laagwater zowel negatieve als positieve gevolgen. Ecologische gevolgen voor de visstand (zie paragraaf 6.3.1) verkleinen de opbrengst van de beroepsvisserij, de sport- en recreatieve visserij. In afzonderlijke gevallen kan toerisme ook het beheer van waterreservoirs beperken. Zo kan er bijvoorbeeld maar zo lang water vanuit de Altmühl in Beieren naar de Main worden gevoerd (zie figuur 4) als er in het Altmühl-, Brombach- en Rothmeer nog genoeg water is voor toeristische doeleinden.

Voor privé- en passagiersschepen gelden de restricties zoals genoemd in de paragraaf "Scheepvaart". Echter, als een laagwaterperiode gepaard gaat met warm weer, kan het toerisme er (lokaal) ook van profiteren. In 2003 was de pleziervaart op de Hoogrijn en de Untersee weliswaar beperkt, maar over het geheel genomen waren er dankzij het mooie weer meer passagiers. In Duitsland konden passagiersschepen voor de lange afstand bij momenten niet varen, maar passagiersschepen die korte afstanden afleggen zagen het aantal reizigers toenemen. Drooggevallen rivieren en stuwmeren kunnen ook aantrekkelijk zijn voor dagjesmensen ("laagwatertoerisme", LAWA, 2007). Echter, vooral in kleinere wateren kan de kwaliteit van het zwemwater te lijden hebben onder hoge concentraties schadelijke stoffen en de ontwikkeling van blauwalgen (cyanobacteriën), wat lokaal een bedreiging kan vormen voor de volksgezondheid (in verband met zwemmen en andere watergebonden recreatie).

## Veiligheid (in het bijzonder van infrastructuur en voorzieningen (voor de bescherming tegen overstromingen))

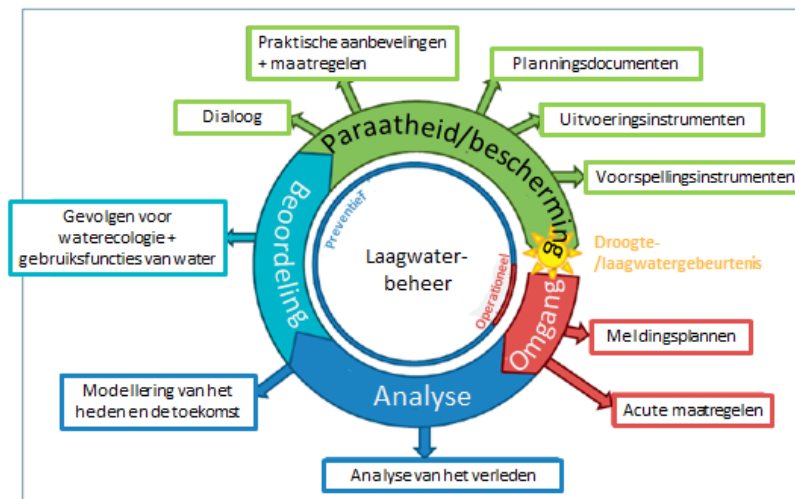
Vooral in Nederland vormt de instabiliteit van veenkades (waterkeringen) bij lage waterstanden een probleem. Veenkades komen vooral voor in het Utrechts Hollandse veenweidegebied, Noord-Holland, Friesland en Groningen. In totaal gaat het om zo'n 3.500 kilometer veenkade. In augustus 2003 zijn op twee locaties veenkades verschoven en doorgebroken, waardoor water laaggelegen polders is binnengestroomd (bij Wilnis kwam er tot 40 centimeter water in woningen te staan).

Om bodemdaling en verzilting in Nederland te voorkomen, moest het water in de polders ook in 2011 op peil worden gehouden.

In Duitsland kwamen in 2011 als gevolg van het laagwater enkele bommen uit de Tweede Wereldoorlog aan het licht in de Rijn. De projectielen zijn geborgen en onschadelijk gemaakt.

## 6.4 Nationaal laagwaterbeheer

De informatie in het onderhavige hoofdstuk is gebaseerd op een opvraging bij de landen in het Rijnstroomgebied en op rapporten over voorbije gebeurtenissen (ICBR (intern), 2017). De landen hebben verschillende maatregelen en toolboxes ontwikkeld. Duurzaam laagwaterbeheer omvat zowel preventieve als operationele maatregelen (zie figuur 6) (BY-LfU, 2016; Wahliß, 2017). Met preventieve benaderingen en maatregelen tegen laagwater wordt voorkomen dat laagwater ontstaat en worden de effecten van laagwater op lange termijn verminderd. Operationeel laagwaterbeheer zet in op maatregelen die op korte termijn effect sorteren en in acute laagwatersituaties kunnen worden genomen. Het voorgaande valt in principe uiteen in vier actieterreinen: analyse van voorbije en toekomstige laagwatergebeurtenissen, beoordeling van de effecten van deze gebeurtenissen op gebruiksfuncties van water, preventie/bescherming tegen toekomstige gebeurtenissen en maatregelen voor de omgang met een concrete laagwatergebeurtenis.



Figuur 6: Cyclus van het laagwaterbeheer en bijbehorende actieterreinen (BY-LfU, 2016; Wahliß, 2017)

### 6.4.1 Monitoring, verwachting, informatie en waarschuwing

Laagwaterbeheer vergt een brede informatiebasis: van monitoringgegevens, over informatie- en waarschuwingsdiensten voor de inschatting van de actuele situatie tot verwachtingen van de verdere ontwikkeling.

**Monitoring, modellen en verwachting:** De regionale en nationale laagwatermonitoring gebeurt in principe op basis van een netwerk van meetpunten waar de waterstand wordt gemeten en vervolgens omgerekend naar een afvoerwaarde. De twee hydrologische parameters waterstand en afvoer worden met een temporele resolutie van 5 minuten (Zwitserland), 10 minuten (Nederland) of tot 15 minuten (Duitsland, Luxemburg) geregistreerd. Niet-hydrologische parameters die afhankelijk van de meetlocatie in verschillende tijdsresoluties worden gemeten, zijn onder meer de watertemperatuur en de waterkwaliteit.

Een groot deel van de landen publiceert voor de hoogwaterrelevante meetpunten ook buiten hoogwaterperiodes elke dag minstens een waterstandsverwachting, wat betekent dat automatisch ook laagwatersituaties zijn inbegrepen (zie details in kader hieronder). Met behulp van waterhuishoudingsmodellen worden afvoerverwachtingen gegenereerd voor de rivieren in kwestie en in Duitsland deels ook watertemperatuurverwachtingen. In Zwitserland bestaan hiervoor verschillende modellen. In Duitsland wordt door Rijnland-Palts, Baden-Württemberg en Hessen LARSIM en door de BfG WAVOS gebruikt. Beieren gebruikt aan de Main niet LARSIM, maar SOBEK. In Frankrijk wordt in enkele centrales gebruik gemaakt van hoogwatermodellen en in Luxemburg en Nederland wordt er gewerkt met meteorologische en waterhuishoudingsmodellen. In Nederland worden er dagelijks verwachtingen opgesteld en gepubliceerd, bij belangrijke laagwatergebeurtenissen wordt er een weekbericht verstuurd.

Voor lage grondwaterstanden bestaan er alleen conceptmethodes, maar geen operationele modellering. Bij de monitoring in Beieren (Laagwaterinformatiedienst - NID, zie details hieronder) wordt een onderscheid gemaakt tussen ondiepe en diepe meetlocaties. De ondiepe meetlocaties laten ook kortstondige schommelingen zien en leveren indicaties op over de watervoorraad die in droge periodes beken en rivieren voedt. De diepe meetlocaties geven veeleer schommelingen op lange termijn weer.

Op EU-niveau kan in dit verband het European Drought Observatory (EDO) worden genoemd (Cammalleri/JRC, 2017). De website van het EDO bevat informatie die relevant is voor droogte, zoals bijv. kaarten van indicatoren die zijn afgeleid uit verschillende gegevensbronnen (bijv. neerslagmetingen, satellietmetingen, met modellen berekend bodemvocht). De informatie kan worden geanalyseerd met verschillende tools en bij dreigende droogte verschijnen er "Drought News"-berichten waarin een overzicht wordt gegeven van de situatie.

Hoewel langetermijnverwachtingen of -prognoses relevant zouden zijn voor verschillende gebruiksfuncties (bijv. de scheepvaart), blijven ze een grote uitdaging. In het Rijnstroomgebied bevinden desbetreffende projecten zich nog steeds in de testfase en vanuit technisch oogpunt zijn ze beperkt. Voor laagwaterbeheer zijn er langere prognoseperiodes nodig dan voor overstromingsbeheer. In het kader van het gezamenlijke CHR-symposium hebben wetenschappers en gebruikers hierover overleg gepleegd (CHR, 2017). Daarbij zijn er interessante bijdragen voorgesteld, zoals een statistische benadering voor maand- en seizoensprognoses van (laag-)waterstanden in de Rijn op basis van hydrologische, atmosferische en oceanische gegevens (toegepast door de BfG om prognoseproducten op maand- en seizoensbasis te ontwikkelen voor de Duitse waterwegen) (Ionita-Scholz, 2017). Ook is het "Hydrological Ensemble Prediction System" (HEPS) gepresenteerd, dat sinds 2015 wordt gebruikt voor maandelijks ensembleverwachtingen voor laagwater. In Zwitserland bemoeilijken de topografie en kleine omvang van de stroomgebieden het opstellen van langetermijnverwachtingen zodanig dat in dit verband werd opgemerkt dat "prognoses van meer dan 32 dagen vooruit neerkomen op een wilde gok" (Zappa et al., 2017).

### **Waarschuwingmeldingen en laagwaterberichten (ook voor bewustzijnsvorming en preventie):**

In Duitsland krijgt deze taak in elke deelstaat een eigen invulling. Voorbeelden hiervan uit Beieren zijn de "Laagwaterinformatiedienst" - beschikbaar voor waterbeheerders, zodat die vroegtijdig kunnen reageren, en voor het publiek - en het "Ecologische Alarmplan Main" (AMÖ) - om snel te waarschuwen in geval van laagwater en om schadelijke gevolgen voor de waterecologie zo mogelijk te voorkomen (BY-LfU, 2016; Regering van het Duitse district Unterfranken, 2012; Wahliß, 2017). In de hydrologische jaarverslagen (BfG, Duitse deelstaten) wordt doorgaans specifiek ingegaan op voorbije (ernstige) gebeurtenissen.

In Luxemburg worden waarschuwingen uitsluitend in de vorm van persberichten en situatierapporten uitgegeven. Er zijn geen waarschuwingniveaus, alleen acties die worden aanbevolen op basis van expert judgement.

In Frankrijk zijn er voor het oosten van het land (Rijn-/Maasgebied) alarm- en waarschuwingdrempels vastgesteld om de hydrologische situatie te beoordelen. Indien nodig worden er prefectorale decreten uitgevaardigd op grond waarvan het gebruik van water wordt beperkt of stopgezet. De overheid geeft regelmatig berichten uit waarin de situatie wordt geëvalueerd ten opzichte van verschillende drempelwaarden. Daarnaast bestaat er voor het gehele grondgebied van Europees Frankrijk een website voor het brede publiek waar alle geldende maatregelen voor de beperking of stopzetting van het watergebruik op een rij worden gezet (Propluvia).

In Zwitserland wordt er nog gewerkt aan een nationaal waarschuwingssysteem, maar in de zogenaamde hydrologische berichten, die twee keer per week worden uitgegeven,

wordt er gewezen op eventuele laagwatersituaties. Informatie over laagwater wordt ook gepubliceerd op de kantonale websites en op [www.drought.ch](http://www.drought.ch).

In Nederland is de Landelijke Coördinatiecommissie Waterverdeling (LCW) bevoegd voor het versturen van berichten en waarschuwingen; er zijn landelijke en regionale droogteberichten en verder gebeurt er dagelijkse waterberichtgeving voor de scheepvaart.

**Laagwaterverwachting en -berichten in de verschillende landen (bron: inventarisatie en informatie van de centrales voor hoogwaterverwachting aan de Rijn; op basis van ICBR, 2016 (intern)):**

- In Zwitserland worden afvoerverwachtingen op de website van het BAFU gepubliceerd (zie [hier](#)). Specifieke droogteverwachtingen verschijnen op een speciaal daarvoor ontwikkelde pagina ([www.drought.ch](http://www.drought.ch), informatieplatform voor de vroegtijdige detectie van droogte in Zwitserland).
- In Frankrijk wordt er bij gelegenheid gebruik gemaakt van modellen voor laagwaterverwachting. Tijdens de periode waarin de kans op laagwater het grootst is (normaal gesproken van mei t/m september) voert de DREAL Oost-Frankrijk een wekelijkse monitoring uit van de hydrologische situatie in de rivieren. Als een minimale drempelwaarde voor de afvoer niet meer wordt bereikt, stuurt DREAL Oost-Frankrijk situatieberichten naar verschillende actoren. Daarnaast stelt EDF eigen laagwaterverwachtingen op om de veiligheid van zijn installaties te garanderen, milieustandaarden na te leven, de watervoorraad beter te beheren en de productie van de energiecentrales te optimaliseren (Puygrenier en Antheaume, 2017).
- Duitsland:
  - BfG / Water- en scheepvaartadministratie (WSV): Voor de Rijn benedenstrooms van Worms dagelijkse verwachting van de waterstand bij laagwater. Gebaseerd op WAVOS, een systeem voor waterstandsverwachtingen dat zowel wordt gebruikt voor verwachtingen van de laagwater- en gemiddelde waterstand als voor hoogwaterverwachtingen, en dat in meerdere stroomgebieden operationeel is. In de late herfst, als de laagwaterfrequentie toeneemt, heeft er iemand bereikbaarheidsdienst. Verwachtingen voor onder meer de scheepvaart (Duitsland, Nederland): ELWIS.
  - BW: Dagelijks nieuwe (laagwater)verwachtingen voor de Rijn van Konstanz tot Mannheim en voor de belangrijkste zijrivieren van de Rijn (LARSIM). Daarnaast publicatie van een no rain-verwachtingsvariant om te laten zien wat er gebeurt als er de volgende zeven dagen geen neerslag valt.
  - HE, RLP: Laagwaterverwachtingen voor zijrivieren met behulp van LARSIM.
  - BY: Er worden dagelijks verwachtingen opgesteld (ook voor de Main) en gepubliceerd op de website van de hoogwaterberichtendienst (HND) van de Dienst voor Milieu van de deelstaat Beieren.
  - NRW: Niet echt een verwachting, maar wel bijzondere aandacht voor winterse neerslag (belangrijk voor de aanvulling van het grondwater).
- In Nederland zijn berichten en verwachtingen gebaseerd op modelvoorspellingen waarin weersverwachtingen zijn verwerkt. In Nederland is het WABES-model in ontwikkeling. Hiermee worden mede op basis van meteorologisch verwachtingen en klimaatontwikkeling langetermijnvoorspellingen gedaan voor de laagwatersituatie om gebruikers inzicht te geven in de waterbeschikbaarheid op voor hen relevante locaties in het hoofwatersysteem. Voor de operationele monitoring en laagwaterberichtgeving (o.a. ten behoeve van de scheepvaart) worden de RWsOS-modellen gebruikt.
- In Luxemburg worden er op zich geen laagwaterverwachtingen opgesteld. De bedoeling is om het verwachtingsmodel LARSIM in de toekomst ook te gebruiken in laagwatersituaties, teneinde een inschatting te kunnen geven van de laagst mogelijke afvoer in de verwachtingsperiode als neerslag uitblijft. Dan zal er een specifieke meldingsdienst worden geactiveerd en zullen er situatierapporten worden verstuurd. Echter, hiervoor moeten het model en de procedure worden aangepast.

#### 6.4.2 Operationeel beheer en maatregelen

De landen werken op basis van **verschillende wet- en regelgeving**:

- Op nationaal niveau bestaat in Duitsland de Wet op de waterhuishouding, in Frankrijk de Milieuwet en de Nationale rondzendbrieven over laagwatergebeurtenissen en in Nederland de Waterwet, het Deltaprogramma en de Deltabeslissingen.
- Op regionaal niveau krijgen deze wetteksten een specifieke invulling per deelstaat, kanton, departement of waterschap in Duitsland, Zwitserland, Frankrijk of Nederland.

De EU-landen in het Rijnstroomgebied zijn ertoe verplicht om de KRW nationaal te implementeren. In dit verband worden stroomgebiedbeheerplannen (SGBP'n) opgesteld die ook ingaan op de problematiek van laagwater.

Voor de **planning en vaststelling van laagwaterbeheersmaatregelen** zijn in Zwitserland de kantons bevoegd (o.a. totstandbrenging van watervoorzieningsplannen), in Duitsland de deelstaten (SGBP, regionale ontwikkelingsplannen), in Luxemburg het nationale bestuur (SGBP, noodplan voor drinkwatervoorziening), in Frankrijk de departementen (kaderdecreten waarin per meetpunt de volgende actiefasen zijn gedefinieerd en gerelateerd aan drempelwaarden: waakzaamheid, waarschuwing, versterkte waarschuwing/alarm, crisis) en in Nederland het Rijk, de Provincies en de waterschappen (op nationaal en regionaal niveau: Nationaal Waterplan, SGBP, ontwikkelingsplan, waterbeheerplannen).

De **planning en organisatie van het (crisis)beheer** (afstemming/besluitvorming voorafgaand aan een droge periode of laagwatergebeurtenis) gebeurt in de landen aan de Rijn voornamelijk op regionaal niveau (kantons, deelstaten, departementen/gewesten, waterschappen), maar in Luxemburg, Nederland en Frankrijk ook op nationaal niveau (als er sprake is van een zeer grote gebeurtenis) door de vorming van centrale coördinatiecellen. Hier spelen verschillende actoren een rol, zoals bijv. droogtecomités en regionale droogteoverleggen. In de besluitvormings- of adviesgroepen en in hun plannen worden procesafspraken gemaakt over de **prioritering** van (gebruiks)functies, die tijdens een droge periode of laagwatergebeurtenis worden beperkt of moeten zijn gegarandeerd. Voorbeelden:

- In de Franse kaderdecreten zijn vier niveaus vastgelegd: de waakzaamheidsfase (bewustmakingsmaatregelen), de waarschuwingsfase (beperkende maatregelen), de alarmfase (extra beperkingen) en de crisisfase (niet-prioritaire onttrekkingen worden stopgezet). De prioriteiten zien er samengevat als volgt uit (vergelijkbaar met de situatie in Luxemburg): eerst de drinkwatervoorziening, dan de economische en recreatieve gebruiksfuncties.
- In Nederland is het de LCW die adviseert over maatregelen om het beschikbare water te verdelen. Dit gebeurt op basis van de landelijke verdringingsreeks (zie figuur 7), waarin is bepaald welke watergebruiker voorrang krijgt in tijden van droogte (de categorie met de hoogste prioriteit is veiligheid, bijv. dijken, en onomkeerbare schade aan natuur). Verder zijn er in Nederland vier fasen in de crisisvoorbereiding en het crisisbeheer (regulier werk (normaal beheer), dreigende watertekorten, feitelijk watertekort, (dreigende) watercrisis (cruciale functie in gevaar)).



Figuur 7: Nationale verdringingsreeks Nederland (MVW, 2009a, 2009b)

## Operationele waterbeheersmaatregelen (inclusief waterverdeling)

(zie deels ook hoofdstuk 6 en figuur 3)

Naast de voorlichting en bewustmaking van het publiek en de gebruikers (ook over preventief/verantwoordelijk handelen en zuinig omgaan met de watervoorraad) wordt een reeks van maatregelen in alle landen toegepast: in werking stellen van kleinschalige wateraanvoer, (drink)waterverdeling, specifieke maatregelen om de afvoer te ondersteunen en het grondwater aan te vullen en diverse gebruiksrestricties. Kritische functies worden gedetailleerd beschreven in hoofdstuk 6.3.2. In principe kunnen niet alle laagwatergevolgen met (operationele) waterbeheersmaatregelen worden gecompenseerd of opgelost.

### **Uitweiding: Laagwaterbeheer en lokale waterschaarste in Zwitserland (Zahner, 2017):**

De Zwitserse methode voor laagwaterbeheer bestaat uit drie modules, twee preventieve en één voor het beheer (van crises) op korte termijn. In de eerste module worden risicogebieden aangewezen. Het eindproduct van deze module bestaat uit referentiekaarten voor waterschaarste. In module 2 draait alles rond het beheer van de watervoorraad op lange termijn (strategische planning). Module 3 is een toolbox om sturing te geven aan het restrisico. Ze bevat maatregelen om conflicten tussen gebruiksfuncties op te lossen en om schade voor gebruikers en de ecologie te voorkomen.

## 7. Onderzoek naar historische meetreeksen van meetpunten aan de Rijn

### 7.1 Gedrag van laagwaterparameters op lange termijn

Het onderzoek start met een analyse van de markante laagwatergebeurtenissen in de afgelopen honderd jaar (1914-2015). Anders dan hoogwatergebeurtenissen, die zich zelden in het gehele Rijnstroomgebied en op alle Rijntrajecten voordoen, is een van de kenmerken van laagwatergebeurtenissen dat ze het stroomgebied als geheel treffen. Laagwatergebeurtenissen zijn gebonden aan lang aanhoudende en over grote gebieden heersende weersituaties, en komen zodoende in de regel langs de gehele Rijn tot uitdrukking. In de bovengenoemde periode (1914-2015) hebben er zich in 17 jaren in totaal 21 laagwatergebeurtenissen voorgedaan. Voor de statistische classificatie van de herhalingstijd van de laagwaterafvoer en de laagwaterduur is de referentieperiode 1961-2010 gebruikt, die aansluit bij de huidige omstandigheden. Door deze benaderingswijze lijken de herhalingstijden van de gebeurtenissen in de eerste helft van de twintigste eeuw "overdreven": ze geven de situatie weer die zou gelden als de gebeurtenissen nu optraden. Als gevolg hiervan kan de omvang van de laagwatergebeurtenissen relatief worden vergeleken ten opzichte van huidige omstandigheden. In tabel 2 zijn de ranges van herhalingstijden voor het traject van Bazel tot Lobith weergegeven. De meetpunten Diepoldsau en Rekingen zijn onderhevig aan het nivale afvoerregime, hier doen laagwatergebeurtenissen zich veelal op een ander tijdstip in het jaar voor dan op de andere meetpunten. In de beschrijving van de afzonderlijke laagwaterjaren zijn de herhalingstijden gedetailleerd per meetpunt.

In principe is zichtbaar dat de extreme historische laagwatergebeurtenissen zich in de jaren twintig en veertig van de vorige eeuw hebben voltrokken. Laagwater treedt voornamelijk in de herfst- en de wintermaanden op. Bij de zeldzamere, maar wat de afvoer betreft minder extreme zomergerbeurtenissen (1976, 2003 en 2006) kan er sprake zijn van problemen met tegelijkertijd erg hoge watertemperaturen. In de referentieperiode hebben er zich in 1962/1963 en 1971/1972 geprononceerde laagwatergebeurtenissen voorgedaan, daarna nemen de gebeurtenissen duidelijk af in omvang, met uitzondering van het laagwater in 2003. Speciale aandacht verdienen bovendien de laagwaterjaren 1921 en 1976, die elk drie gebeurtenissen tellen, waarbij ook hier geldt dat de gebeurtenissen in 1976 veel kleiner zijn. De zomergerbeurtenissen in 2003 en 2006 waren verbonden met zeer hoge watertemperaturen, terwijl de afvoeren in 2006 geen bijzondere laagwatersituatie vormden.

Tabel 2: Overzicht van de laagwatergebeurtenissen in de Rijn van 1920 t/m 2015 met vermelding van de herhalingsjijd (statistische kans van optreden) van de laagste afvoer "NM7Q" en de maximale duur van de onderschrijding "MaxD" < MNM7Q (meetpunten Rekingen tot Lobith)

Laagwater-gebeurtenis		Afvoer Herhalingsjijd [a] NM7Q	Duur Herhalingsjijd [a] MaxD	Opmerking
nov/dec	1920	15-100	15-50	
mrt-mei	1921	15-100	50-100	
sep/nov	1921	5-100	5-100	
nov/dec	1921	20-100	10-15	
okt/nov	1943	10-20	5-20	
aug-nov	1947	40-100	20-100	
jul-nov	1949	10-100	20-100	
sep53-jan54	1954	15-100	20-50	
sep-dec	1959	15-55	10-100	
okt-dec	1962	15-70	40-75	
jan-mrt	1963	20-65	15-50	
okt/nov	1971	20-35	10-35	
okt/nov	1972	10-35	5-20	
jul	1976	2-15	2-5	
aug/sep	1976	2-5	2-10	
okt/nov	1976	2-5	2-10	
okt/nov	1985	5-15	5-10	
aug-/sep	2003	5-35	5-30	hoge watertemperatuur
jul	2006	< 2	< 2	hoge watertemperatuur
nov-dec	2011	5-10	5-10	
okt/nov	2015	2-10	2-20	
		<b>Binnen de referentieperiode van de statistische classificatie</b>		
		<b>Extreme gebeurtenissen</b>		
		<b>Jaren met meerdere laagwatergebeurtenissen</b>		



In het overzicht van de afvoerkengetallen op de onderzochte meetpunten (voor de referentieperiode 1961-2010) dat is weergegeven in tabel 3 en 4 wordt het belang van de (laagwater)afvoer op het meetpunt Bazel voor alle benedenstrooms gelegen meetpunten duidelijk. Tussen het meetpunt Rekingen en het meetpunt Bazel is er sprake van meer dan een verdubbeling van de afvoer als gevolg van de monding van de Aare. Zowel de afvoer bij gemiddelde waterstand (1.065 m<sup>3</sup>/s) als de gemiddelde laagwaterafvoer (508 m<sup>3</sup>/s) op het meetpunt Bazel zijn op het meetpunt Worms nog goed voor ongeveer 75% van de afvoer, op het meetpunt Kaub gaat het om ongeveer 60% en in de Duitse Nederrijn nog altijd om ongeveer 50%.

Tabel 3: Kengetallen van de gemiddelde afvoer en de laagwaterafvoer op meetpunten aan de Rijn

Afvoerkengetallen op verschillende meetpunten aan de Rijn				
	Periode 1961-2010 (hydrologisch jaar)			
[m <sup>3</sup> /s]	MQ	MNQ	MNM7Q	NQ
Diepoldsau	233	72	92	41
Rekingen	445	232	238	134
Bazel	<b>1.065</b>	<b>508</b>	<b>527</b>	<b>319</b>
Maxau	1.255	618	645	373
Worms	1.431	694	720	400
Mainz	1.671	824	850	501
Kaub	1.713	824	851	525
Andernach	2.115	967	998	622
Keulen	2.175	999	1.028	644
Lobith	2.287	1.066	1.095	665

Tabel 4: Procentueel aandeel van de afvoer van het meetpunt Bazel

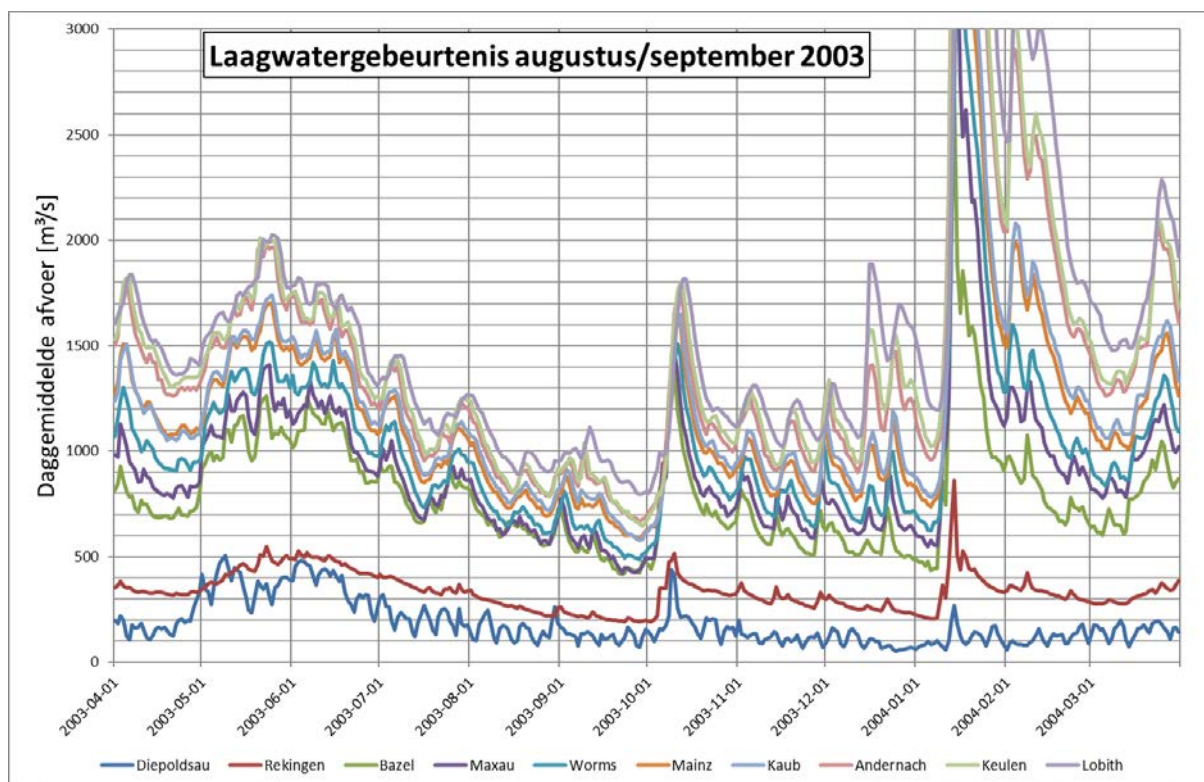
Procentueel aandeel van de afvoer van het meetpunt Bazel				
	Periode 1961-2010 (hydrologisch jaar)			
[% van Bazel]	MQ	MNQ	MNM7Q	NQ <sup>3</sup>
<b>Bazel</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
Maxau	85	82	82	86
Worms	74	73	73	80
Mainz	64	62	62	64
Kaub	62	62	62	61
Andernach	50	53	53	51
Keulen	49	51	51	50
Lobith	47	48	48	48

Als gevolg van het nivale afvoerregime in het Alpengebied is de laagwaterafvoer daar het laagst in de winter (neerslag is gebonden in de vorm van sneeuw) en het hoogst na het smelten van de sneeuw in de zomer. Het grote aandeel afvoer uit gebieden met een nivaal regime ondersteunt de afvoer in de Rijn tot in de zomer, ook in de benedenstrooms gelegen zone met een pluviaal afvoerregime (in het stroomgebied van de zijrivieren doet laagwater zich voornamelijk in de zomer voor).

<sup>3</sup> NQ is de laagste waarde over de periode 1961-2010. De berekende verhouding ten opzichte van de NQ op het meetpunt Bazel kan voor de verschillende stations uit verschillende jaren afkomstig zijn en hoeft niet overeen te komen met het jaar van de NQ-waarde op het meetpunt Bazel. Tijdens een concrete laagwatergebeurtenis ontstaan er afwijkende verhoudingswaarden en het relatieve afvoeraandeel van het meetpunt Bazel kan in het bijzonder bij laagwatergebeurtenissen in de zomer duidelijk groter zijn.

Om het laagwaterverloop en de hydrologische voorgeschiedenis verder te analyseren en in beeld te brengen, is er voor alle historische laagwatergebeurtenissen een figuur met de afvoergolven op de onderzochte meetpunten gemaakt. In figuur 8 zijn de afvoergolven van de laagwatergebeurtenis in augustus en september 2003 weergegeven. De figuren van alle gebeurtenissen zijn samen met de parameters en herhalingstijden van de gebeurtenissen opgenomen in gegevensbladen voor de extreme gebeurtenissen (zie hoofdstuk 7.5 en bijlage 2).

In figuur 8 laat de onderste (blauwe) curve voor het meetpunt Diepoldsau een verloop zien dat duidelijk afwijkt van dat van de andere afvoergolven. Het meetpunt Diepoldsau is enerzijds representatief voor een nivaal afvoerregime dat wordt gekenmerkt door sneeuwreserves en sneeuwsmelt, en is anderzijds sterk onderhevig aan antropogene invloeden door retentieactiviteiten en waterkrachtcentrales die de afvoer uitstellen. De eerstvolgende afvoergolf van het meetpunt Rekingen vertoont een evenwichtiger verloop, en sluit vooral aan bij de seizoensontwikkeling van de afvoer vanuit het Bodenmeer. De andere afvoergolven vanaf het meetpunt Bazel lijken onderling meer op elkaar en laten duidelijker de invloed van neerslaggebeurtenissen zien. Het sterk gelijkende verloop gedurende met name de laagwaterperiode in augustus en september resulteert uit het grote afvoeraandeel uit het (Voor-)Alpengebied op het meetpunt Bazel, hetgeen ook op de benedenstreams gelegen meetpunten nog doorwerkt en zelfs op het meetpunt Lobith nog een bijdrage van ca. 50% levert aan de totale afvoer. De laagwatergebeurtenis ontwikkelde zich met korte, door neerslag veroorzaakte onderbrekingen vanaf juli 2003, bereikte zijn laagste afvoeren eind september 2003 en werd begin oktober 2003 opgevolgd door een duidelijke afvoergebeurtenis.

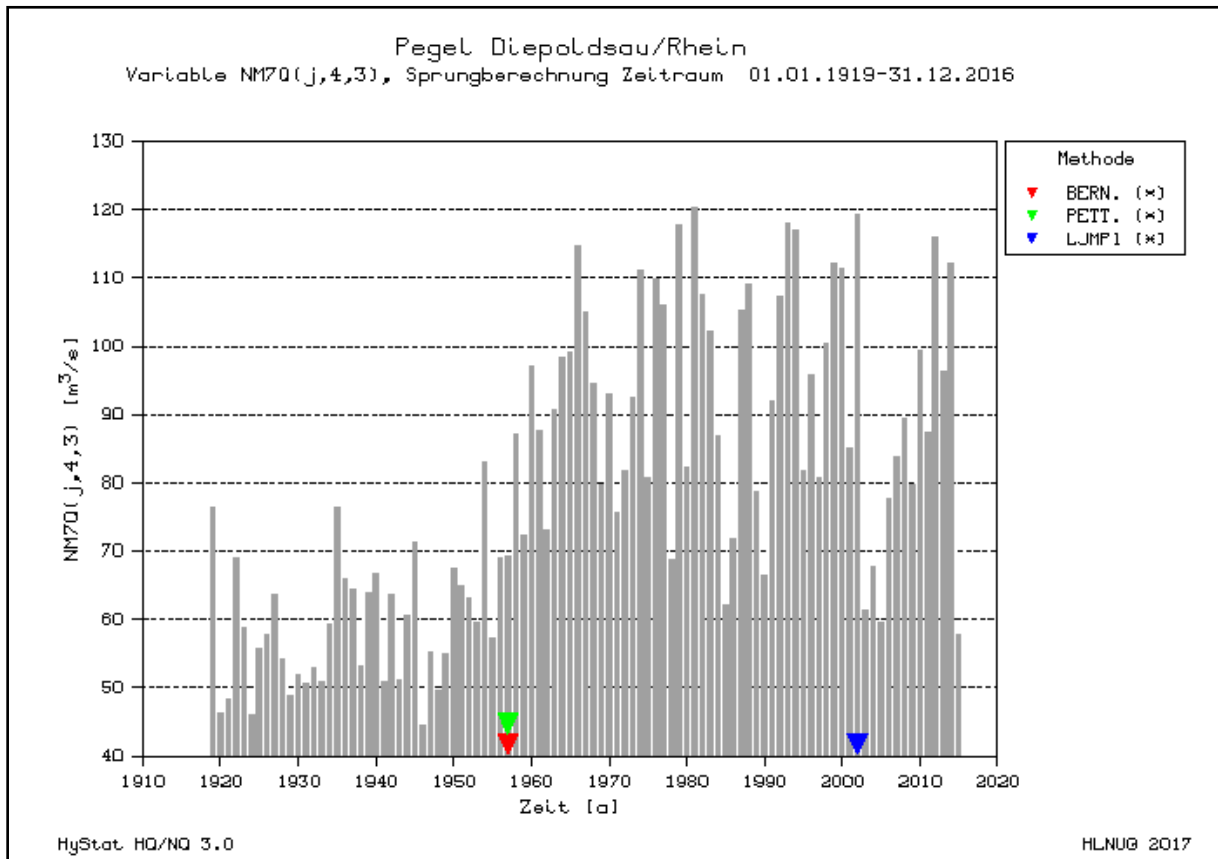


Figuur 8: Afvoergolven van de laagwatergebeurtenis in augustus/september in het hydrologische jaar 2003

## 7.2 Referentieperiode en laagwaterparameters

Om de tijdreeksen op homogeniteit te toetsen en hun veranderingsgedrag te controleren, is het gedrag in de tijd van de jaarlijkse NM7Q-waarden op de hoofdmeetpunten aan de Rijn onderzocht aan de hand van een breekpuntanalyse. De breekpuntanalyse is een statistische methode voor de detectie van plotselinge veranderingen in een tijdreeks. Daarbij wordt doorgaans een vergelijking gemaakt tussen het gedrag van deelperiodes. Als er een significant breekpunt wordt gevonden, is de onderzochte tijdreeks niet homogeen. Dit betekent dat het gedrag van de deeltijdreeksen voor en na het breekpunt verschillend is.

Hieronder zijn bij wijze van voorbeeld de tijdreeksen van de NM7Q-waarden in de beschikbare observatieperiodes op de meetpunten Diepoldsau, Maxau, Kaub en Keulen weergegeven met de tijdstippen waarop breekpunten zijn vastgesteld (zie figuur 9 t/m 12).



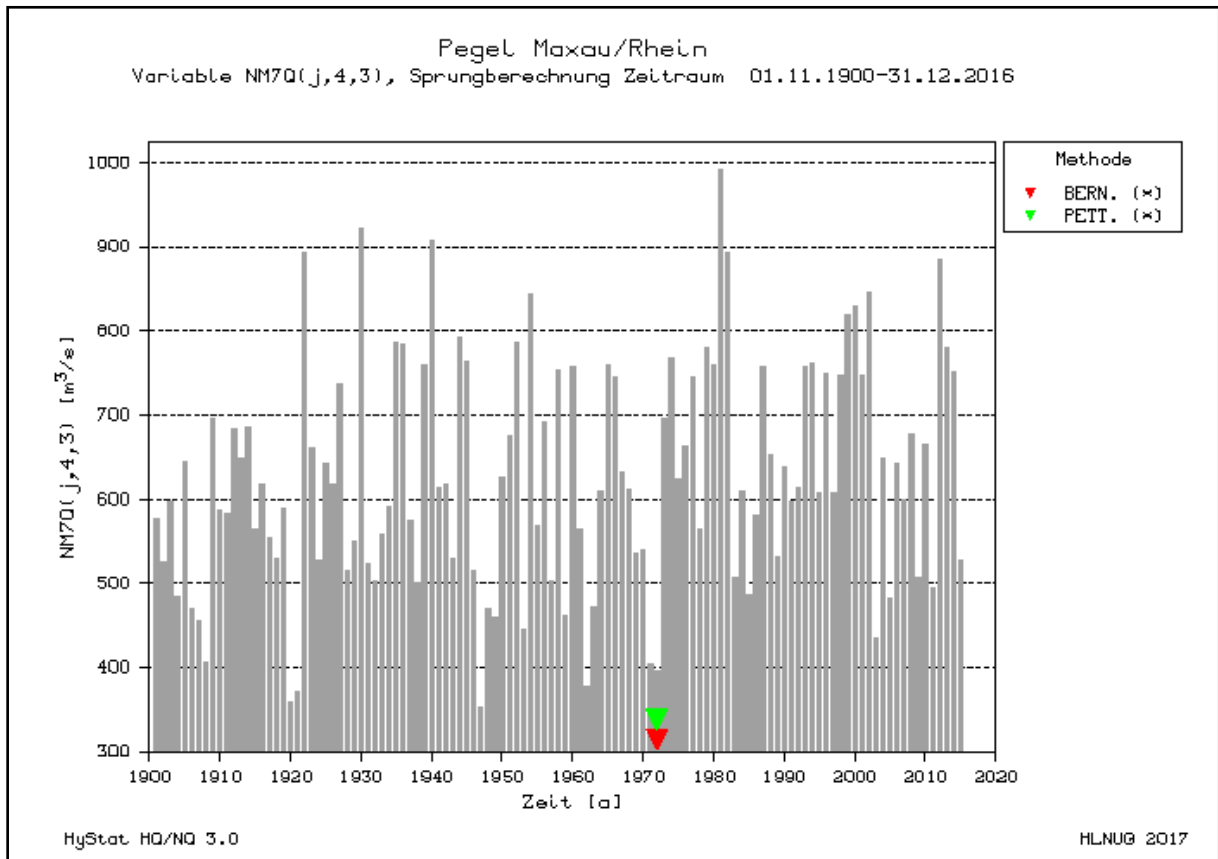
Figuur 9: Jaarlijkse NM7Q-waarden op het meetpunt Diepoldsau en vastgestelde breekpunten

*Pegel = meetpunt;*

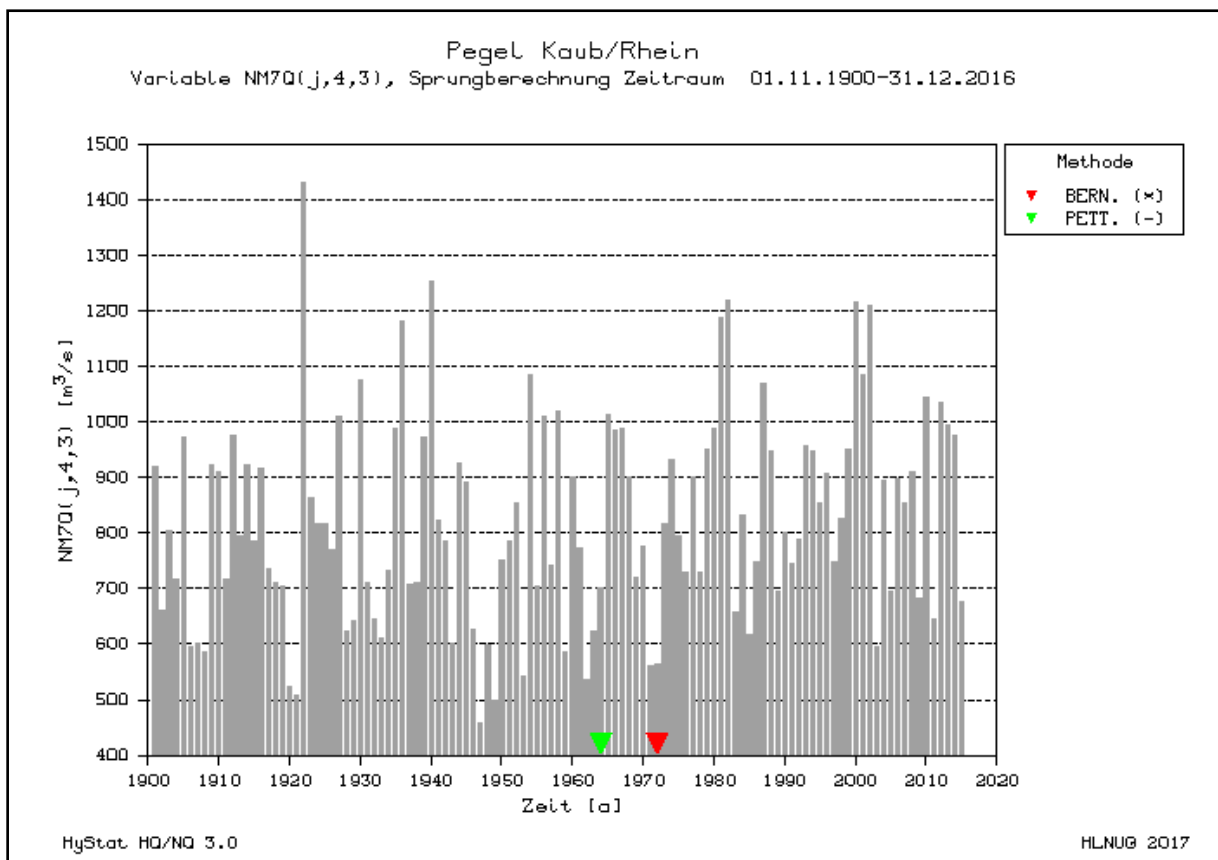
*Sprungberechnung Zeitraum = berekening van het breekpunt in de periode;*

*Zeit = tijd;*

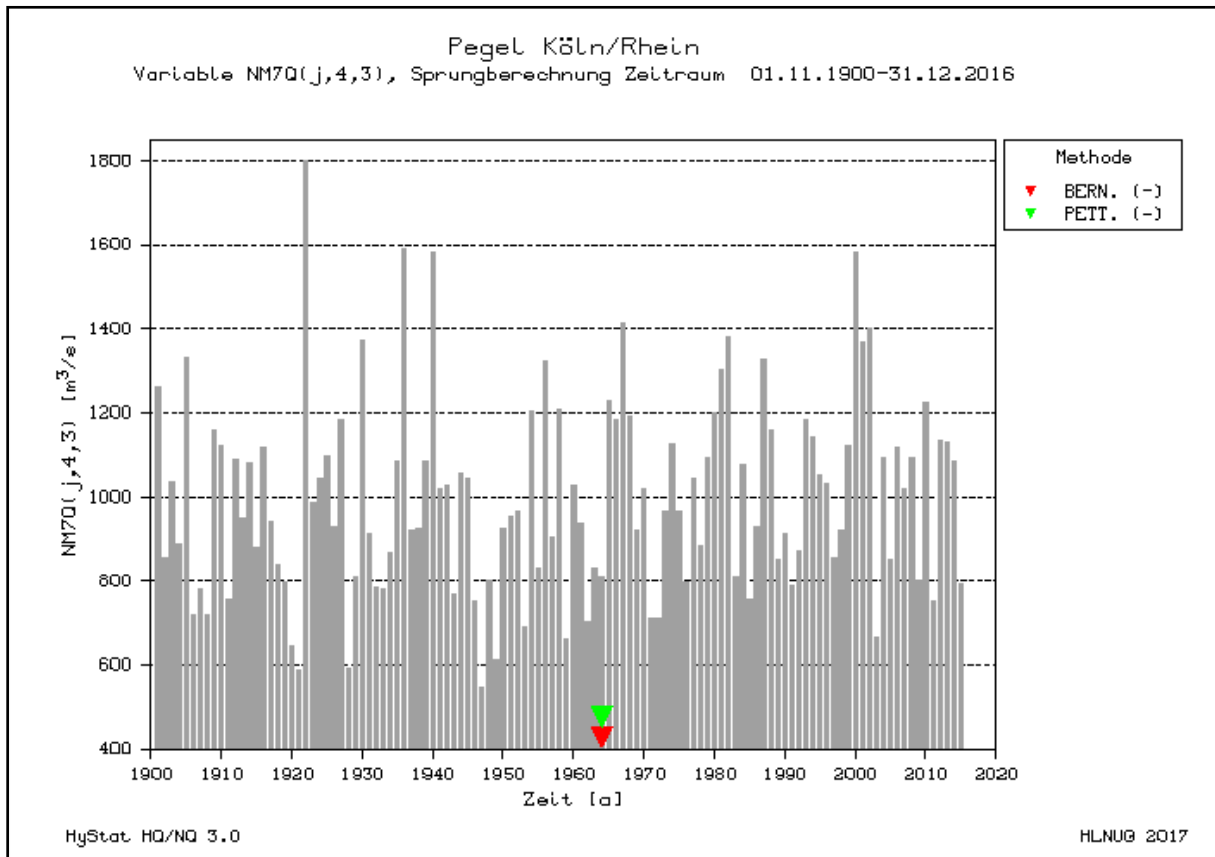
*(j, 4, 3) = hydrologisch jaar van april t/m maart.*



Figuur 10: Jaarlijkse NM7Q-waarden op het meetpunt Maxau en vastgestelde breekpunten



Figuur 11: Jaarlijkse NM7Q-waarden op het meetpunt Kaub en vastgestelde breekpunten



Figuur 12: Jaarlijkse NM7Q-waarden op het meetpunt Keulen en vastgestelde breekpunten

Het meetpunt Diepoldsau vertoont een duidelijke inhomogeniteit: vanaf ongeveer de jaren zestig zijn de laagwaterafvoeren duidelijk hoger dan in de periode daarvoor, wat kan worden verklaard door de aanleg van stuwmuren in het stroomgebied. Op het meetpunt Maxau komt het breekpunt iets later (ca. 1970), voor het meetpunt Kaub komen de twee methodes voor de bepaling van breekpunten op enigszins afwijkende tijden uit (1960 tot 1970) en op het meetpunt Keulen doet het breekpunt zich weer in de jaren zestig voor (zie tabel 5). Voor alle meetpunten geldt dat de laagste NM7Q-jaarwaarden vóór 1960 zijn gemeten; sindsdien zijn deze extreme waarden niet meer bereikt. Dalende trends of tendensen in de laagwaterafvoer kunnen in de NM7Q-tijdreeksen sinds 1960 niet worden ontdekt.

Tabel 5: Tijdstippen (jaren) waarin op basis van een breekpuntanalyse sprake is van een breekpunt

Meetpunt	Breekpunt volgens BERNIER	Breekpunt volgens PETTIT
Diepoldsau	1957	1957
Rekingen	1964	1964
Bazel	1972	1972
Maxau	1971	1971
Worms	1971	1971
Mainz	1971	1971
Kaub	1971	1963
Andernach	1963	1963
Keulen	1963	1963
Lobith	1978	1978

Gelet op de significante breekpunten tussen 1957 en 1972 (met uitzondering van Lobith) is als referentieperiode voor een quasistationaire toestand die de huidige omstandigheden vertegenwoordigt de **tijdreeks van 1 april 1961 t/m 31 maart 2011 als vijftigjarige referentiereeks** genomen. Deze reeks dient als uitgangspunt voor de verdere statistische classificaties. Dit betekent dat in de verdere analyse de MNM7Q over

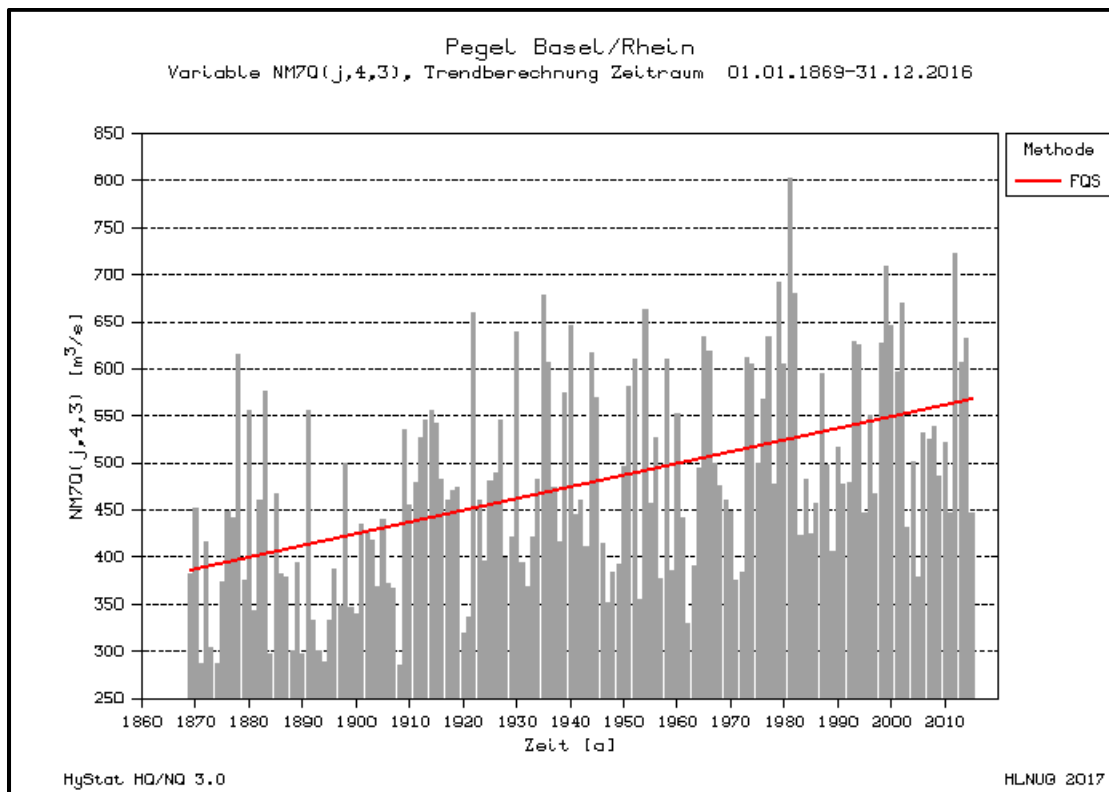
de periode van de hydrologische jaren 1961-2010 als drempelwaarde wordt gebruikt om de jaarlijkse NM7Q-waarden die uit de meetreeksen zijn af te leiden te toetsen en om daarvan de herhalingstijden te bepalen.

## 7.3 Laagwaterafvoer

### 7.3.1 Trendanalyse van laagwaterparameters

Met behulp van een trendanalyse kunnen langetermijntendensen in afvoerge relateerde series worden onderzocht en eventueel aangetoond. In de evaluatie gaat het met name om de bepaling van een trendlijn met behulp van de methode voor de minimalisatie van de kwadraten som van de fout. De beslissing of er sprake is van een statistisch significante trend is gebaseerd op een non-parametrische Mann-Kendall-test (die geen rechtlijnig verlopende trend vooropstelt) en op de t-test van de stijgingscoëfficiënt van de trendlijn (deze gaat uit van een normaalverdeling van de residuen van het geschatte regressiemodel).

De laagwaterafvoeren NM7Q laten over de gehele (niet-homogene) observatieperiode een wiskundig significant stijgende trend zien ( $p < 0,05$ ) op de meetpunten aan de Rijn van Diepoldsau tot Andernach (zie tabel 6), die in de onderstaande figuur bij wijze van voorbeeld is weergegeven aan de hand van de tijdreeks op het meetpunt Bazel (zie figuur 13).



Figuur 13: Trendanalyse van de NM7Q-serie op het meetpunt Bazel

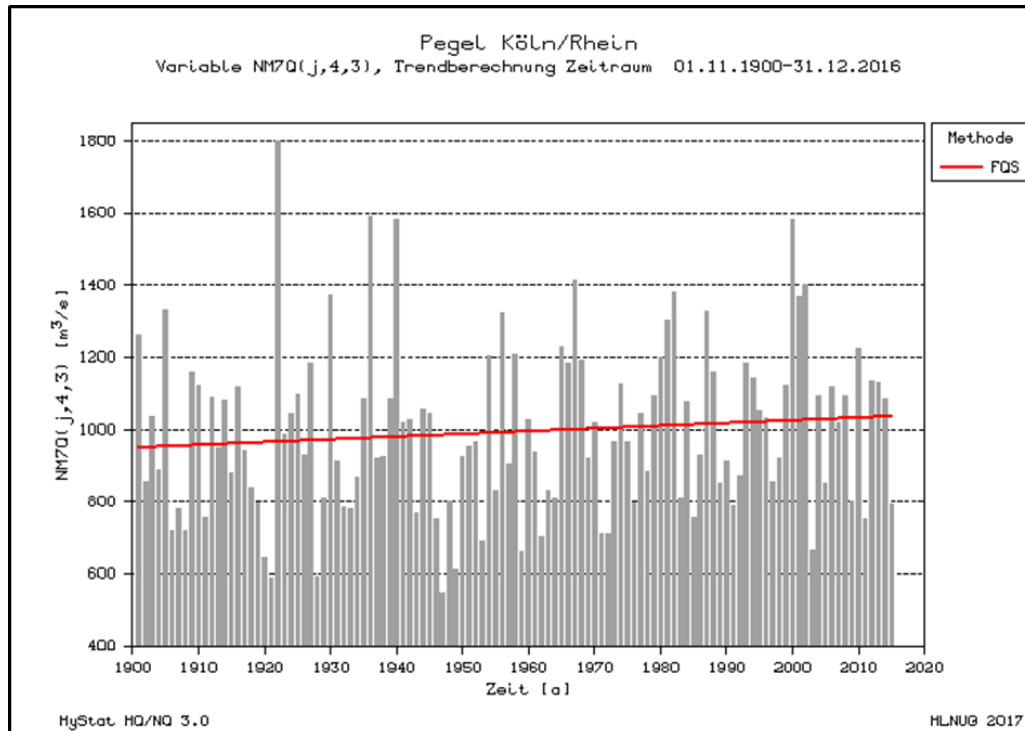
*Pegel = meetpunt;*

*Trendberechnung Zeitraum = beoordeling van de trend in de periode;*

*Zeit = tijd;*

*(j, 4, 3) = hydrologisch jaar van april t/m maart.*

Voor de meetpunten Keulen (zie figuur 14) en Lobith kan daarentegen geen significante trend worden aangetoond (zie tabel 6).



Figuur 14: Trendanalyse van de NM7Q-serie op het meetpunt Keulen

Bij een trendanalyse voor de referentieperiode van 1 april 1961 t/m 31 maart 2011 kan op geen van de meetpunten aan de Rijn een significante trend conform Mann-Kendall worden waargenomen. Dit bevestigt de afbakening van deze periode op basis van de uitgevoerde breekpuntanalyse en laat zien dat de referentieperiode een min of meer homogene toestand weergeeft.

In de onderstaande tabel zijn de resultaten van de trendtests voor de parameter NM7Q weergegeven (zie tabel 6).

Tabel 6: Resultaten van de trendanalyse van de NM7Q-serie voor de gehele onderzoeksperiode en de homogene referentieperiode (MK = Mann-Kendall-test; FQS/t-test = t-test van de stijgingscoëfficiënt van de trendlijn)

Meetpunt	Trend Mann-Kendall totaal	Kwadratensom / t-test totaal <sup>4</sup>	Trend Mann-Kendall 1961-2011	Kwadratensom / t-test 1961-2011
Diepoldsau	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	geen trend	geen trend
Rekingen	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	geen trend	geen trend
Bazel	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	geen trend	geen trend
Maxau	+ (p= 0,95)	geen trend	geen trend	geen trend
Worms	+ (p= 0,95)	geen trend	geen trend	geen trend
Mainz	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	geen trend	+ (p= 0,95)
Kaub	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	geen trend	+ (p= 0,95)
Andernach	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	geen trend	geen trend
Keulen	geen trend	geen trend	geen trend	geen trend
Lobith	geen trend	geen trend	geen trend	geen trend

De trendonderzoeken laten dus geen aanscherping van de laagwatersituatie in de referentieperiode (1961-2010) zien. Echter, als de bekeken periode wordt uitgebreid naar de observatieperiode als geheel (van de start van de metingen aan het begin van de twintigste eeuw t/m 2015), is er - behalve in de Duitse Nederrijn - sprake van een

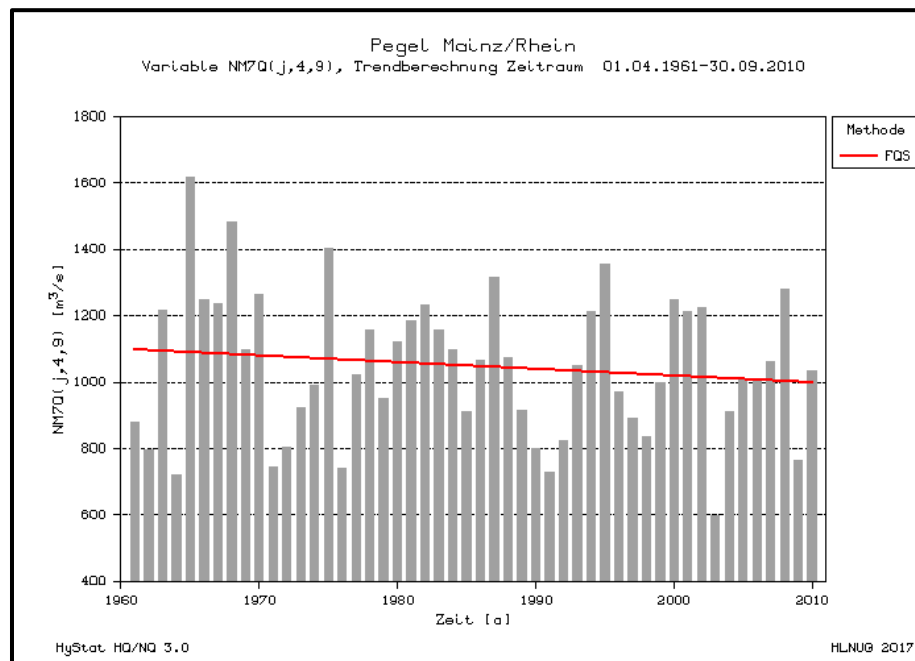
<sup>4</sup> Komt overeen met de rode trendlijn in de figuren 13 t/m 16.

stijgende trend in de laagwaterafvoer. Ook in de langer aanhoudende laagwaterperiodes (21 opeenvolgende dagen: NM21Q) kunnen er eerder stijgende tendensen worden waargenomen (zie tabel 7).

Tabel 7: Resultaten van de trendanalyse van de NM21Q-series voor de gehele onderzoeksperiode en de homogene referentieperiode (MK = Mann-Kendall-test; FQS/t-test = t-test van de stijgingscoëfficiënt van de trendlijn)

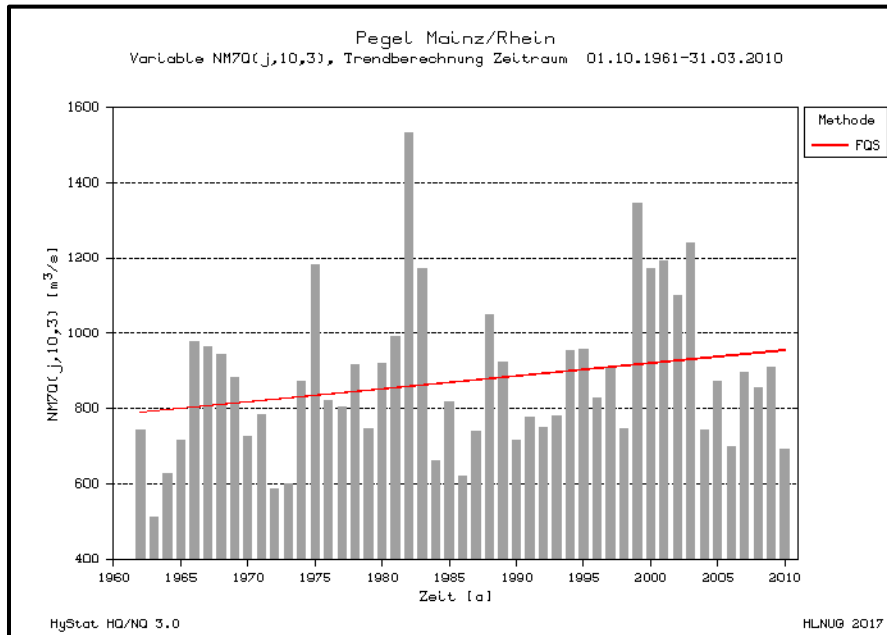
Meetpunt	Trend Mann-Kendall totaal	Kwadratensom / t-test totaal	Trend Mann-Kendall 1961-2011	Kwadratensom / t-test 1961-2011
Diepoldsau	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	geen trend	geen trend
Rekingen	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	geen trend	+ (p= 0,95)
Bazel	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	geen trend	geen trend
Maxau	+ (p= 0,95)	geen trend	geen trend	geen trend
Worms	geen trend	geen trend	geen trend	+ (p= 0,95)
Mainz	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)
Kaub	+ (p= 0,95)	geen trend	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)
Andernach	geen trend	geen trend	geen trend	+ (p= 0,95)
Keulen	geen trend	geen trend	geen trend	geen trend
Lobith	geen trend	geen trend	geen trend	+ (p= 0,95)

In het zomerhalfjaar (jaarlijks van 1 april t/m 30 september) van de referentieperiode vertonen de NM7Q-waarden op geen van de meetpunten een significante trend. In het winterhalfjaar (jaarlijks van 1 oktober t/m 31 maart) is er volgens Mann-Kendall evenmin sprake van een significante trend, maar volgens de lineaire regressiemethode (FQS) laten de meetpunten Worms, Mainz (zie figuur 15 en 16) en Kaub (dus aan de overgang van de Duits-Franse Bovenrijn naar de Middenrijn) een stijgende trend in de NM7Q-waarden zien. De Neckar en de Main oefenen hier mogelijk een invloed uit, die zich verder stroomafwaarts minder laat voelen.



Figuur 15: Trendanalyse van de NM7Q-serie voor het zomerhalfjaar (april-september) op het meetpunt Mainz





Figuur 16: Trendanalyse van de NM7Q-serie voor het winterhalfjaar (oktober-maart) op het meetpunt Mainz

### 7.3.2 Kansanalyse van laagwaterparameters

Om de laagwaterafvoeren later te kunnen classificeren, is er met de series van de NMxQ-waarden (kleinste gemiddelde laagwaterafvoeren op x opeenvolgende dagen) een statistiek van extreme waarden uitgevoerd. De verdeling van de laagwaterseries is met behulp van de L-momenten-parameterschattingmethode aangepast aan de algemene verdeling van extreme waarden (GEV-LM). De hieruit voortvloeiende laagwaterkwantielen zijn in tabel 8 t/m 12 weergegeven voor de onderzochte meetpunten. Op basis van deze resultaten kan er een kans van optreden (herhalingstijd) worden toegekend aan de laagwaterafvoeren (zie hoofdstuk 7.4). Hierbij dient te worden opgemerkt dat de statistiek is gebaseerd op de referentieperiode 1961-2010, en overeenkomt met de huidige omstandigheden (zie hoofdstuk 7.1). Vroegere laagwatergebeurtenissen (vóór 1960) lijken bij de indeling bij deze waarden een te lage kans van optreden te krijgen, maar als de laagwaterafvoer of -duur van vóór 1960 zich nu zou voordoen, zouden de herhalingstijden kloppen.

Tabel 8: Laagwaterafvoeren NM1Q met een bepaalde herhalingstijd, afgeleid voor jaarreeksen (j) gerelateerd aan het hydrologische jaar van april t/m maart (4,3)

Kans op laagwaterafvoer: Soort reeks <b>NM1Q</b> (j,4,3), verdeling GEV-LM <sup>5</sup> , afvoeren in [m <sup>3</sup> /s]						
Herhalingstijd:	T=2a	T=5a	T=10a	T=20a	T=50a	T=100a
Diepoldsau/Rijn	71,6	60,4	54,7	50,2	45,2	42,0
Rekingen/Rijn	229	189	170	156	140	130
Bazel/Rijn	502	426	390	362	333	314
Maxau/Rijn	618	510	454	410	361	330
Worms/Rijn	693	576	518	471	419	386
Mainz/Rijn	817	687	624	574	521	487
Kaub/Rijn	816	682	617	565	511	476
Andernach/Rijn	955	793	716	656	592	551
Keulen/Rijn	985	821	743	683	619	578
Lobith/Rijn	1.053	884	802	739	670	627

<sup>5</sup> Algemene verdeling van extreme waarden op basis van de L-momenten-parameterschattingmethode

Tabel 9: Laagwaterafvoeren NM3Q met een bepaalde herhalingstijd, afgeleid voor jaarreeksen (j) gerelateerd aan het hydrologische jaar van april t/m maart (4,3)

Kans op laagwaterafvoer: Soort reeks <b>NM3Q</b> (j,4,3), verdeling GEV-LM, afvoeren in [m <sup>3</sup> /s]						
Herhalingstijd:	T=2a	T=5a	T=10a	T=20a	T=50a	T=100a
Diepoldsau/Rijn	82,4	69,3	62,5	57,1	51,0	47,1
Rekingen/Rijn	231	192	173	159	144	134
Bazel/Rijn	509	431	394	365	335	315
Maxau/Rijn	629	519	463	418	369	337
Worms/Rijn	701	583	524	477	426	393
Mainz/Rijn	825	693	629	579	525	491
Kaub/Rijn	825	688	623	571	516	480
Andernach/Rijn	966	801	722	661	595	554
Keulen/Rijn	993	828	750	690	627	587
Lobith/Rijn	1.060	892	811	749	682	639

Tabel 10: Laagwaterafvoeren NM7Q met een bepaalde herhalingstijd, afgeleid voor jaarreeksen (j) gerelateerd aan het hydrologische jaar van april t/m maart (4,3)

Kans op laagwaterafvoer: Soort reeks <b>NM7Q</b> (j,4,3), verdeling GEV-LM, afvoeren in [m <sup>3</sup> /s]						
Herhalingstijd:	T=2a	T=5a	T=10a	T=20a	T=50a	T=100a
Diepoldsau/Rijn	92,6	77,2	69,3	62,9	55,8	51,2
Rekingen/Rijn	234	194	176	162	147	137
Bazel/Rijn	518	439	402	374	344	325
Maxau/Rijn	644	530	473	427	377	345
Worms/Rijn	716	593	533	486	434	401
Mainz/Rijn	839	702	638	588	535	501
Kaub/Rijn	841	699	632	580	524	489
Andernach/Rijn	982	812	732	670	604	563
Keulen/Rijn	1.010	840	761	701	637	597
Lobith/Rijn	1.075	908	829	769	705	665

Tabel 11: Laagwaterafvoeren NM21Q met een bepaalde herhalingstijd, afgeleid voor jaarreeksen (j) gerelateerd aan het hydrologische jaar van april t/m maart (4,3)

Kans op laagwaterafvoer: Soort reeks <b>NM21Q</b> (j,4,3), verdeling GEV-LM, afvoeren in [m <sup>3</sup> /s]						
Herhalingstijd:	T=2a	T=5a	T=10a	T=20a	T=50a	T=100a
Diepoldsau/Rijn	103	87,5	80,0	74,0	67,4	63,2
Rekingen/Rijn	246	204	184	169	153	143
Bazel/Rijn	555	464	422	391	358	337
Maxau/Rijn	685	563	505	461	414	384
Worms/Rijn	765	630	568	520	470	439
Mainz/Rijn	895	742	671	618	561	526
Kaub/Rijn	905	744	669	611	550	511
Andernach/Rijn	1.059	862	771	700	626	579
Keulen/Rijn	1.090	894	803	733	659	613
Lobith/Rijn	1.148	957	869	801	729	684

Tabel 12: Laagwaterafvoeren NM60Q met een bepaalde herhalingsjijd, afgeleid voor jaarreeksen (j) gerelateerd aan het hydrologische jaar van april t/m maart (4,3)

Kans op laagwaterafvoer: Soort reeks <b>NM60Q</b> (j,4,3), verdeling GEV-LM, afvoeren in [m <sup>3</sup> /s]						
Herhalingsjijd:	T=2a	T=5a	T=10a	T=20a	T=50a	T=100a
Diepoldsau/Rijn	113	98,7	92,0	86,9	81,3	77,8
Rekingen/Rijn	271	224	203	186	169	159
Bazel/Rijn	644	530	476	435	390	362
Maxau/Rijn	791	647	579	526	469	433
Worms/Rijn	892	729	652	593	530	489
Mainz/Rijn	1.046	855	765	695	621	574
Kaub/Rijn	1.062	864	770	697	620	570
Andernach/Rijn	1.274	1.015	887	784	672	600
Keulen/Rijn	1.308	1.049	921	820	710	640
Lobith/Rijn	1.351	1.101	983	890	792	729

## 7.4 Laagwaterduur

Op de hoofdmeetpunten aan de Rijn is er onderzoek gedaan naar het gedrag in de tijd van de jaarlijkse waarden in verband met de laagwaterduur MaxD (maximale duur van een aaneengesloten gebeurtenis onder de drempelwaarde MNM7Q) en SumD (totaal aantal dagen dat de drempelwaarde MNM7Q is overschreden). In tabel 13 wordt een overzicht gegeven van de gemiddelde laagwaterduur in de referentieperiode van 1 april 1961 tot 31 maart 2011. Behalve op de meetpunten Diepoldsau en Rekingen duurt de gemiddelde periode dat de afvoer MNM7Q is overschreden zestien tot twintig dagen. Het gemiddelde totale aantal dagen dat de afvoer lager is dan de drempelwaarde MNM7Q bedraagt 25 dagen per jaar. Omdat er jaren zijn waarin de drempelwaarde niet wordt overschreden, zijn deze "gemiddelde" waarden te laag voor afzonderlijke gebeurtenissen die de drempelwaarde wel overschrijden. De hierna uitgevoerde statistiek van extreme waarden in verband met de overschrijdingsduur van laagwaterperiodes met een bepaalde herhalingsjijd levert een betere interpretatie op.

Tabel 13: Gemiddeld aantal dagen per jaar waarop de drempelwaarde MNM7Q is overschreden

Meetpunt	MaxD [dagen]	SumD [dagen]
Diepoldsau	7,6	24,5
Rekingen	24,2	29,2
Bazel	19,6	26,7
Maxau	17,6	25,6
Worms	17,6	25
Mainz	18,1	27
Kaub	17,5	25,1
Andernach	16	24,2
Keulen	16,7	23
Lobith	17,2	24,3

De jaarseries zijn niet geschikt voor een statistisch onderzoek naar de kans van optreden van laagwatergebeurtenissen met een verschillend aantal dagen onder de drempelwaarde, omdat er jaren zijn waarin er geen sprake is van overschrijdingen. Daarom zijn er jaarseries samengesteld op basis van de indirecte methode van de DVWK-"laagwateranalyse" (DVWK, 1992) om het statistisch onderzoek naar extreme waarden mee uit te voeren. De resultaten voor de referentieperiode 1961-2010 op de hoofdmeetpunten aan de Rijn zijn op een rij gezet in tabel 14.

Tabel 14: Duur van de periode (aantal dagen) dat een laagwater met een herhalingstijd van n jaar de drempelwaarde MNM7Q onderschrijft

	T = 2a	T = 5a	T = 10a	T = 20a	T = 50a	T = 100a
Diepoldsau	3,5	9,1	14,0	16,6	21,2	26,3
Rekingen	7,0	30,8	49,0	65,9	85,1	
Bazel	5,1	23,6	34,9	47,5	54,8	83,7
Maxau	4,9	23,4	34,2	47,4	63,7	89,4
Worms	5,4	23,5	35,1	49,3	67,8	
Mainz	5,6	24,5	38,1	55,7	80,9	
Kaub	5,5	23,3	35,7	55,0	74,4	
Andernach	5,8	23,8	39,7	52,9	73,2	85,2
Keulen	5,8	23,8	38,2	52,1	75,1	87,8
Lobith	5,4	26,2	46,1	68,4	88,9	

Met behulp van deze herhalingstijdtabel kan op basis van de onderschrijdingsduur een kans van optreden worden toegekend aan historische laagwatergebeurtenissen (zie hoofdstuk 7.5); voor de laagwatergebeurtenis in 2003 leidt dit tot de classificaties in tabel 15. Met betrekking tot de afvoerwaarden heeft de laagwatergebeurtenis in Bazel een herhalingstijd van 5 jaar, die in de loop van de rivier tot Keulen toeneemt tot een herhalingstijd van 35 jaar. Met betrekking tot de laagwaterduur heeft de gebeurtenis een herhalingstijd van 5 à 10 jaar, behalve op het meetpunt Andernach.

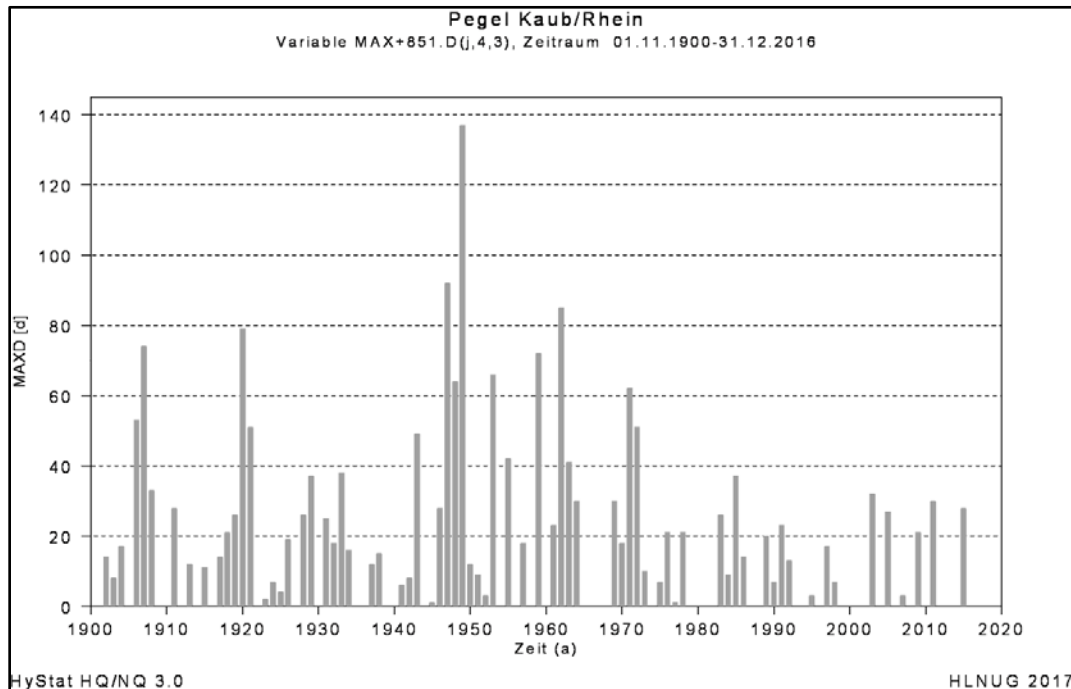
In figuur 17 is de ontwikkeling in de tijd van de parameter MaxD (maximale onderschrijdingsduur van een aaneengesloten gebeurtenis op jaarbasis) bij wijze van voorbeeld weergegeven voor het meetpunt Kaub. De figuren voor alle meetpunten zijn opgenomen in bijlage 3.

Tabel 15: Toekenning van herhalingstijden aan de laagwaterparameters van de gebeurtenis van 2003

### Laagwaterparameters van de gebeurtenis in augustus/september 2003

	Laagwaterafvoer [m <sup>3</sup> /s]			Laagwaterduur [dagen]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q sep 2003	Herhalingstijd sep 2003	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q sep 2003	Herhalingstijd sep 2003
Diepoldsau	92,2	108	< 2	4	2	< 2
Rekingen	238	193	5	7	22	2-5
Bazel	527	431	5	5	20	5
Maxau	645	435	20	5	31	5-10
Worms	720	500	15	5	31	5-10
Mainz	850	596	20	6	33	5-10
Kaub	851	595	20	6	32	5-10
Andernach	998	682	20	6	62	30
Keulen	1.028	666	35	6	33	5-10
Lobith	1.095	808	15	6	34	5-10

MaxD = maximale duur van een aaneengesloten periode < MNM7Q  
 NM7Q2 = laagwaterafvoer NM7Q met een herhalingstijd van 2 jaar  
 De herhalingstijden hebben betrekking op de referentieperiode 1961-2010



Figuur 17: Jaarserie van de parameter onderschrijdingsduur MaxD (in dagen) voor het meetpunt Kaub

*Pegel = meetpunt; Zeitraum = periode; Zeit = tijd; (j, 4, 3) = hydrologisch jaar van april t/m maart.*

Zeer lang durende laagwatergebeurtenissen, waarbij de MNM7Q ongeveer tachtig dagen lang is onderschreden, deden zich met name aan het begin van de twintigste eeuw, in 1921, aan het einde van de jaren veertig (met tot 138 onderschrijdingsdagen) en rond 1960 voor. In 1972 lag de afvoer nog op ongeveer zestig dagen onder de drempelwaarde; sindsdien zijn laagwatergebeurtenissen duidelijk korter, een laagwaterperiode houdt vaak rond de twintig en hooguit 38 dagen aan. Uit de ontwikkeling van de laagwaterduur in de tijd kan geen tendens richting ernstigere laagwatersituaties in de Rijn worden afgeleid.

## 7.5 Beschrijving en classificatie van geselecteerde historische laagwatergebeurtenissen (voorbeeld: het laagwater in augustus/september 2003)

De resultaten van de evaluatie in verband met de historische laagwatergebeurtenissen op de Rijn zijn inclusief afvoergolven en parameters (herhalingstijden voor afvoer en duur) opgenomen in bijlage 2. Hierbij gaat het om de gebeurtenissen 1920, 1921, 1943, 1947, 1949, 1953, 1959, 1962, 1963, 1971, 1972, 1976, 1985, 2003, 2006, 2011 en 2015. In het onderhavige hoofdstuk wordt uitvoerig ingegaan op de gebeurtenis van 2003, waarvoor de Rijnsoeverstaten over uitgebreide informatie beschikken. Bovendien kan het laagwater van 2003 worden beschouwd als een gebeurtenis die representatief is voor een uitgesproken zomerlaagwater met hoge watertemperaturen. In hoofdstuk 7.1 en 7.4 zijn de afvoergolven, parameters en herhalingstijden van de gebeurtenis van 2003 weergegeven in figuren en tabellen.

De effecten van het laagwater van 2003, en van de andere historische laagwatergebeurtenissen, zijn op een rij gezet in het algemene hoofdstuk 6.3 over gevolgen.

### 7.5.1 Meteorologische ontwikkeling van het laagwater van 2003

Voordat het jaar 2003 zich tot een uitgesproken droog jaar ontwikkelde, begon het met bovengemiddeld veel neerslag (van november 2002 tot januari 2003). Vanaf februari 2003 kwam een hogedruksysteem tot ontwikkeling boven West-Europa, dat natte, westelijke luchtmassa's blokkeerde en de toevoer van warme, droge luchtmassa's vanuit Noord-Afrika bevorderde. Het resultaat was een uitgesproken neerslagtekort (vooral in februari, maart en augustus 2003), waarvan de effecten vanaf juli 2003 in alle Rijnsoeverstaten voelbaar waren. Deze weersituatie leidde tot droogte en steeds duidelijker, lang aanhoudend

laagwater dat duurde tot oktober 2003 (en dan weer werd opgevolgd door bovengemiddeld veel neerslag). Van maart tot september 2003 breidde zich een meteorologisch droge periode in combinatie met een hittegolf (vooral in augustus 2003) uit over grote delen van West-, Midden- en Zuid-Europa. Als gevolg van de lage waterstanden en de intensieve zonbestraling steeg ook de temperatuur van het water flink.

### 7.5.2 Hydrologische ontwikkeling van het laagwater van 2003

Als gevolg van de hierboven beschreven omstandigheden en vooral door de lage neerslaghoeveelheden deed er zich vanaf eind juni dan wel juli 2003 tot begin oktober 2003 een laagwaterperiode voor in het riviersysteem van de Rijn. In oktober 2003 steeg het waterpeil dankzij de inzettende regen weer snel. De laagste afvoeren werden eind september 2003 gemeten. In belangrijke, gestuwde zijrivieren als de Neckar, de Main en de Moezel waren de afvoeren ook minder. De zomerse aanvoer van smeltwater uit het alpiene stroomgebied en de compenserende invloed van het Bodenmeer zorgden ervoor dat de laagwaterperiode in de Rijn later begon dan in zijn grote zijrivieren en in andere rivieren (Elbe, Oder).

De uitermate grote hitte in het hooggebergte deed de sneeuw en gletsjers in sterke mate smelten, waardoor de rivieren met een stroomgebied in de Alpen (zoals de Alpenrijn) buitengewoon veel water vervoerden (meetpunt Diepoldsau: geen laagwater in september 2003). De gebieden waar de wateren het ergst waren uitgedroogd, waren aan de noordkant van de Alpen het kanton Jura en het lagere deel van de Zwitserse Hoogvlakte (het meetpunt Bazel was zwaarder getroffen door het laagwater dan Rekingen). In maart/april 2003 daalde de afvoer in het Duitse deel van de Rijn al, maar de langjarig gemiddelde laagwaterafvoer ( $MNQ_{1931/2000}$ ) werd pas medio augustus 2003 onderschreden. Tegelijkertijd met de extreem hoge luchttemperaturen medio augustus 2003 daalde de waterstand in de Rijn tot eind september 2003 tot zeer lage waarden (bijv. 65 cm in Koblenz op 15 augustus 2003). De laagste afvoer van de Rijn in Nederland (meetpunt Lobith) was in 2003 vergelijkbaar met die van 1976 (ongeveer 800 m<sup>3</sup>/s in Lobith) en leidde ook tot ernstige problemen. Wel was er in 1976 in totaal sprake van drie laagwaterperiodes en duurde het laagwater in 2003 veel korter dan in 1976.

Als gevolg van de lage waterstanden en de intensieve zonbestraling steeg de temperatuur van het water fors. Er werden meerdere temperatuurrecords verbroken. In de Hoogrijn bedroeg de maximale watertemperatuur 26 °C en in de rest van de Rijn warmde het water op tot 28 °C. In de zijrivieren verschilde de opwarming: zo werden er in de door stuwen gereguleerde rivieren (Moezel, Main, Neckar, Saar) hogere temperaturen gemeten dan in de vrij afstromende zijrivieren.

## 8. Mogelijke effecten van klimaatverandering op de toekomstige laagwateromstandigheden in de Rijn

### 8.1 Resultaten van uitgevoerde onderzoeken in het Rijnstroomgebied

Als gevolg van diverse antropogene ingrepen in de waterhuishouding kan niet eenduidig worden vastgesteld welke effecten de klimaatverandering tot dusver heeft gehad op de laagwaterafvoer in de Rijn. De ontwikkeling van de laagwaterafvoer op de meetpunten aan de Rijn laat in de twintigste eeuw een afname in de extreme laagwaterwaarden zien. Volgens Belz et al. (2007) vertonen de meetpunten Bazel, Maxau, Worms, Kaub, Andernach en Keulen (alleen in het winterhalfjaar) over de periode 1901 tot 2000 een stijgende afvoertrend in het NM7Q van het hydrologische jaar of het hydrologische winterhalfjaar. Bij beschouwing van de periode 1951-2000 kan deze stijgende trend in de afvoer op de meetpunten Bazel, Maxau en Worms nog worden bevestigd, terwijl er voor de overige, verder stroomafwaarts gelegen meetpunten geen sprake is van gefundeerde trends. Mede verantwoordelijk daarvoor zijn de dalende NM7Q-trends die in deze periode in de stroomafwaartse zijrivieren Lahn en Moezel worden waargenomen.

De effecten van klimaatverandering op de laagwaterafvoer kunnen op basis van afvoerprojecties die voortvloeien uit klimaatprojecties worden afgeleid en gekwantificeerd door een systematische vergelijking te maken tussen de laagwaterparameters in een

referentieperiode (1971-2000) en een toekomstige periode (2021-2050 voor de “nabije toekomst” of 2071-2100 voor de “verre toekomst”). Daarbij dient te worden bedacht dat klimaatscenario's zijn gebaseerd op verschillende aannames over de toekomstige ontwikkeling van emissies en dat er tal van globale en regionale klimaatmodellen bestaan, waarvan er niet één per se de voorkeur verdient. Gelet op het voorgaande moeten voor de inschatting van de effecten meerdere verschillende afvoerprojecties als “ensemble” worden geëvalueerd en moeten uit dit ensemble bandbreedtes van de mogelijke toekomstige veranderingen in de laagwaterafvoeren worden afgeleid.

De **EG KLIMA van de ICBR** heeft bandbreedtes voor de verandering van de NM7Q-afvoer in het hydrologische zomer- en winterhalfjaar vastgesteld op basis van de resultaten van het CHR-project “**Rheinblick 2050**” (Görgen et al. 2010).

Tabel 16: Bandbreedte van de verandering van de NM7Q op verschillende meetpunten van de Rijn (bron: ICBR-rapport 188, ICBR, 2011)

Parameter	Meetpunt	Scenariobandbreedtes	
		Verandering in % Nabije toekomst	Verandering in % Verre toekomst
NM7Q hydrologisch zomerhalfjaar (mei-oktober)	Bazel	-10% tot +10%	-20% tot -10%
	Maxau	-10% tot +10%	-20% tot -10%
	Worms	-10% tot +10%	-25% tot -10%
	Kaub	-10% tot +10%	-25% tot -10%
	Keulen	-10% tot +10%	-30% tot -10%
	Lobith	-10% tot +10%	-30% tot -10%
NM7Q hydrologisch winterhalfjaar (november-april)	Bazel	+5% tot +15%	0% tot +15%
	Maxau	0% tot +10%	-5% tot +15%
	Worms	+5% tot +15%	-5% tot +15%
	Kaub	0% tot +15%	-5% tot +15%
	Keulen	0% tot +15%	0% tot +20%
	Lobith	0% tot +15%	-5% tot +15%

#### Kleurencode voor de veranderingssignalen in de 21e eeuw (legenda)

oranje	dalende tendens
grijs	geen duidelijke tendens
blauw	stijgende tendens

De resultaten voor de nabije toekomst laten in het hydrologische zomerhalfjaar een bandbreedte zien van -10% afname tot +10% toename van de NM7Q-afvoer. In het hydrologische winterhalfjaar gaat de bandbreedte van geen verandering of lichte stijgingen (0 tot + 5%) tot een algemene toename van 15% als eindpunt voor de meetpunten aan de Rijn. In de verre toekomst is er in tendens sprake van een verschuiving van de effecten richting lagere laagwaterafvoeren; in het zomerhalfjaar liggen de bandbreedtes van de verandering volledig in het negatieve bereik.

In verband met de toekomstige ontwikkeling van de watertemperatuur tijdens laagwatergebeurtenissen in de zomer heeft het onderzoek van de **ICBR-expertgroep STEMP** (ICBR, 2014) op basis van een vergelijking van de maandgemiddelde watertemperatuur voor augustus (plaatsvervangend voor de zomer) in het lengteprofiel van de Rijn uitgewezen dat de Rijntemperatuur in de nabije toekomst (2021-2050) circa 1,5 °C hoger zal zijn dan in de referentieperiode van het toenmalige onderzoek (2001-2010), terwijl de stijging in de verre toekomst (2071-2100) rond de 3,5 °C ligt. Deze opwarming wordt veroorzaakt door het klimaat, zonder aanvullend significant effect van warmtelozingen<sup>6</sup> (ICBR, 2015). Bovendien zal het ecologisch kritische aantal dagen met watertemperaturen boven 25 °C in de nabije toekomst toenemen ten opzichte van de

<sup>6</sup> Doordat er inmiddels meerdere (productie-eenheden in) kerncentrales zijn stilgelegd in het Rijnstroomgebied is deze informatie achterhaald. Betrouwbare prognoses van de ontwikkeling van de warmtelozingen zouden de prognoses in verband met de watertemperatuur verder kunnen verbeteren. (ICBR, 2015)

referentiesituatie; bij lage afvoeren kan er sprake zijn van een verdubbeling. Ook in de verre toekomst wordt er een forse stijging verwacht van het aantal dagen waarop de watertemperatuur hoger is dan 25 °C dan wel 28 °C. Deze bevindingen laten zien dat laagwatergebeurtenissen in het zomerhalfjaar (zoals bijv. in 2003 en 2006) in de toekomst, gelet op hun ecologische effecten, steeds belangrijker zouden kunnen worden voor de Rijn.

In het project **KLIWAS** (BMVBS, 2015) is in een ensembleonderzoek naar het hydrologische jaar (van 1 april t/m 31 maart) op de meetpunten van de Rijn vastgesteld dat de parameter NM7Q zich in de nabije toekomst in een bandbreedte tussen -5% en +10% beweegt. In de verre toekomst is er sprake van een bandbreedte met veeleer dalende afvoeren van -10%/-20% tot +10%. Met betrekking tot de ontwikkeling van de laagwaterduur is in het kader van KLIWAS de verandering van de afvoer bij de zogenaamde "Overeengekomen Laagste Rivierstand" (OLR) op het meetpunt Kaub onderzocht (719 m<sup>3</sup>/s, ca. NM7Q5). Terwijl de OLR-afvoer op het meetpunt Kaub in de referentieperiode gemiddeld gedurende 18 dagen wordt onderschreden, resulteert voor de nabije toekomst een mogelijke range van 10 tot 25 dagen, d.w.z. tussen een lichte daling en een lichte stijging. Echter, voor de verre toekomst kan bij een bandbreedte van 15 tot 50 dagen worden uitgegaan van een duidelijke toename in het aantal onderschrijdingsdagen.

De werkgroep **KLIWA** heeft op basis van het regionale model COSMO-CLM4.8 en het emissiescenario A1B in drie modelruns steeds dalende laagwaterparameters berekend voor het hydrologische jaar in de nabije toekomst (zie tabel 17) (HYDRON, 2017).

Tabel 17: Veranderingen in de laagwateromstandigheden in de nabije toekomst op het meetpunt Kaub (verandering van de afvoer in %, verandering van de duur in dagen)

	MNQ	MNM7Q	MNM21Q	maxD < MNQ	sumD < MNQ
run 1	-8,9 %	-8,8 %	-9,2 %	+ 12,6 d	+ 17,8 d
run 2	-8,9 %	-9,0 %	-8,7 %	+ 6 d	+ 4,6 d
run 3	-4,0 %	-4,4 %	-6,2 %	+ 8,1 d	+ 10,1 d

Deze resultaten zijn echter geen modelbandbreedte - immers er is geen gebruik gemaakt van meerdere verschillende modelketens - maar laten wel de variatie in één modelketen als gevolg van verschillende beginvoorwaarden zien. Met deze afvoerprojecties worden er op het meetpunt Kaub afnames in de laagwaterafvoeren verkregen tussen 5 en 10%. De duur van de onderschrijding onder de hier gebruikte drempelwaarde MNQ neemt toe met 5 à 17 dagen. Deze veranderingen resulteren over het geheel genomen uit duidelijke veranderingen in het hydrologische zomerhalfjaar (afname van de NM7Q tussen -5 en -13%). Voor het hydrologische winterhalfjaar is er afhankelijk van welke run wordt bekeken sprake van hetzij een afname van de NM7Q (run 2: -7,2%), hetzij een minimale verandering (run 1: -1,2%, run 3: 0,4%).

## 8.2 Onderzoek van de afvoerprojecties COSMO-CLM4.8-A1B

Omdat een toename van de laagwaterafvoeren onproblematisch is, is ervoor gekozen om uit de bandbreedte van mogelijke toekomstige ontwikkelingen de COSMO-CLM4.8-afvoerprojectie nader te onderzoeken, teneinde mogelijke secundaire effecten te beschrijven. Immers, in de COSMO-CLM4.8-afvoerprojectie worden dalende laagwaterafvoeren verwacht, waardoor ze wat de effecten betreft als ongunstige variant wordt beschouwd. Om een directe vergelijkbaarheid met de onderzoeksmethode in de EG LW te bereiken, zijn deze afvoerprojecties geëvalueerd met betrekking tot het hydrologische jaar (van november t/m oktober) en gerelateerd aan herhalingstijden. Omdat alle drie de runs dezelfde kans van optreden hebben, zijn ze als collectief voor de nabije toekomst (2021-2050) bekeken en geëvalueerd (zie tabel 18).

Tabel 18: Laagwaterparameters voor de afvoerprojectie COSMO-CLM4.8-A1B



Modelprojecties COSMO-CLM4.8-A1B: <b>NM7QT</b> , afvoeren in [m <sup>3</sup> /s]						
<b>Herhalingstijd:</b>	<b>T=2a</b>	<b>T=5a</b>	<b>T=10a</b>	<b>T=20a</b>	<b>T=50a</b>	<b>MNM7Q</b>
Worms/Rijn 1971-2000 gesimuleerd	748	643	595	558	520	762
Worms/Rijn 2021-2050 gesimuleerd	696	581	529	489	446	711
(2021-2050) – (1971-2000) [%]	<b>-7%</b>	<b>-10%</b>	<b>-11%</b>	<b>-12%</b>	<b>-14%</b>	<b>-7%</b>
Kaub/Rijn 1971-2000 gesimuleerd	909	765	700	651	599	929
Kaub/Rijn 2021-2050 gesimuleerd	826	684	620	572	521	846
(2021-2050) – (1971-2000) [%]	<b>-9%</b>	<b>-11%</b>	<b>-11%</b>	<b>-12%</b>	<b>-13%</b>	<b>-9%</b>
Keulen/Rijn 1971-2000 gesimuleerd	1.077	894	810	746	679	1.101
Keulen/Rijn 2021-2050 gesimuleerd	972	792	709	647	581	996
(2021-2050) – (1971-2000) [%]	<b>-10%</b>	<b>-11%</b>	<b>-12%</b>	<b>-13%</b>	<b>-14%</b>	<b>-10%</b>

Volgens dit scenario nemen de MNM7Q-waarden in de nabije toekomst (2021-2050) steeds meer af, hoe verder benedenstrooms de meetlocaties zijn gelegen: Worms (-7%), Kaub (-9%) en Keulen (-10%). De NM7Q-waarden met een herhalingstijd van n jaar, die in hoofdstuk 9.1 als drempelwaarden voor de laagwaterafvoer worden gedefinieerd, laten voor alle meetpunten zeer vergelijkbare veranderingen zien met afnames van -10% voor een NM7Q met een herhalingstijd van 5 jaar tot -14% voor een NM7Q met een herhalingstijd van 50 jaar.

Voor de analyse van de verandering van de maximale, aaneengesloten periode MaxD waarin de drempelwaarde NM7Q2 is onderschreden, is in tabel 19 een overzicht gegeven van het aantal dagen waarop de in de referentieperiode bepaalde NM7Q2 gedurende een laagwatergebeurtenis met verschillende herhalingstijden is onderschreden.

Aangezien de laagwaterafvoer over het geheel genomen daalt, wordt de verwachting ingelost en neemt de duur van de onderschrijding van de drempelwaarde NM7Q2, die vanuit de referentieperiode is overgenomen, toe. Terwijl voor een gemiddelde gebeurtenis met een herhalingstijd van 2 jaar in de modelmatige referentieperiode slechts 4 dagen met een onderschrijding voorkomen, neemt dit aantal in het toekomstscenario sterk toe naar 11 à 13 dagen. Voor de zeldzamere gebeurtenissen met een herhalingstijd van 5 tot 20 jaar neemt het aantal onderschrijdingsdagen nog met ongeveer 50 à 75% toe vergeleken met de referentieperiode.

Tabel 19: Modelprojectie onderschrijdingsduur MaxD &lt; NM7Q2 in dagen

Modelprojectie COSMO-CLM4.8-A1B: <b>onderschrijdingsduur MaxD &lt; NM7Q2</b> (huidige toestand) [in dagen]					
Herhalingstijd:	T=2a	T=5a	T=10a	T=20a	T=50a
Worms gesimuleerd 1971-2000 < 748 m <sup>3</sup> /s	4	22	37	47	61
Worms gesimuleerd 2021-2050 < 748 m <sup>3</sup> /s	11	33	55	76	
(2021-2050) – (1971-2000) [%]	<b>184%</b>	<b>52%</b>	<b>49%</b>	<b>62%</b>	
Kaub gesimuleerd 1971-2000 < 909 m <sup>3</sup> /s	4	24	39	51	62
Kaub gesimuleerd 2021-2050 < 909 m <sup>3</sup> /s	13	37	61	80	
(2021-2050) – (1971-2000) [%]	<b>253%</b>	<b>54%</b>	<b>55%</b>	<b>58%</b>	
Keulen gesimuleerd 1971-2000 < 1.077 m <sup>3</sup> /s	4	23	37	46	54
Keulen gesimuleerd 2021-2050 < 1.077 m <sup>3</sup> /s	13	38	58	81	
(2021-2050) – (1971-2000) [%]	<b>260%</b>	<b>63%</b>	<b>57%</b>	<b>77%</b>	

Er wordt gebruik gemaakt van de methodes en tijdsperiodes die in de gehele studie worden toegepast, zodat de effecten in verhouding kunnen worden gezien tot de overige resultaten. De resultaten staan voor een projectie met lichte afnames in de laagwaterparameters (afname met -4 tot -9% voor het MNQ in het hydrologische jaar, zie hoofdstuk 8.1), terwijl in de bandbreedtes van andere onderzoeken ook projecties met stijgende afvoeren in de nabije toekomst voorkomen.

### 8.3 Effecten waarmee rekening moet worden gehouden vanuit het oogpunt van laagwaterpreventie

Uit de uitgevoerde onderzoeken vloeit voor laagwaterparameters in de nabije toekomst een bandbreedte voort van afnames met -5% tot toenames met 10% als het hydrologische jaar wordt bekeken van 1 april t/m 31 maart. Procentuele veranderingen voor hydrologische jaren van november t/m oktober en halve hydrologische jaren uit andere bandbreedtes kunnen niet direct worden vergeleken, omdat ze niet overeenstemmen met het laagwaterregime van de Rijn. Als het hydrologische jaar van november t/m oktober of het hydrologische zomer- dan wel winterhalfjaar wordt gebruikt, worden de voor de Rijn typische laagwatergebeurtenissen onderbroken die starten in september en duren tot december. Het kan niet onomstotelijk worden vastgesteld of de laagwaterafvoeren in de nabije toekomst al afnemen of pas in de verre toekomst. Voor de nabije toekomst moet, in het kader van een **preventieve benadering**, worden uitgegaan van het slechtste geval met matige afnames van de laagwaterafvoeren in de orde van grootte van 5 à 10%. De effecten van een dergelijk scenario zijn onderzocht en resulteren in afnames van de laagwaterwaarden met een herhalingstijd van T jaar (NM7QT) met 7 tot 14%. Voor frequente gebeurtenissen met een herhalingstijd van 2 jaar gaat hiermee een verdriedubbeling van de onderschrijdingsduur gepaard, wat zeer veel is, terwijl bij zeldzamere gebeurtenissen met een herhalingstijd van 5 tot 20 jaar de onderschrijdingsduur met 50 tot 75% toeneemt.

De weergegeven resultaten geven een beeld van een mogelijke toekomst op basis van de aannames die bij de analyse zijn gedaan respectievelijk de uitgangspunten die zijn gekozen. Andere afvoerprojecties zouden andere resultaten kunnen opleveren.

## 9. Laagwatermonitoring

Om het optreden van laagwater te monitoren en om historische afvoerreeksen te onderzoeken op het voorkomen van laagwater, zijn er drempelwaarden nodig die definiëren wanneer en eventueel in welke mate (intensiteit) er sprake is van laagwater.

### 9.1 Afleiding van een classificatie van laagwateromstandigheden

Er is sprake van laagwater wanneer de actuele afvoer lager is dan een riviertypische drempelwaarde. Als vergelijkende waarde kan daarbij gebruik worden gemaakt van vaste drempelwaarden (dit zijn meestal langjarige MNQ's of soortgelijke parameters), of van in de tijd (in de regel per maand) variërende parameters. Om de omvang van het bekeken laagwater te differentiëren, zijn er opeenvolgende drempelwaarden nodig waarmee de laagwatergebeurtenis kan worden geclassificeerd van "normaal" tot "extreem". Teneinde een synoptisch overzicht van de onderzochte meetpunten aan de Rijn te kunnen weergeven, wordt er voor de classificatie van de laagwateromstandigheden gebruik gemaakt van NM7Q-waarden voor verschillende herhalingsstijden die zijn gerelateerd aan de langjarige referentiemeetreeksen (1961-2010) van de desbetreffende meetpunten. In tabel 20 worden de geselecteerde laagwaterklassen weergegeven met hun intensiteit en naam, inclusief een kleurencode om de onderschrijding van bepaalde laagwaterdrempelwaarden af te beelden.

Tabel 20: Vaststelling van laagwaterklassen

Kleur	Klasse	Intensiteit	Naam
groen	0	$\geq$ NM7Q(T2)	normaal = geen LW
geel	1	$<$ NM7Q(T2)	frequent LW
oranje	2	$<$ NM7Q(T5)	minder frequent LW
rood	3	$<$ NM7Q(T10)	zeldzaam LW
paars	4	$<$ NM7Q(T20)	zeer zeldzaam LW
zwart	5	$<$ NM7Q(T50)	extreem zeldzaam LW

(afgestemd met de IKSMS)

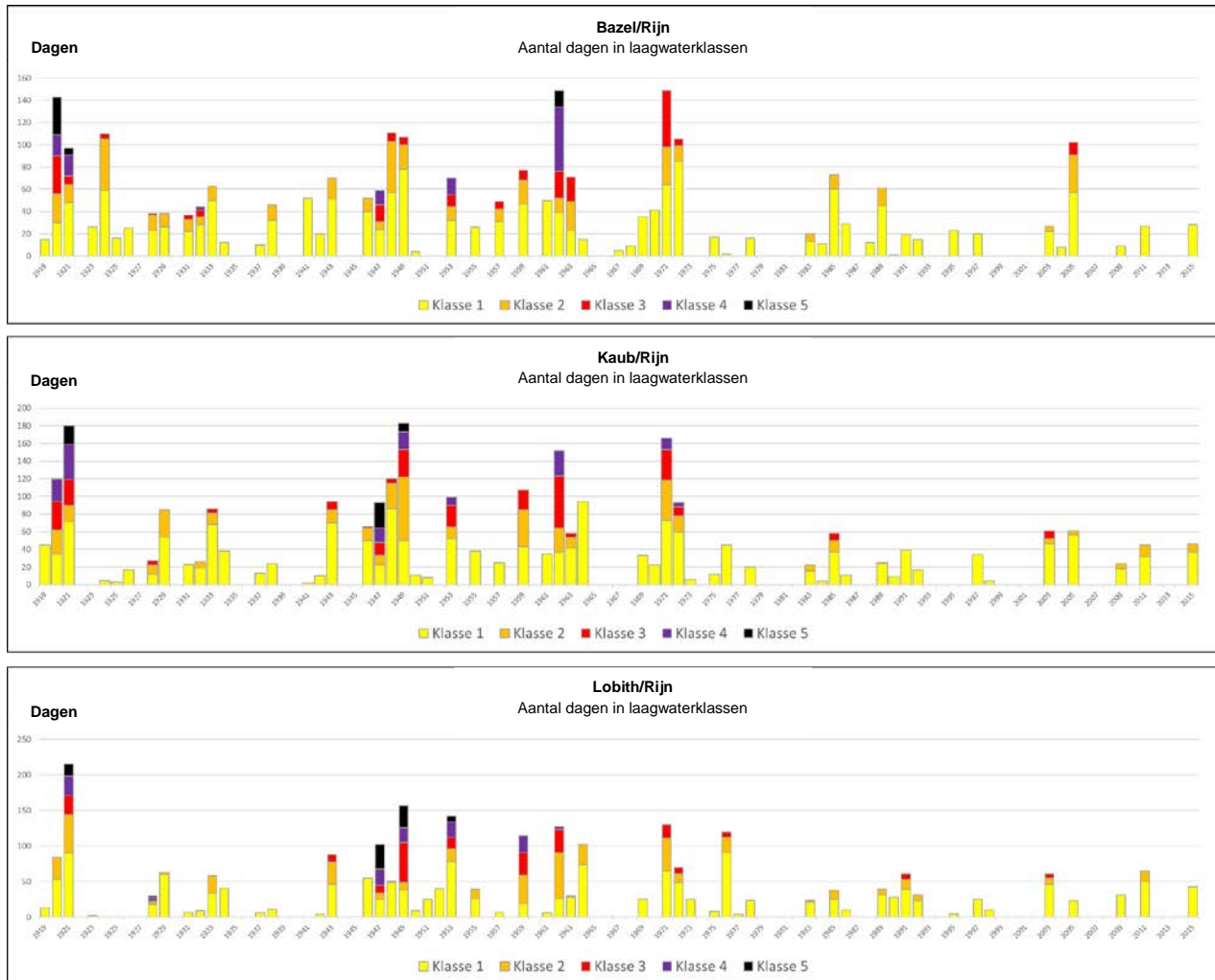
Er sprake is van normale laagwaterafvoeren, zolang de NM7Q met een herhalingsstijd van 2 jaar nog niet is onderschreden. Als deze eerste drempelwaarde wordt onderschreden, wordt de klasse "frequent laagwater" bereikt, zolang de afvoeren niet lager zijn dan een NM7Q met een herhalingsstijd van 5 jaar. Als er zich afvoeren voordoen die lager zijn dan een NM7Q met een herhalingsstijd van 5 jaar, maar nog hoger dan een NM7Q met een herhalingsstijd van 10 jaar, dan wordt de situatie een "minder frequent laagwater" genoemd. Als een NM7Q met een herhalingsstijd van 10 jaar wordt onderschreden, is er sprake van een "zeldzaam laagwater". Onderschrijding van een NM7Q met een herhalingsstijd van 20 jaar leidt tot de benaming "zeer zeldzaam laagwater". De hoogste laagwaterklasse, "extreem zeldzaam laagwater", wordt bereikt als een NM7Q-afvoer met een herhalingsstijd van 50 jaar op het meetpunt in kwestie wordt onderschreden. Deze classificatie is in overleg met de IKSMS vastgesteld, zodat er bijvoorbeeld bij de laagwatermonitoring aan de Moezel door de IKSMS classificaties worden gebruikt die ook aan de Rijn worden toegepast. Het bijbehorende statistische onderzoek voor de afleiding van de parameters die nodig zijn voor de drempelwaarden is beschreven in hoofdstuk 7.3.2. Hier worden in tabel 8 t/m 12 de vereiste NM7Q(T)-waarden voor de meetpunten aan de Rijn genoemd.

Er is voor gekozen om de laagwaterdrempelwaarden niet impliciet te koppelen aan de onderschrijdingsduur van het laagwater, teneinde de drempelwaarden eenvoudig en begrijpelijk te houden. Echter, in het kader van monitoring lijkt het zinvol om naast de bereikte laagwaterklasse ook de actuele duur van de laagwateronderschrijding (in dagen) te volgen.

## 9.2 Validatie van de laagwaterclassificatie aan de hand van historische tijdreeksen

De historische tijdreeksen van de meetpunten zijn met behulp van de laagwaterclassificatie die in het voorgaande hoofdstuk is vastgelegd onderworpen aan een "retrospectieve monitoring".

In figuur 18 is bijvoorbeeld voor de meetpunten Bazel, Kaub en Lobith het jaarlijkse optreden van deze laagwaterklassen inclusief het aantal onderschrijdingsdagen weergegeven. Met deze monitoring kunnen de historische laagwatergebeurtenissen die in hoofdstuk 7.1 en bijlage 2 worden beschreven nog beter worden gevolgd. Andere gebeurtenissen, die tot dusver niet zijn beschreven, worden zichtbaar. In bijlage 4 worden de resultaten van alle onderzochte meetpunten weergegeven. Niet over het hoofd te zien zijn de hoge laagwaterklassen en de over het geheel genomen duidelijk langere laagwatergebeurtenissen in de eerste helft van de vorige eeuw. Op nagenoeg alle meetpunten treden de gebeurtenissen van 1920/1921, 1946-1949, 1962 en 1971 duidelijk op de voorgrond. De meetpunten Bazel en Kaub bereiken over de gehele periode drie keer klasse 5 "extreem zeldzaam laagwater" en het meetpunt Lobith vier keer; echter wel bij verschillende gebeurtenissen. Dit kan worden verklaard door de verschillende afvoerregimes op deze meetpunten. Klasse 4 "zeer zeldzaam laagwater" wordt op het meetpunt Bazel in zes jaren, op het meetpunt Kaub in acht jaren en op het meetpunt Lobith in zeven jaren bereikt. Terwijl er op het meetpunt Bazel in drie jaren sprake was van een totale onderschrijdingsduur van 140 dagen, zijn er op het meetpunt Kaub in vier jaren duidelijk meer dan 140 onderschrijdingsdagen geteld en in twee daarvan zelfs 180. Op het meetpunt Lobith zijn er ook drie keer meer dan 140 onderschrijdingsdagen geweest, in 1921 werd er zelfs een totaal van 215 dagen bereikt. Sinds het midden van de jaren zeventig van de twintigste eeuw zijn de laagwatergebeurtenissen minder intensief. Op het meetpunt Bazel wordt in 2005 één keer klasse 3 "zeldzaam laagwater" bereikt ( $T < 10$  tot 20a), op het meetpunt Kaub is dit twee keer het geval (in 1985 en in 2003) en op het meetpunt Lobith wordt klasse 3 in de jaren 1991 en 2003 bereikt. Na de duidelijk waargenomen gebeurtenis van 2003 doen er zich op het meetpunt Kaub nog vier jaren voor waarin klasse 2 "minder frequent laagwater" wordt bereikt.



Figuur 18: Retrospectieve monitoring op de meetpunten Bazel, Kaub en Lobith

In tabel 21 t/m 23 is het jaargemiddelde aantal dagen met afvoeren in de gedefinieerde laagwaterklassen tegenover elkaar geplaatst voor verschillende decennia en deelperiodes.

Tabel 21: Jaargemiddeld aantal laagwaterdagen op het meetpunt Bazel

Jaar	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5
1921 - 1930	22,3	8,8	1,4	1,9	0,6
1931 - 1940	15,4	4,5	1,0	0,3	0,0
1941 - 1950	32,6	10,6	3,0	1,3	0,0
1951 - 1960	13,6	4,4	2,7	1,5	0,0
1961 - 1970	21,7	3,9	4,6	5,8	1,5
1971 - 1980	18,4	4,8	5,7	0,0	0,0
1981 - 1990	17,1	3,6	0,0	0,0	0,0
1991 - 2000	7,7	0,0	0,0	0,0	0,0
2001 - 2010	9,6	3,9	1,1	0,0	0,0
1921 - 2010	17,6	4,9	2,2	1,2	0,2
1921 - 1960	21,0	7,1	2,0	1,3	0,2
1961 - 2010	14,9	3,2	2,3	1,2	0,3

Tabel 22: Jaargemiddeld aantal laagwaterdagen op het meetpunt Kaub

Jaar	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5
1921 - 1930	16,2	6,0	3,4	4,0	2,1
1931 - 1940	18,5	2,0	0,5	0,0	0,0
1941 - 1950	30,1	14,1	6,2	3,6	3,9
1951 - 1960	16,6	5,5	4,7	0,9	0,0
1961 - 1970	26,3	3,9	6,3	2,9	0,0
1971 - 1980	21,6	6,3	4,5	1,8	0,0
1981 - 1990	10,0	2,1	0,8	0,0	0,0
1991 - 2000	9,4	0,0	0,0	0,0	0,0
2001 - 2010	12,0	1,7	0,9	0,0	0,0
1921 - 2010	17,9	4,6	3,0	1,5	0,7
1921 - 1960	20,4	6,9	3,7	2,1	1,5
1961 - 2010	15,9	2,8	2,5	0,9	0,0

Tabel 23: Jaargemiddeld aantal laagwaterdagen op het meetpunt Lobith

Jaar	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5
1921 - 1930	17.0	6.0	2.9	3.1	2.0
1931 - 1940	10.8	2.4	0.0	0.0	0.0
1941 - 1950	22.6	5.3	7.8	4.4	6.5
1951 - 1960	19.5	7.1	4.8	4.5	0.8
1961 - 1970	15.9	9.5	3.2	0.4	0.0
1971 - 1980	26.6	7.9	3.6	0.0	0.0
1981 - 1990	11.5	2.4	0.0	0.0	0.0
1991 - 2000	10.2	2.2	0.8	0.0	0.0
2001 - 2010	10.0	0.9	0.6	0.0	0.0
1921 - 2010	16.0	4.9	2.6	1.4	1.0
1921 - 1960	17.5	5.2	3.9	3.0	2.3
1961 - 2010	14.8	4.6	1.6	0.1	0.0

In tabel 21 t/m 23 is voor de meetpunten vrijwel dezelfde variatie in de gemiddelde onderschrijdingsduur tussen de decennia zichtbaar. De jaren veertig van de twintigste eeuw waren veruit het meest intensieve laagwaterdecennium. In deze periode deden er zich in Bazel en Kaub ongeveer 300 dagen voor met afvoeren van klasse 1, in Lobith waren het er 226. In Bazel zijn er 106 dagen van klasse 2 geteld, in Kaub 141 en in Lobith slechts 53. Het aantal onderschrijdingsdagen van de laagwaterklassen 3 t/m 5 bedroeg in Kaub 137, veel meer dan de 43 dagen in Bazel, maar minder dan de 187 dagen in Lobith. Het decennium met verreweg de minste laagwatergebeurtenissen waren de jaren negentig van de twintigste eeuw. In Bazel was er in dit decennium op 77 dagen sprake van klasse 1 (Kaub: 94 dagen, Lobith: 102 dagen), klasse 2 werd in Bazel en Kaub niet bereikt, maar in Lobith wel op 22 dagen. In Lobith werd in de jaren negentig van de twintigste eeuw op acht dagen zelfs klasse 3 bereikt, daar was het decennium van 2001 t/m 2010 nog armer aan laagwater dan de jaren negentig.

De vergelijking tussen de deelperiode 1921-1960 en de referentieperiode 1961-2010 verduidelijkt in het bijzonder ook voor de zeldzamere laagwaterklassen 2 t/m 5 op de meetpunten Kaub en Lobith de achteruitgang in het optreden van laagwatersituaties in de recentere referentieperiode.

De controle van de vastgestelde laagwaterdrempelwaarden dan wel laagwaterklassen door middel van een vergelijking met de historische gebeurtenissen bevestigt de geschiktheid van deze drempelwaarden. De laagwaterdrempelwaarden zijn gevoelig genoeg om ook kleinere, maar frequentere gebeurtenissen in de afgelopen veertig jaar te detecteren en daarbij toch te onderscheiden tussen verschillende laagwaterintensiteiten. Tegelijkertijd doen de vastgestelde laagwaterklassen ook recht aan de grote historische gebeurtenissen, die natuurlijk minder vaak worden bereikt, maar vooral bij de weergave van het totale aantal dagen waarop laagwaterdrempelwaarden worden overschreden uit het collectief springen.

Een en ander betekent dat de bevestiging kan worden gegeven dat de vastgestelde laagwaterdrempelwaarden geschikt zijn voor een toekomstige monitoring. Daarbij zou echter naast de laagwaterafvoeren ook het aantal aaneengesloten onderschrijdingsdagen moeten worden gevolgd.

## 10. Conclusies

### Laagwaterafvoerregime van de Rijn

Voor de natuurlijke laagwateromstandigheden zijn de kwantitatieve aandelen uit verschillende deelstroomgebieden van de Rijn van belang. De meetpuntgerelateerde analyse van afvoerwaarden voor een aantal meetpunten langs de Rijn verduidelijkt ook voor de laagwateromstandigheden in de rivier als geheel de betekenis van het afvoeraandeel uit de (Voor-)Alpen. Bovendien zorgt het variërende afvoerregime met in het nivale gedeelte (tot Bazel) minima in de winter en in het pluviale gedeelte (benedenstreams van Worms) minima in de zomer voor een zekere veerkracht tegenover extreme laagwatergebeurtenissen die zich over de gehele Rijn uitstrekken.

De omvang van historische laagwaters varieert in de loop van de Rijn, in het bijzonder als het gaat om extreme gebeurtenissen. Zo kunnen gebeurtenissen die aan de zuidelijke Bovenrijn (Bazel) een herhalingstijd van 100 jaar hebben zich in Lobith hebben afgezwakt tot een gebeurtenis met een herhalingstijd van 15 jaar (maart-mei 1921). Omgekeerd kunnen gebeurtenissen met een gematigde herhalingstijd in Bazel (10 - 40 jaar) zich verder stroomafwaarts richting Duitse Nederrijn tot een gebeurtenis met een herhalingstijd van meer dan 100 jaar ontwikkelen (1947 en 1949). De kleinere laagwatergebeurtenissen in recente tijden laten een veeleer uniforme intensiteit zien (1971: herhalingstijd van 20 - 30 jaar; 1976: 2 - 5 jaar; 1985: 10 jaar; 2003: 5 - 20 jaar; 2011: 10 jaar; 2015: 5 - 10 jaar).

### Invloeden op laagwater

Uit de inventarisatie van de bestaande invloeden op de laagwaterafvoer in de Rijn blijkt dat er wat de aanvoer en onttrekking betreft sprake is van een positieve balans. Bovendien leiden vooral de effecten van het beheer van waterreservoirs in het Alpengebied vanaf de jaren '60-'70 van de twintigste eeuw tot significant hogere laagwaterafvoeren in de periode dat het debiet overeenkomstig het afvoerregime van de Rijn het laagst is, namelijk het winterhalfjaar. Sinds het midden van de jaren '90 wordt er water vanuit het stroomgebied van de Donau naar de Main geleid (het toevoersysteem is in 1999 opgeleverd). Over het geheel genomen overwegen de positieve invloeden op het laagwaterafvoerregime van de Rijn.

### Gevolgen

De inventarisatie van de bestaande gevolgen van laagwater heeft aangetoond dat er diverse economische gevolgen zijn, die evenwel moeilijk kunnen worden gekwantificeerd. Grensoverschrijdende effecten ondervindt de scheepvaart, en de personen en bedrijfstakken die hiervan afhankelijk zijn. Als de afvoer daalt, kunnen waterkrachtcentrales alleen kleinere hoeveelheden stroom produceren. Ecologische nadelen doen zich voornamelijk voor tijdens zomerse laagwaters. Met name in de regionale watersystemen in de Rijndelta bestaat bij laagwater op de Rijn bovendien het risico op zoutindringing en instabiele veendijken.

### Onderzoek naar historische afvoerreksen

De analyse van historische afvoerreksen heeft aangetoond dat de Rijn in de eerste helft van de vorige eeuw te maken had met laagwatergebeurtenissen die duidelijk intensiever waren, lagere afvoeren hadden en langer aanhielden dan de laatste vijftig jaar. Voor de gehele periode van 1901 tot 2010 kan er een significant stijgende trend worden waargenomen in de laagwaterafvoeren in de Rijn van Diepoldsau tot Andernach. Deze trend kan voornamelijk worden toegeschreven aan de invloed van het beheer van waterreservoirs in het Alpengebied. Ook de stijgende tendens in de jaarlijkse neerslag die het Rijnstroomgebied in de twintigste eeuw liet zien, kan hierin een rol spelen. In de periode van 1961 tot 2010 kunnen er geen trends worden ontdekt in de laagwaterafvoeren. De huidige perceptie van laagwatergebeurtenissen wordt enerzijds beïnvloed door de lange afwezigheid van belangrijke laagwaters en anderzijds door de grotere gevolgen.



Op basis van een uitgebreide analyse van historische afvoerreeksen zijn er in overleg met de Internationale Commissies ter Bescherming van de Moezel en de Saar (IKSMS) afvoerge relateerde drempelwaarden voor de classificatie van de laagwatersituatie in de Rijn afgeleid, waarbij er vijf intensiteitsniveaus worden gehanteerd, van "normaal" tot "extreem zeldzaam laagwater". Deze classificatie is toegepast op de historische afvoerreeksen en blijkt geschikt te zijn, aangezien ze een onderscheidende classificatie van laagwatergebeurtenissen oplevert. Extreme gebeurtenissen kunnen duidelijk worden onderscheiden van kleinere gebeurtenissen, zonder dat daarbij de gevoeligheid voor kleinere laagwatergebeurtenissen verloren gaat.

### **Mogelijke toekomstige effecten van klimaatverandering**

Klimaatverandering brengt veranderingen teweeg in laagwaterafvoeren. In de bekeken afvoerprojecties voor de periode 2021-2050 reikt de bandbreedte voor de Rijn van - 10% tot + 10%, hetgeen geen uitsluitel geeft over de ontwikkeling. In de verre toekomst (2071-2100) laten de afvoerprojecties voor het hydrologische zomerhalfjaar steeds duidelijke afnames in de laagwaterafvoeren zien.

In een pessimistisch scenario met dalende laagwaterafvoeren, waarbij de MNM7Q (langjarig gemiddelde laagwaterafvoer over zeven opeenvolgende dagen) in de periode 2021-2050 5 tot 10% afneemt, wordt de daling in de laagwaterafvoeren steeds groter naarmate de herhalingstijd langer wordt (daling van 7 tot 14% voor een laagwaterafvoer die eens in de twee tot vijftig jaar voorkomt). Met de afname in de afvoer gaat een duidelijke toename van de laagwaterduur gepaard.

Laagwatergebeurtenissen in het zomerhalfjaar zouden in de toekomst, in het bijzonder gelet op hun ecologische effecten, steeds belangrijker kunnen worden voor de Rijn. Bij lage afvoeren kunnen de watertemperaturen in de zomer sterker stijgen. Voorbeelden hiervan zijn de laagwatergebeurtenissen van 2003 en 2006. Onderzoek van de ICBR-expertgroep STEMP heeft uitgewezen dat er rekening moet worden gehouden met een stijging van de Rijnwatertemperatuur in de zomer, die in de nabije toekomst 1,5 °C zal bedragen en in de verre toekomst meer dan 3 °C. Voor de nabije en de verre toekomst betekent dit in het bijzonder bij lage afvoeren een toename van het aantal dagen waarop de watertemperatuur van de Rijn hoger is dan 25 °C (ecologisch kritische drempelwaarde).

## Bibliografie

Arbeitskreis KLIWA (2009): Auswirkung des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. KLIWA-rapport 14.

Arbeitskreis KLIWA (2017): Website en project over laagwateradaptatie (*rapport verschijnt waarschijnlijk eind 2017*). <http://www.kliwa.de/hydrologie-niedrigwasser-anpassung.htm>

Beijk, V. (2017): Focus on fresh water supply in the Dutch Rhine Delta. Presentatie CHR-workshop "Low flows in the Rhine catchment", Bazel 20/21 september 2017. [http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session\\_2\\_5\\_fresh\\_water\\_supply\\_in\\_the\\_dutch\\_delta\\_-\\_vincent\\_beijk\\_rws.pdf](http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_2_5_fresh_water_supply_in_the_dutch_delta_-_vincent_beijk_rws.pdf)

Belz, J. (2005): Niedrigwasser-Abflüsse im Rheingebiet im 20. Jahrhundert – Veränderungen und Ursachen. – In: BfG-Veranstaltungen 5/2005 „Erfahrungen zur Niedrigwasserbewirtschaftung“, Koblenz 2005

Belz, J., Brahmer, G., Buiteveld, H., Engel, H., Grabher, R., Hodel, H., Krahe, P., Lammersen, R., Larina, M., Mendel, H. G., Meuser, A., Müller, G., Pfister, L. Plonka, B. en W. van Vuuren (2007): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert – Analyse, Veränderungen, Trends. CHR-rapport I-22, ISBN 978-90-70980-33-7.

BMVI (uitg.) (2015): KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. Eindrapport van het BMVI. Technische conclusies uit de resultaten van het onderzoeksprogramma KLIWAS. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/WS/kliwas-abschlussbericht-des-bmvi-2015-03-12.pdf>

Buck, W.; K. Felkel; H. Gerhard; H. Kalweit; J. van Malde; K.-R. Nippes; B. Ploeger en W. Schmitz (1993): Der Rhein unter der Einwirkung des Menschen - Ausbau, Schifffahrt, Wasserwirtschaft. CHR-rapporten I-11. ISBN 90-70980-17-7.

BfG (Bundesanstalt für Gewässerkunde) (2016): Informatieplatform Undine (o.a. pagina "extreme gebeurtenissen in de Rijn: hoogwater, laagwater"). <http://undine.bafg.de/>

BY- LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) (uitg.) (2016): Niedrigwasser- Informationsdienst Bayern (NID). <https://www.nid.bayern.de/>

BY- LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) (uitg.) (2016): Niedrigwasser in Bayern – Grundlagen, Veränderung und Auswirkungen.

Cammalleri, C. (2017): Drought monitoring and assessment at EU level through a novel low-flow index. Presentatie CHR-workshop "Low flows in the Rhine catchment", Bazel 20/21 september 2017. [http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session\\_3\\_3\\_cammalleri\\_chr\\_sep2017.pdf](http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_3_3_cammalleri_chr_sep2017.pdf)

CHR (1978): Das Rheingebiet – Hydrologische Monographie.

CHR (2017): Report/Summary of „Low flows in the Rhine catchment“ September 20-21, 2017 in Basel, Switzerland - Theme of the international-scientific symposium 'Science meets practice'. <http://www.chr-khr.org/en/event/low-flows-rhine-catchment> and [http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/report\\_symposium\\_basel.pdf](http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/report_symposium_basel.pdf) (summary)

DROUGHT-R&SPI (2015): Fostering European Drought Research and Science-Policy Interfacing. <http://www.eu-drought.org/>

DVWK (1983): Niedrigwasseranalyse, Teil I: Statistische Untersuchung des Niedrigwasser-Abflusses. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. – Regeln zur Wasserwirtschaft, 120.

DVWK (1992): Niedrigwasseranalyse, Teil II: Statistische Untersuchung der Unterschreitungsdauer und des Abflussdefizits. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. – Regeln zur Wasserwirtschaft, 121.

EEA (2009): Water resources across Europe – confronting water scarcity and drought. <https://www.eea.europa.eu/publications/water-resources-across-europe>

Europese Commissie (2007): Mededeling van de Europese Commissie - "De aanpak van waterschaarste en droogte in de Europese Unie" (KOM/2007/0414). <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/?uri=CELEX%3A52007DC0414> en [http://ec.europa.eu/environment/water/adaptation/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/water/adaptation/index_en.htm)

Europese Commissie (2008): Technical Report 023 - Drought management plan report including agricultural, drought indicators and climate change aspects (Water scarcity and droughts expert network) [http://ec.europa.eu/environment/water/quantity/pdf/dmp\\_report.pdf](http://ec.europa.eu/environment/water/quantity/pdf/dmp_report.pdf)

Europese Commissie (2012): Strategy for Water Scarcity and Droughts (policy review part of the "Blueprint to safeguard European waters"). [http://ec.europa.eu/environment/water/quantity/scarcity\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/water/quantity/scarcity_en.htm)  
en

Mededeling van de Europese Commissie - Verslag over de toetsing van het Europese beleid inzake waterschaarste en droogten (COM/2012/0672 final). <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/HTML/?uri=CELEX:52012DC0672&from=EN>

Europese Commissie (2009): Technical Report - 040 – Guidance document No. 24 Common Implementation Strategy (CIS) for the WFD (2000/60/EC) River basin management in a changing climate [https://circabc.europa.eu/sd/a/a88369ef-df4d-43b1-8c8c-306ac7c2d6e1/Guidance%20document%20in%20a%20Changing%20Climate\\_FINAL.pdf](https://circabc.europa.eu/sd/a/a88369ef-df4d-43b1-8c8c-306ac7c2d6e1/Guidance%20document%20in%20a%20Changing%20Climate_FINAL.pdf)

Görgen, K., Beersma, J., Brahmmer, G., Buiteveld, H., Carambia, de Keizer, O., M., Krahe, P., Nilson, E., Lammersen, R., Perrin, C. en D. Volken (2010): Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the River Rhine Basin. Results of the RheinBlick2050 project. CHR-rapport I-23, ISBN 978-90-70980-35-1.

HYDRON (2015): Wasserhaushaltssimulationen mit COSMO-CLM Daten Version 4.8 run 2 und 3 für das Rhein-Einzugsgebiet vom Pegel Worms bis zum Pegel Köln. Rapport (niet gepubliceerd) in opdracht van de Dienst voor milieu van de Duitse deelstaat Rijnland-Palts en de Dienst voor milieu en geologie van de Duitse deelstaat Hessen.

HYDRON (2017): Auswertungen zur zukünftigen Veränderung der Niedrigwassersituation in Rheinland-Pfalz. Rapport (niet gepubliceerd) in opdracht van de Dienst voor milieu van de Duitse deelstaat Rijnland-Palts.

ICBR (2004): Wärmebelastung der Gewässer im Sommer 2003. Zusammenfassung der nationalen Situationsberichte. ICBR-rapport 142. <https://www.iksr.org/> (alleen beschikbaar in het Duits en het Frans)

ICBR (2006): Maatregelen inzake de warmtebelasting van de Rijn tijdens extreem warme en droge periodes. Overzicht en samenstelling van de nationale rapporten. ICBR-rapport 152. <https://www.iksr.org/>

ICBR (2011): Studie naar scenario's voor het afvoerregime van de Rijn. ICBR-rapport 188. <https://www.iksr.org/>

ICBR (2012): Laagwaterperiodes in het Rijnstroomgebied in 2011. ICBR-rapport 198. <https://www.iksr.org/>

ICBR (2013a): Presentatie van de ontwikkeling van de temperatuur van het Rijnwater op basis van gevalideerde temperatuurmetingen in de periode 1978-2011. ICBR-rapport 209. <https://www.iksr.org/>

- ICBR (2013b): Actuele stand van de kennis over mogelijke effecten van veranderingen in het afvoerregime en de watertemperatuur op het ecosysteem van de Rijn en mogelijke handelingsperspectieven. ICBR-rapport 204. <https://www.iksr.org/>
- ICBR (2014): Inschatting van de gevolgen van de klimaatverandering voor de toekomstige ontwikkeling van de temperatuur van het Rijnwater op basis van klimaatscenario's - beknopt rapport. ICBR-rapport 213. <https://www.iksr.org/>
- ICBR (2015): Klimaatadaptatiestrategie van het internationaal Rijndistrict. ICBR-rapport 219. <https://www.iksr.org/>
- ICBR (2016) (intern): Verslag van de bijeenkomst van de centrales voor hoogwaterverwachting aan de Rijn (HWVZ(1)16-02-01)
- ICBR (2017/2018) (intern): Verschillende documenten van de WG H en de EG LW, inventarisatie van de nationale maatregelen en gevolgen, literatuurlijst, enz.
- ICBR (2017): Ecological aspects of low flow. Presentatie CHR-workshop "Low flows in the Rhine catchment", Bazel 20/21 september 2017. [http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session\\_2\\_4\\_gangi\\_ecology.pdf](http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_2_4_gangi_ecology.pdf)
- IKSMS (2009-2013): Grensoverschrijdend project "Hoch- und Niedrigwassermanagement im Mosel- und Saareinzugsgebiet - FLOW MS" (Flood = Hochwasser, LOW water = Niedrigwasser, Moezel en Saar). <http://www.iksms-cipms.org/servlet/is/60264/>
- IKSMS (2014): Rapport van de IKSMS-werkgroep IH over de inventarisatie in verband met de "laagwaterproblematiek". <http://www.iksms-cipms.org/servlet/is/411/Bericht%20Niedrigwasserproblematik.pdf?command=downloadContent&filename=Bericht%20Niedrigwasserproblematik.pdf> (Opmerking: In 2018 wordt er een nieuw rapport verwacht.)
- Ionita Scholz, M. (2017) Monthly and seasonal predictions of Rhine low flows and water levels based on hydrologic, atmospheric and oceanic data. Presentatie CHR-workshop "Low flows in the Rhine catchment", Bazel 20/21 september 2017. [http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session\\_1\\_5\\_ionita-chr\\_basel.pdf](http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_1_5_ionita-chr_basel.pdf)
- JRC (2017): European Drought Observatory – EDO. <http://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1000>
- LAWA (2007): Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement - Material – Stand 5. Februar 2007
- Kohn, I. (2017): European Drought Impact Inventory (EDII) (EU Database). Presentatie CHR-workshop "Low flows in the Rhine catchment", Bazel 20/21 september 2017. [http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session\\_2\\_6\\_edii\\_ikohn\\_chr.pdf](http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_2_6_edii_ikohn_chr.pdf) en <http://www.eu-drought.org/>
- MVW (Ministerie van Verkeer en Waterstaat) (2009a): Waterwet. Nederland, 29 januari 2009. <http://wetten.overheid.nl/BWBR0025458/2018-01-01>
- MVW (Ministerie van Verkeer en Waterstaat) (2009b): Waterbesluit. Nederland, 30 november 2009. <http://wetten.overheid.nl/BWBR0026872/2017-01-01>
- Puygrenier, D. en Antheaume, M. (2017): Impacts of low flows on the (water) energy sector. Presentatie CHR-workshop "Low flows in the Rhine catchment", Bazel 20/21 september 2017. [http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session\\_2\\_7\\_edf\\_chr\\_20170921\\_v3.pdf](http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_2_7_edf_chr_20170921_v3.pdf)
- Regering van het Duitse district Unterfranken (2012): "Alarmplan für den bayerischen, staugeregelten Main – Gewässerökologie" (AMÖ). [https://www.regierung.unterfranken.bayern.de/assets/6/3/2012\\_12\\_04\\_alarmplan\\_main.pdf](https://www.regierung.unterfranken.bayern.de/assets/6/3/2012_12_04_alarmplan_main.pdf)

Stahl, K., Weiler, M., Kohn, I., Freudiger, D., Seibert, J., Vis, K., Gerlinger, K. en M. Böhm (2016): Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels – Synthesebericht. CHR-rapport I-25 (project onder leiding van J. Belz), ISBN 978-90-70980-37-5.

StMUG (ministerie van Milieu en Volksgezondheid van de Duitse deelstaat Beieren) (2011): Wasserbericht Bayern

VN (2013): Capacity Development to support national drought management policies. <http://www.droughtmanagement.info/idmp-activities/capacity-development-to-support-national-drought-management-policies/>

VN-ECE (2017): “International Workshop on Water Scarcity: Taking action in transboundary basins and reducing health impacts”. <https://www.unece.org/index.php?id=43633> en <https://www.unece.org/info/media/news/environment/2018/water-scarcity-taking-action-in-transboundary-basins-and-addressing-health-impacts/doc.html>

Wahliß, W. (2017): Instruments for low flow management in Bavaria based on LAWA-guidance. Presentatie CHR-workshop “Low flows in the Rhine catchment”, Bazel 20/21 september 2017. [http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session\\_3\\_2\\_Wahliß\\_lfm\\_in\\_bavaria.pdf](http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_3_2_Wahliß_lfm_in_bavaria.pdf)

Weingartner, R. (2017): Low water in Switzerland. Presentatie CHR-workshop “Low flows in the Rhine catchment”, Bazel 20/21 september 2017. [http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session\\_1\\_4\\_weingartner\\_low\\_flow\\_basel\\_wg\\_final.pdf](http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_1_4_weingartner_low_flow_basel_wg_final.pdf)

WMO (2009): Manual on Low-flow Estimation and Prediction - Operational Hydrology Report No. 50. WMO-No. 1029. [http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/low-flow\\_estimation\\_prediction/WMO%201029%20en.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/low-flow_estimation_prediction/WMO%201029%20en.pdf)

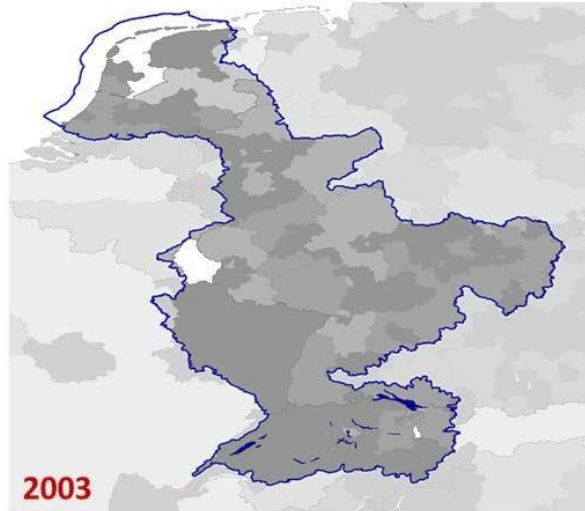
WMO and GWP (2014): Integrated Drought Management Programme (IDMP). <http://www.wmo.int/gfcs/idmp> en <http://www.droughtmanagement.info/find/library/>

Zappa, M. et al. (2017): Some current challenges in setting up and operating sub-seasonal to seasonal predictions of low flows in Switzerland. Presentatie CHR-workshop “Low flows in the Rhine catchment”, Bazel 20/21 september 2017. [http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session\\_1\\_2\\_zappa\\_khr\\_2017\\_basel\\_wsl.pdf](http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_1_2_zappa_khr_2017_basel_wsl.pdf)

## Bijlagen

**Bijlage 1: Vergelijking van de effecten van de laagwatergebeurtenissen van 2003 en 2011 op basis van de European Drought Impact Inventory (EDII) (Kohn, 2017)**

**All regions with reported impact(s) (Countries, NUTS)**



**Specified affected surface waters**



**Most frequently used words**



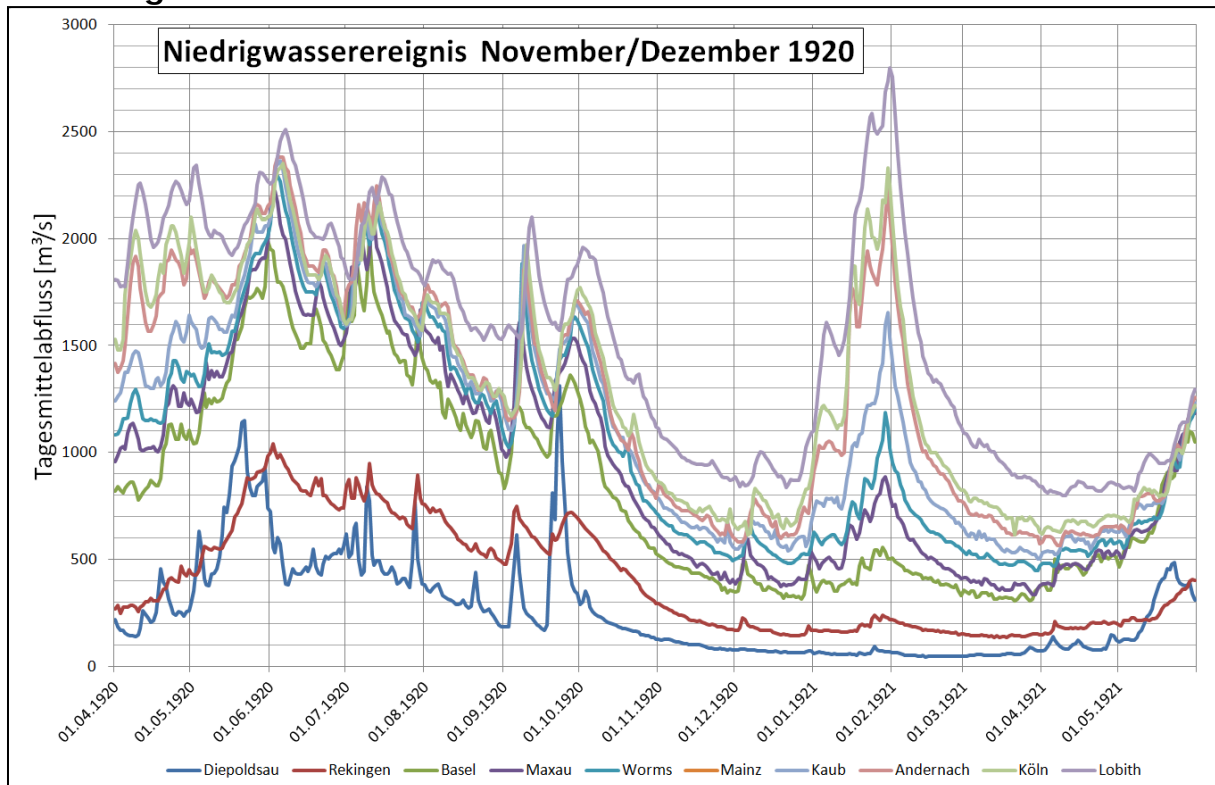
## Bijlage 2: Beschrijving van geselecteerde laagwatergebeurtenissen

**Opmerking:** Naast gegevens over de gebeurtenis van 2003, die in hoofdstuk 7.5 uitgebreid wordt beschreven, beschikt de ICBR ook over gedetailleerde informatie over meteorologische en hydrologische ontwikkelingen en de gevolgen van verschillende gebeurtenissen in Zwitserland.

Zie vertaalsoortbeeld in hoofdstuk 7.1.

### Laagwatergebeurtenis: november/december 1920

#### 1 Afvoergolven:



#### 2 Parameters:

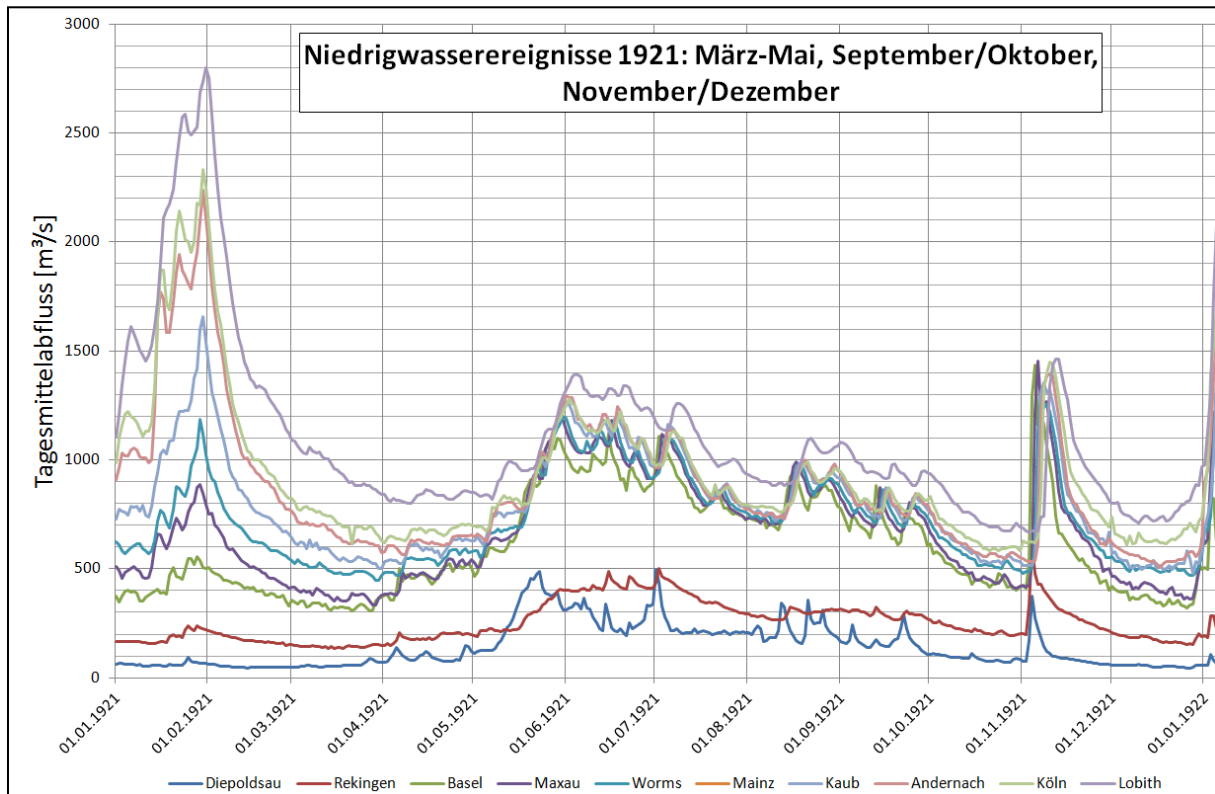
	Laagwaterafvoer [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]			Laagwaterduur [dagen]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q nov/dec 1920	Herhalingstijd nov/dec 1920	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q nov/dec 1920	Herhalingstijd nov/dec 1920
Diepoldsau	92,2	64	15 - 20	4	42	> 50
Rekingen	238	145	50	7	75	> 50
Basel	527	326	100	5	85	> 50
Maxau	645	382	50	5	76	> 50
Worms	720	489	20	5	75	> 50
Mainz	850	-	-	6	-	-
Kaub	851	559	20	6	79	50
Andernach	998	596	50	6	72	50
Keulen	1.028	645	50	6	69	40
Lobith	1.095	858	15	6	60	15

MaxD = maximale duur van een aaneengesloten periode < MNM7Q  
 NM7Q2 = laagwaterafvoer NM7Q met een herhalingstijd van 2 jaar  
 De herhalingstijden hebben betrekking op de referentieperiode 1961-2010



## Laagwatergebeurtenissen in 1921: maart-mei, september/oktober en november/december

### 1 Afvoergolven:



### 2 Parameters:

#### Gebeurtenis maart-mei 1921

	Laagwaterafvoer [m³/s]			Laagwaterduur [dagen]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q mrt- mei 1921	Herhalingstijd mrt-mei 1921	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q mrt-mei 1921	Herhalingstijd mrt-mei 1921
Diepoldsau	92,2	49	100	4	67	> 50
Rekingen	238	138	100	7	108	> 50
Basel	527	318	100	5	95	> 100
Maxau	645	359	60	5	96	> 100
Worms	720	468	30	5	99	> 50
Mainz	850	-		6	-	
Kaub	851	523	50	6	96	> 50
Andernach	998	589	50	6	97	> 100
Keulen	1.028	637	50	6	100	> 100
Lobith	1.095	809	15	6	85	> 50

MaxD = maximale duur van een aaneengesloten periode < MNM7Q  
 NM7Q2 = laagwaterafvoer NM7Q met een herhalingstijd van 2 jaar  
 De herhalingstijden hebben betrekking op de referentieperiode 1961-2010

**Gebeurtenis september/oktober 1921**

	Laagwaterafvoer [m <sup>3</sup> /s]			Laagwaterduur [dagen]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q sep/okt 1921	Herhalingstijd sep/okt 1921	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q sep/okt 1921	Herhalingstijd sep/okt 1921
Diepoldsau	92,2	75	5	4	17	20
Rekingen	238	199	5	7	25	2-5
Bazel	527	414	5-10	5	27	5-10
Maxau	645	420	20	5	33	10
Worms	720	494	20	5	36	10
Mainz	850	-	-	6	-	-
Kaub	851	523	50	6	51	20
Andernach	998	544	100	6	78 *	50 *
Keulen	1.028	590	100	6	119	> 100
Lobith	1.095	682	75	6	79 *	> 50 *

MaxD = maximale duur van een aaneengesloten periode < MNM7Q  
 NM7Q2 = laagwaterafvoer NM7Q met een herhalingstijd van 2 jaar  
 De herhalingstijden hebben betrekking op de referentieperiode 1961-2010

\* De laagwaterperiode werd onderbroken door één dag met afvoer > drempelwaarde, anders zou het herhalingstijd > 100 zijn geweest

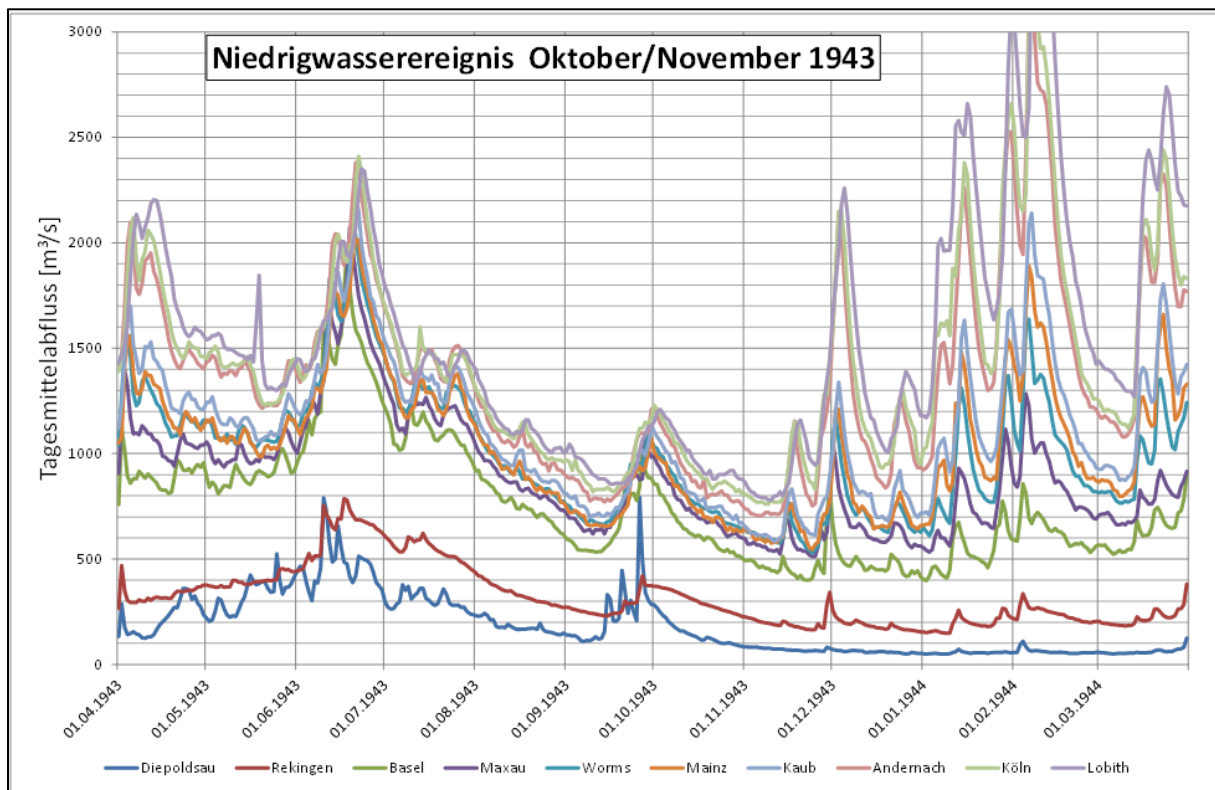
**Gebeurtenis november/december 1921**

	Laagwaterafvoer [m <sup>3</sup> /s]			Laagwaterduur [dagen]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q nov/dec 1921	Herhalingstijd nov/dec 1921	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q nov/dec 1921	Herhalingstijd nov/dec 1921
Diepoldsau	92,2	48	100	4	50	> 100
Rekingen	238	157	20	7	38	5-10
Bazel	527	336	50	5	42	15
Maxau	645	371	50	5	43	15
Worms	720	483	50	5	45	15
Mainz	850	-	-	6	-	-
Kaub	851	509	70	6	48	15
Andernach	998	527	> 100	6	49	15
Keulen	1.028	623	60	6	49	15
Lobith	1.095	729	30	6	45	10

MaxD = maximale duur van een aaneengesloten periode < MNM7Q  
 NM7Q2 = laagwaterafvoer NM7Q met een herhalingstijd van 2 jaar  
 De herhalingstijden hebben betrekking op de referentieperiode 1961-2010

## Laagwatergebeurtenis: oktober/november 1943

### 1 Afvoergolven:



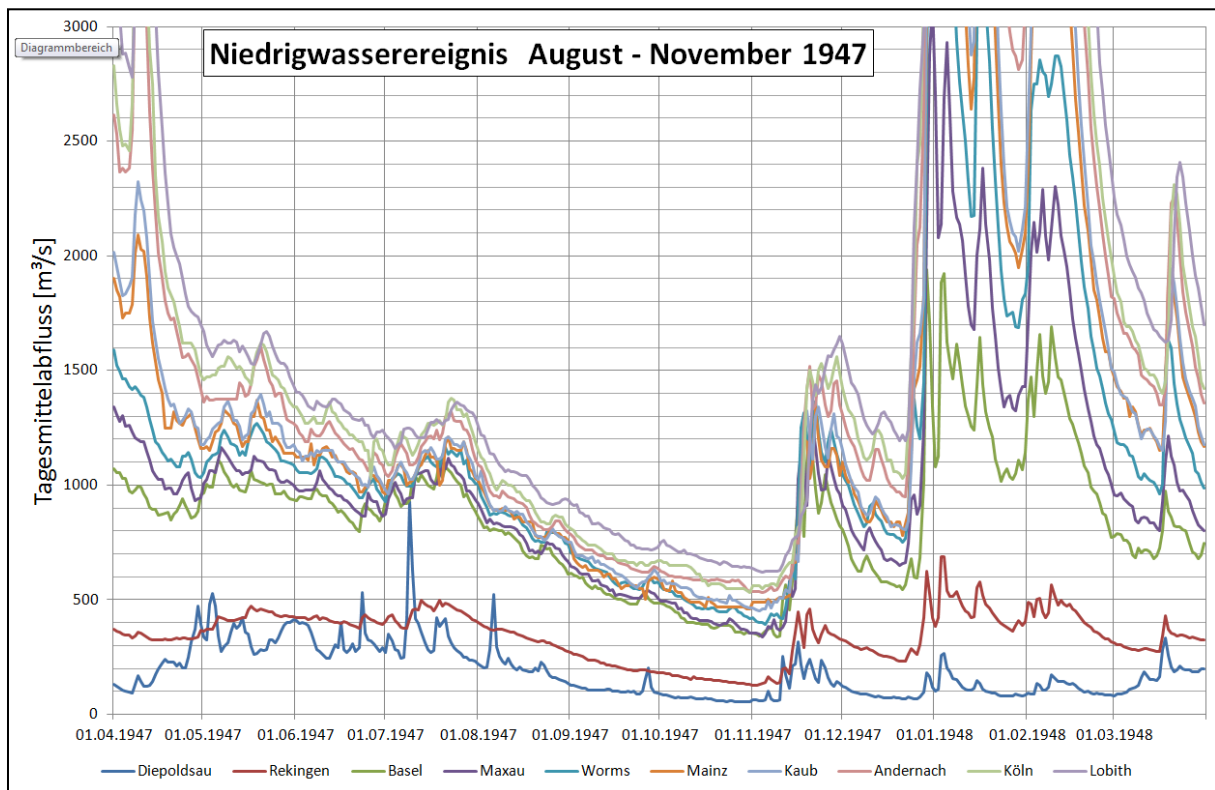
### 2 Parameters:

	Laagwaterafvoer [m³/s]			Laagwaterduur [dagen]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q okt/nov 1943	Herhalingstijd okt/nov 1943	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q okt/nov 1943	Herhalingstijd okt/nov 1943
Diepoldsau	92,2	64	20	4	32	> 100
Rekingen	238	170	15	7	29	5
Bazel	527	410	15	5	38	10
Maxau	645	530	5	5	21	5
Worms	720	556	5-10	5	23	5
Mainz	850	586	20	6	52	20
Kaub	851	601	20	6	49	20
Andernach	998	712	15	6	39	10
Keulen	1.028	769	10	6	37	10
Lobith	1.095	791	15	6	41	5-10

MaxD = maximale duur van een aaneengesloten periode < MNM7Q  
 NM7Q2 = laagwaterafvoer NM7Q met een herhalingstijd van 2 jaar  
 De herhalingstijden hebben betrekking op de referentieperiode 1961-2010

## Laagwatergebeurtenis: augustus-november 1947

### 1 Afvoergolven:



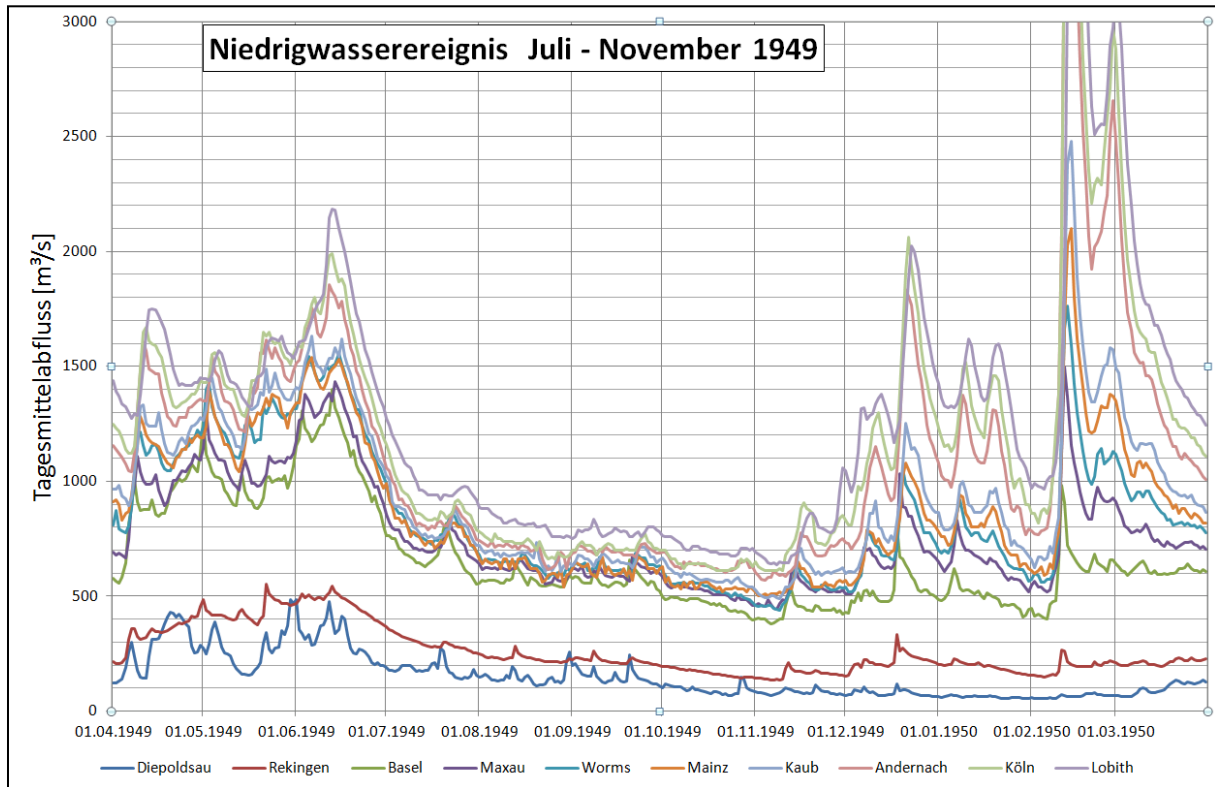
### 2 Parameters:

	Laagwaterafvoer [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]			Laagwaterduur [dagen]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q 1947	Herhalingstijd 1947	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q 1947	Herhalingstijd 1947
Diepoldsau	92,2	55	50	4	41	> 100
Rekingen	238	131	100	7	68	20
Bazel	527	351	40	5	60	55
Maxau	645	353	70	5	75	70
Worms	720	407	70	5	75	> 50
Mainz	850	467	> 100	6	93	> 50
Kaub	851	460	> 100	6	92	>> 50
Andernach	998	536	> 100	6	105	> 100
Keulen	1.028	546	> 100	6	104	> 100
Lobith	1.095	624	> 100	6	104	>> 50

MaxD = maximale duur van een aaneengesloten periode < MNM7Q  
 NM7Q2 = laagwaterafvoer NM7Q met een herhalingstijd van 2 jaar  
 De herhalingstijden hebben betrekking op de referentieperiode 1961-2010

## Laagwatergebeurtenis: juli-november 1949

### 1 Afvoergolven:



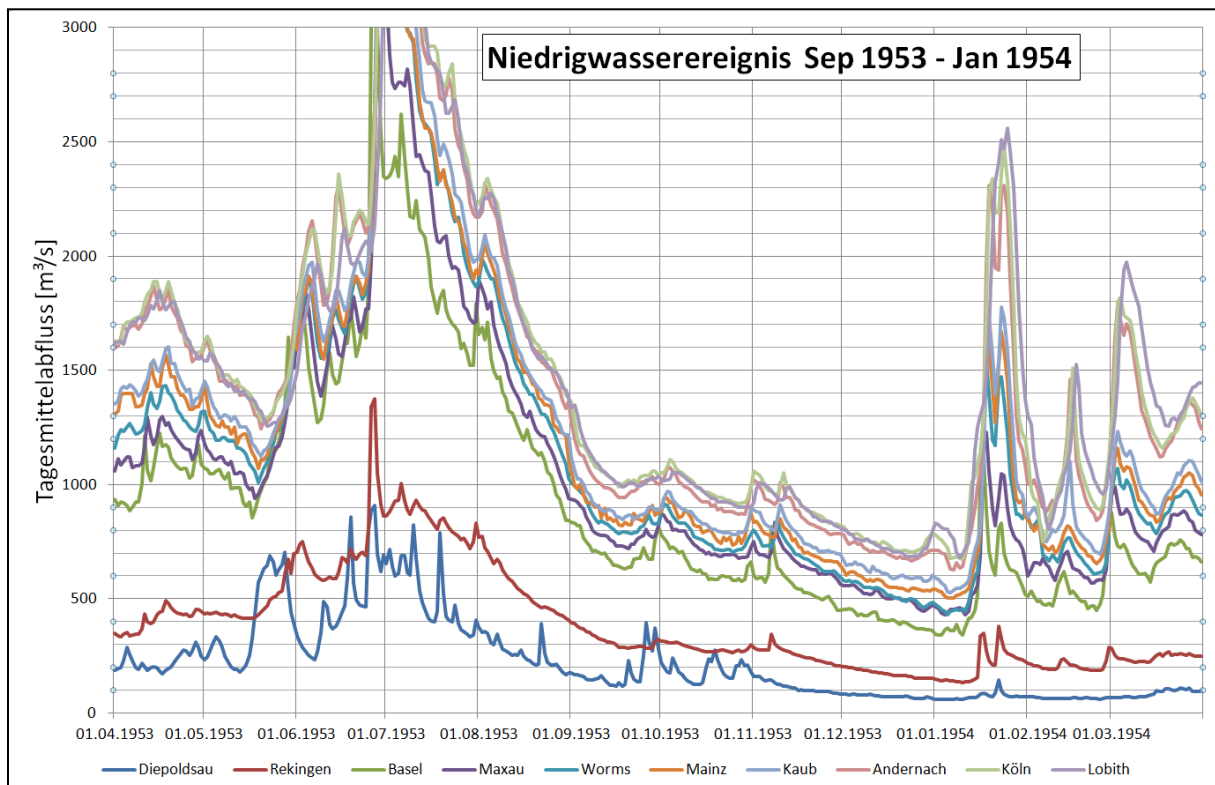
### 2 Parameters:

	Laagwaterafvoer [m³/s]			Laagwaterduur [dagen]		
	MNM7 Q 1961- 2010	NM7Q jul-nov 1949	Herhalingstijd jul-nov 1949	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q jul-nov 1949	Herhalingstijd jul-nov 1949
Diepoldsau	92,2	72	5-10	4	14	10
Rekingen	238	138	100	7	99	> 50
Bazel	527	392	10	5	44	20
Maxau	645	460	10	5	75	> 50
Worms	720	452	35	5	131	>> 50
Mainz	850	506	75	6	169	>> 50
Kaub	851	497	> 100	6	137	>> 50
Andernach	998	587	> 100	6	158	> 100
Keulen	1.028	611	70	6	156	> 100
Lobith	1.095	644	> 100	6	151	>> 50

MaxD = maximale duur van een aaneengesloten periode < MNM7Q  
 NM7Q2 = laagwaterafvoer NM7Q met een herhalingstijd van 2 jaar  
 De herhalingstijden hebben betrekking op de referentieperiode 1961-2010

## Laagwatergebeurtenis: van september 1953 tot januari 1954

### 1 Afvoergolven:



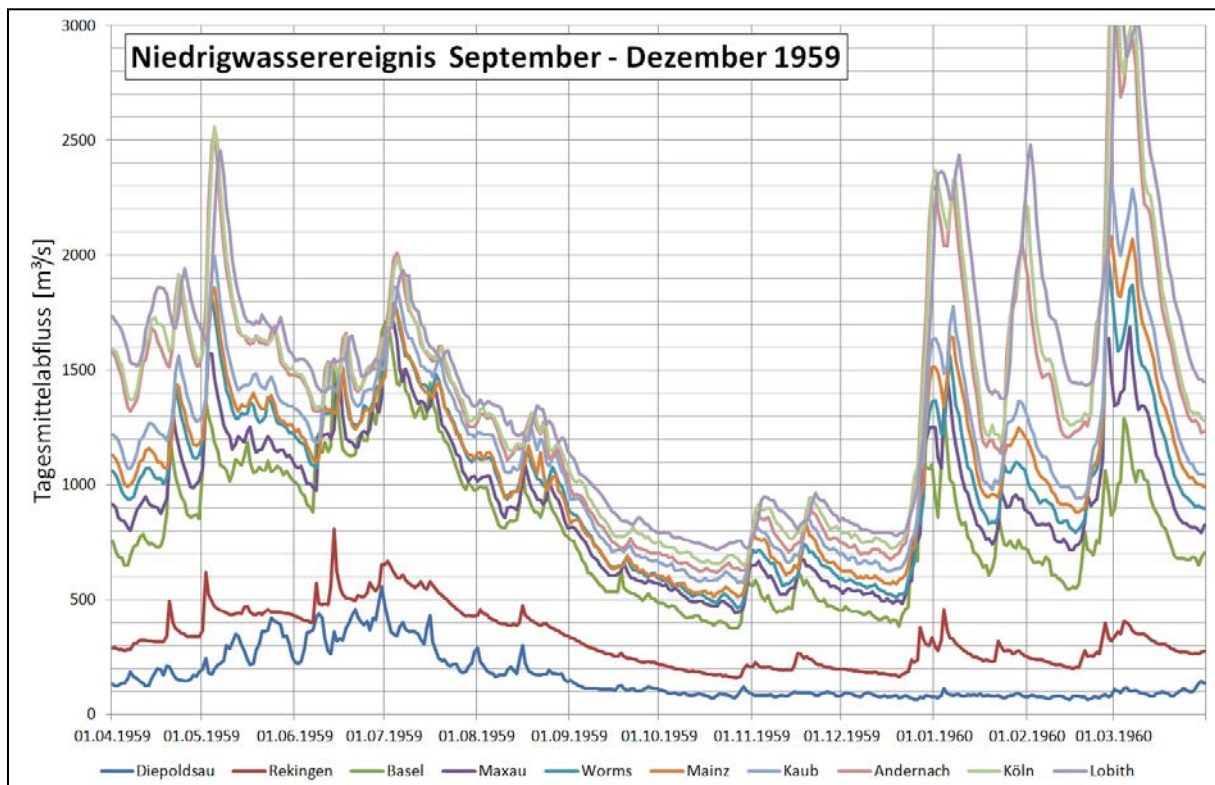
### 2 Parameters:

	Laagwaterafvoer [m <sup>3</sup> /s]			Laagwaterduur [dagen]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q sep 1953 - jan 1954	Herhalingstijd sep 1953 - jan 1954	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q sep 1953 - jan 1954	Herhalingstijd sep 1953 - jan 1954
Diepoldsau	92,2	60	25	4	50	> 100
Rekingen	238	137	100	7	56	10-20
Bazel	527	354	35	5	59	> 50
Maxau	645	446	15	5	60	50
Worms	720	447	40	5	63	40
Mainz	850	511	70	6	67	35
Kaub	851	542	40	6	66	35
Andernach	998	650	30	6	66	40
Keulen	1.028	689	30	6	63	40
Lobith	1.095	690	60	6	126	>> 50

MaxD = maximale duur van een aaneengesloten periode < MNM7Q  
 NM7Q2 = laagwaterafvoer NM7Q met een herhalingstijd van 2 jaar  
 De herhalingstijden hebben betrekking op de referentieperiode 1961-2010

## Laagwatergebeurtenis: september-december 1959

### 1 Afvoergolven:



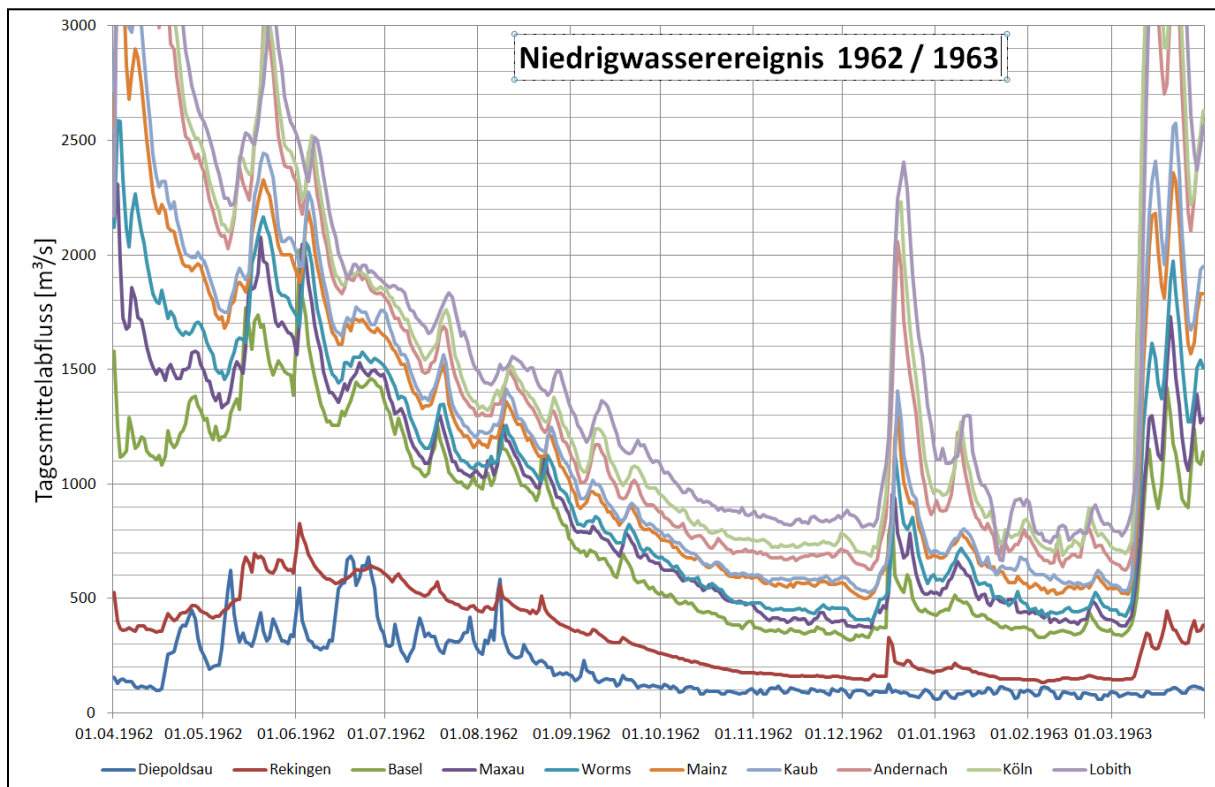
### 2 Parameters:

	Laagwaterafvoer [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]			Laagwaterduur [dagen]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q sep- dec 1959	Herhalingstijd sep-dec 1959	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q sep-dec 1959	Herhalingstijd sep-dec 1959
Diepoldsau	92,2	72	10	4	43	> 100
Rekingen	238	165	20	7	54	10-20
Bazel	527	386	20	5	32	5-10
Maxau	645	462	15	5	42	15
Worms	720	492	20	5	68	50
Mainz	850	529	55	6	113	>> 50
Kaub	851	586	20	6	72	50
Andernach	998	625	40	6	115	> 100
Keulen	1.028	661	35	6	114	> 100
Lobith	1.095	726	35	6	115	>> 50

MaxD = maximale duur van een aaneengesloten periode < MNM7Q  
 NM7Q2 = laagwaterafvoer NM7Q met een herhalingstijd van 2 jaar  
 De herhalingstijden hebben betrekking op de referentieperiode 1961-2010

## Laagwatergebeurtenis: oktober-december 1962

### 1 Afvoergolven:



### 2 Parameters:

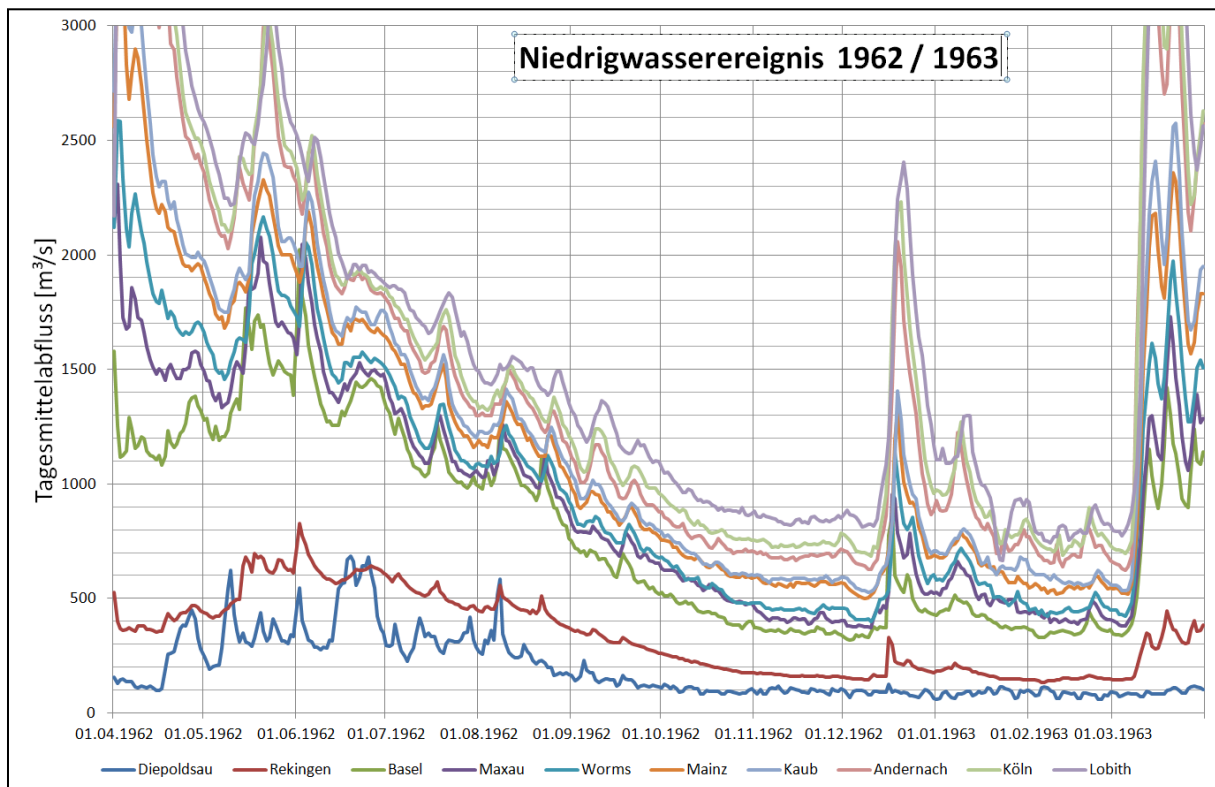
	Laagwaterafvoer [m <sup>3</sup> /s]			Laagwaterduur [dagen]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q okt- dec 1962	Herhalingstijd okt-dec 1962	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q okt-dec 1962	Herhalingstijd okt-dec 1962
Diepoldsau	92,2	88	2-5	4	8	2-5
Rekingen	238	148	50	7	82	50
Bazel	527	330	65	5	77	75
Maxau	645	378	50	5	77	75
Worms	720	408	70	5	84	> 50
Mainz	850	512	70	6	85	> 50
Kaub	851	535	50	6	85	> 50
Andernach	998	642	30	6	84	50
Keulen	1.028	702	20	6	82	40
Lobith	1.095	824	10-15	6	76	40

MaxD = maximale duur van een aaneengesloten periode < MNM7Q  
 NM7Q2 = laagwaterafvoer NM7Q met een herhalingstijd van 2 jaar  
 De herhalingstijden hebben betrekking op de referentieperiode 1961-2010



## Laagwatergebeurtenis: januari-maart 1963

### 1 Afvoergolven:



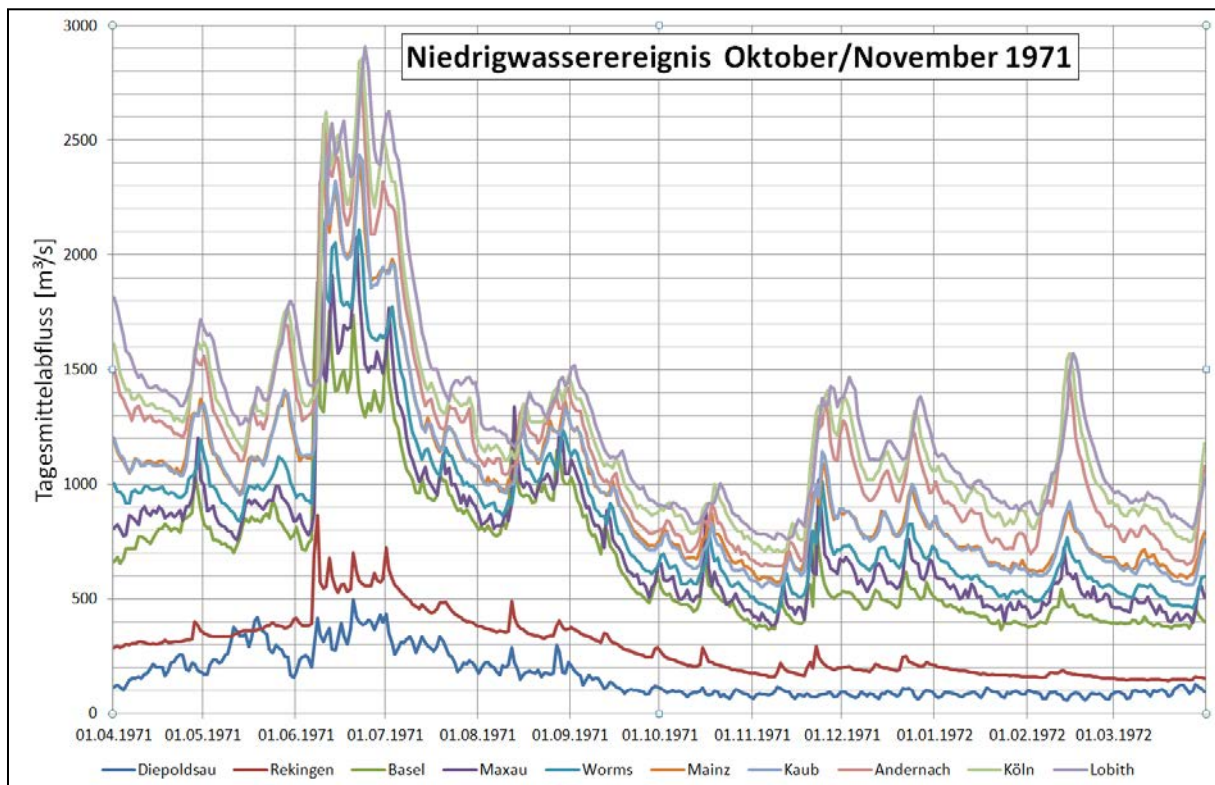
### 2 Parameters:

	Laagwaterafvoer [m <sup>3</sup> /s]			Laagwaterduur [dagen]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q jan- mrt 1963	Herhalingstijd jan-mrt 1963	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q jan-mrt 1963	Herhalingstijd jan-mrt 1963
Diepoldsau	92,2	73	5-10	4	38	> 100
Rekingen	238	139	65	7	68	20
Bazel	527	338	55	5	68	> 50
Maxau	645	394	35	5	60	50
Worms	720	434	50	5	73	> 50
Mainz	850	530	50	6	74	40
Kaub	851	547	40	6	72	50
Andernach	998	645	30	6	56	30
Keulen	1.028	712	20	6	55	20
Lobith	1.095	765	20	6	55	15

MaxD = maximale duur van een aaneengesloten periode < MNM7Q  
 NM7Q2 = laagwaterafvoer NM7Q met een herhalingstijd van 2 jaar  
 De herhalingstijden hebben betrekking op de referentieperiode 1961-2010

## Laagwatergebeurtenis: oktober/november 1971

### 1 Afvoergolven:



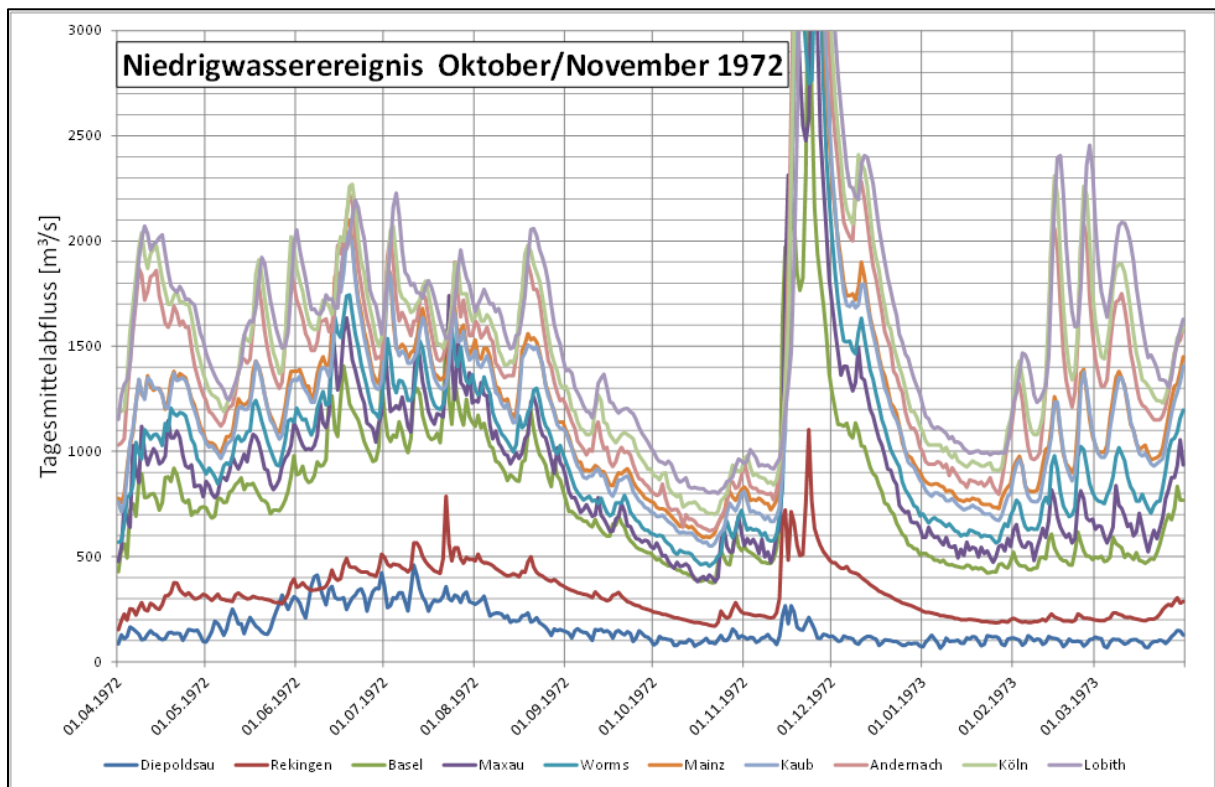
### 2 Parameters:

	Laagwaterafvoer [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]			Laagwaterduur [dagen]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q okt/nov 1971	Herhalingstijd okt/nov 1971	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q okt/nov 1971	Herhalingstijd okt/nov 1971
Diepoldsau	92,2	77	5	4	17	20
Rekingen	238	166	20	7	57	10-20
Basel	527	374	20	5	33	10
Maxau	645	404	30	5	52	30
Worms	720	462	30	5	34	10
Mainz	850	585	25	6	33	5-10
Kaub	851	562	35	6	62	30
Andernach	998	643	30	6	64	35
Keulen	1.028	713	20	6	62	35
Lobith	1.095	771	20	6	63	15

MaxD = maximale duur van een aaneengesloten periode < MNM7Q  
 NM7Q2 = laagwaterafvoer NM7Q met een herhalingstijd van 2 jaar  
 De herhalingstijden hebben betrekking op de referentieperiode 1961-2010

## Laagwatergebeurtenis: oktober/november 1972

### 1 Afvoergolven:



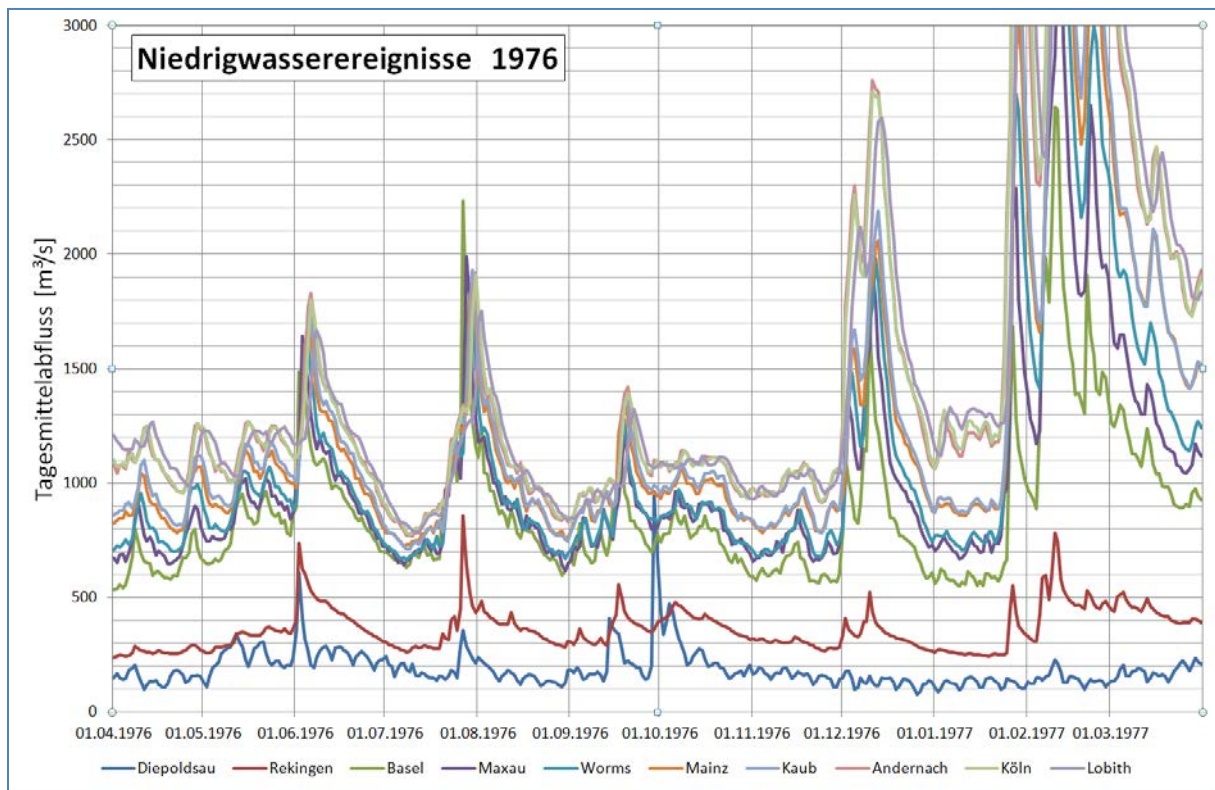
### 2 Parameters:

	Laagwaterafvoer [m <sup>3</sup> /s]			Laagwaterduur [dagen]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q okt/nov 1972	Herhalingstijd okt/nov 1972	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q okt/nov 1972	Herhalingstijd okt/nov 1972
Diepoldsau	92,2	90	2	4	3	2
Rekingen	238	178	10	7	27	5
Basel	527	384	10	5	44	15
Maxau	645	395	35	5	37	15
Worms	720	467	30	5	38	15
Mainz	850	585	25	6	50	15
Kaub	851	565	30	6	51	15
Andernach	998	634	35	6	52	20
Keulen	1.028	712	20	6	50	20
Lobith	1.095	810	15	6	49	10

MaxD = maximale duur van een aaneengesloten periode < MNM7Q  
 NM7Q2 = laagwaterafvoer NM7Q met een herhalingstijd van 2 jaar  
 De herhalingstijden hebben betrekking op de referentieperiode 1961-2010

## Laagwatergebeurtenissen: juli 1976, augustus/september 1976 en oktober/november 1976

### 1 Afvoergolven:



### 2 Parameters:

#### Gebeurtenis: juli 1976

	Laagwaterafvoer [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]			Laagwaterduur [dagen]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q juli 1976	Herhalingstijd juli 1976	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q juli 1976	Herhalingstijd juli 1976
Diepoldsau	92,2	149	< 2	4	0	-
Rekingen	238	272	< 2	7	0	-
Bazel	527	656	< 2	5	0	-
Maxau	645	665	< 2	5	0	-
Worms	720	678	2-5	5	11	2-5
Mainz	850	739	2-5	6	22	5
Kaub	851	729	2-5	6	20	5
Andernach	998	782	5-10	6	23	5
Keulen	1.028	796	5-10	6	25	5
Lobith	1.095	802	15	6	29	5

MaxD = maximale duur van een aaneengesloten periode < MNM7Q  
 NM7Q2 = laagwaterafvoer NM7Q met een herhalingstijd van 2 jaar  
 De herhalingstijden hebben betrekking op de referentieperiode 1961-2010

**Gebeurtenis: augustus/september 1976**

	Laagwaterafvoer [m <sup>3</sup> /s]			Laagwaterduur [dagen]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q aug/sep 1976	Herhalingstijd aug/sep 1976	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q aug/sep 1976	Herhalingstijd aug/sep 1976
Diepoldsau	92,2	125	< 2	4	0	-
Rekingen	238	295	< 2	7	0	-
Bazel	527	638	< 2	5	0	-
Maxau	645	663	< 2	5	2	< 2
Worms	720	694	< 2	5	8	2-5
Mainz	850	778	2-5	6	10	2-5
Kaub	851	770	2-5	6	10	2-5
Andernach	998	843	2-5	6	27	5
Keulen	1.028	851	2-5	6	32	5-10
Lobith	1.095	853	5-10	6	38	5-10

MaxD = maximale duur van een aaneengesloten periode < MNM7Q  
 NM7Q2 = laagwaterafvoer NM7Q met een herhalingstijd van 2 jaar  
 De herhalingstijden hebben betrekking op de referentieperiode 1961-2010

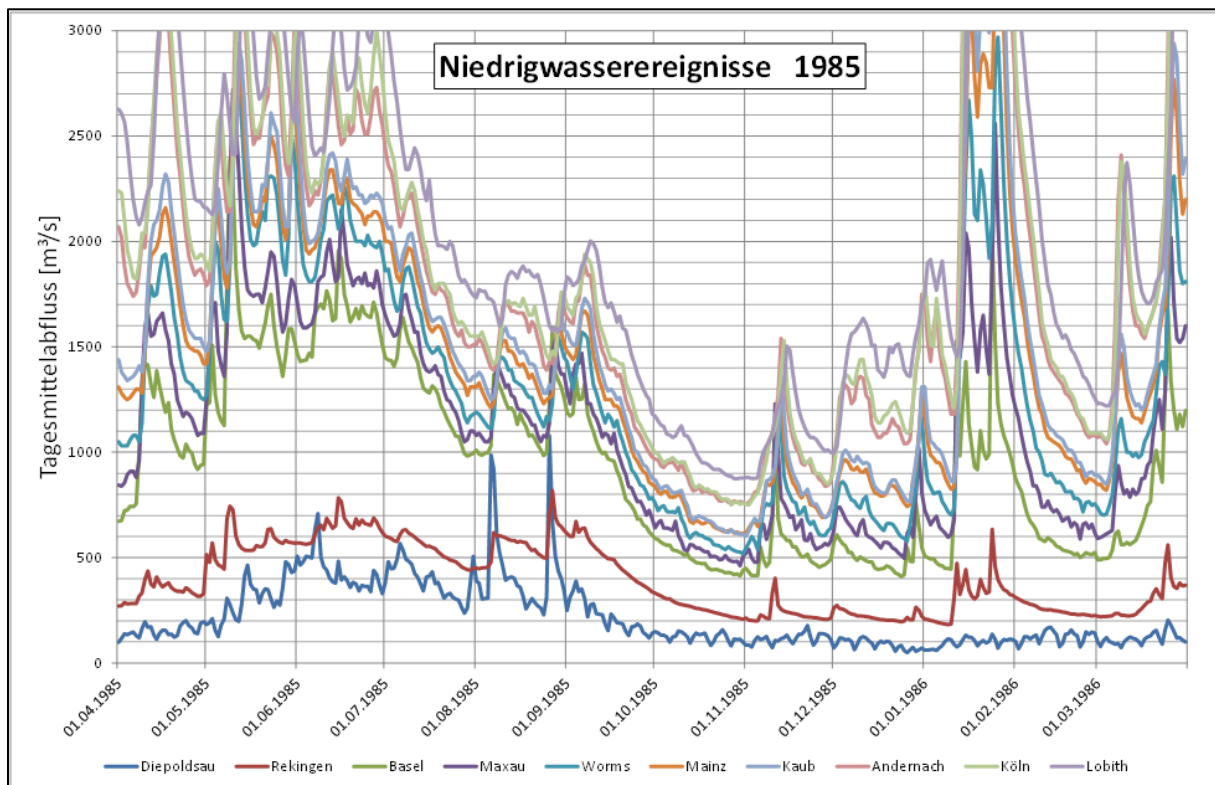
**Gebeurtenis: oktober/november 1976**

	Laagwaterafvoer [m <sup>3</sup> /s]			Laagwaterduur [dagen]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q okt/nov 1976	Herhalingstijd okt/nov 1976	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q okt/nov 1976	Herhalingstijd okt/nov 1976
Diepoldsau	92,2	137	< 2	4	0	-
Rekingen	238	274	< 2	7	0	-
Bazel	527	581	< 2	5	0	-
Maxau	645	681	< 2	5	0	-
Worms	720	694	2-5	5	9	2-5
Mainz	850	802	2-5	6	15	2-5
Kaub	851	809	2-5	6	15	2-5
Andernach	998	949	2-5	6	16	2-5
Keulen	1.028	955	2-5	6	18	2-5
Lobith	1.095	955	2-5	6	38	5-10

MaxD = maximale duur van een aaneengesloten periode < MNM7Q  
 NM7Q2 = laagwaterafvoer NM7Q met een herhalingstijd van 2 jaar  
 De herhalingstijden hebben betrekking op de referentieperiode 1961-2010

## Laagwatergebeurtenis: oktober/november 1985

### 1 Afvoergolven:



### 2 Parameters:

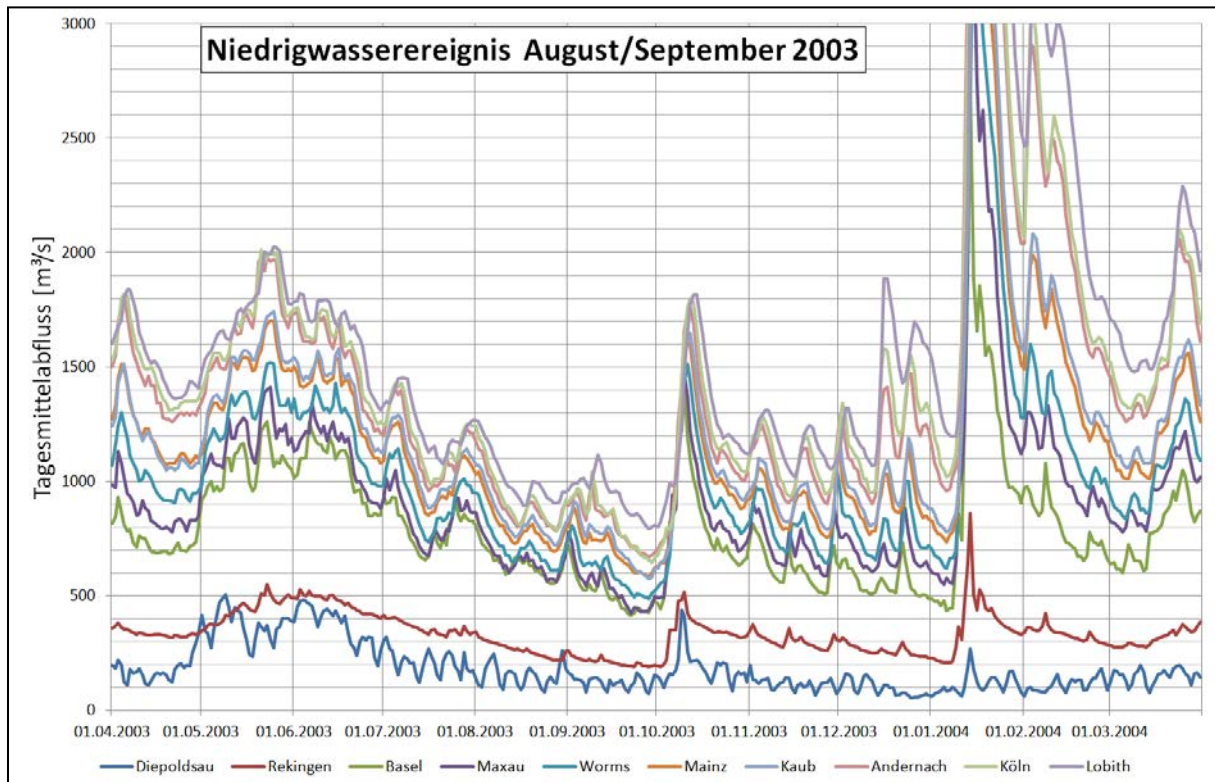
	Laagwaterafvoer [m <sup>3</sup> /s]			Laagwaterduur [dagen]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q okt/nov 1985	Herhalingstijd okt/nov 1985	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q okt/nov 1985	Herhalingstijd okt/nov 1985
Diepoldsau	92,2	96	< 2	4	3	2
Rekingen	238	206	5	7	19	2-5
Basel	527	425	5	5	27	5-10
Maxau	645	486	10	5	29	5-10
Worms	720	534	10	5	28	5-10
Mainz	850	620	15	6	39	10
Kaub	851	616	15	6	37	10
Andernach	998	763	10	6	39	10
Keulen	1.028	756	10	6	40	10
Lobith	1.095	877	5-10	6	31	5-10

MaxD = maximale duur van een aaneengesloten periode < MNM7Q  
 NM7Q2 = laagwaterafvoer NM7Q met een herhalingstijd van 2 jaar  
 De herhalingstijden hebben betrekking op de referentieperiode 1961-2010

## Laagwatergebeurtenis: augustus/september 2003

(zie hoofdstuk 7.5 voor een gedetailleerde beschrijving)

### 1 Afvoergolven:



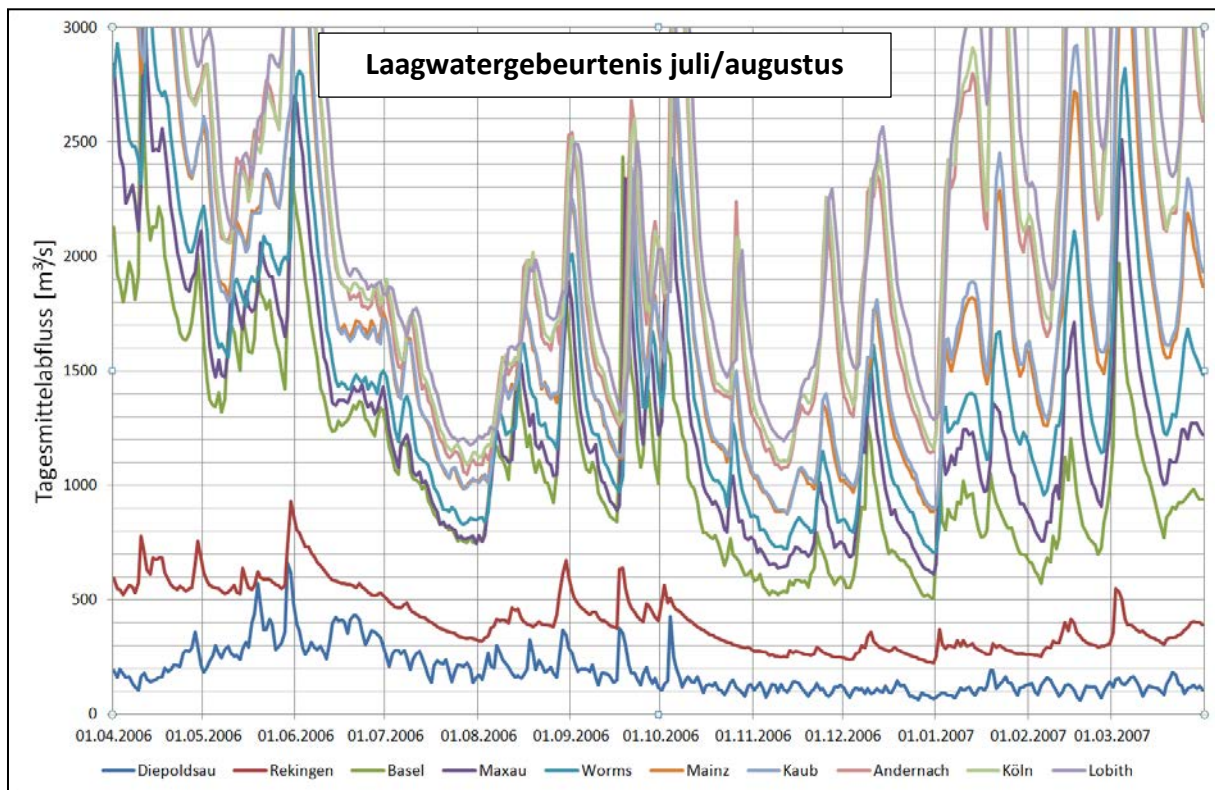
### 2 Parameters:

	Laagwaterafvoer [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]			Laagwaterduur [dagen]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q sep 2003	Herhalingstijd sep 2003	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q sep 2003	Herhalingstijd sep 2003
Diepoldsau	92,2	108	< 2	4	2	< 2
Rekingen	238	193	5	7	22	2-5
Basel	527	431	5	5	20	5
Maxau	645	435	20	5	31	5-10
Worms	720	500	15	5	31	5-10
Mainz	850	596	20	6	33	5-10
Kaub	851	595	20	6	32	5-10
Andernach	998	682	20	6	62	30
Keulen	1.028	666	35	6	33	5-10
Lobith	1.095	808	15	6	34	5-10

MaxD = maximale duur van een aaneengesloten periode < MNM7Q  
 NM7Q2 = laagwaterafvoer NM7Q met een herhalingstijd van 2 jaar  
 De herhalingstijden hebben betrekking op de referentieperiode 1961-2010

## Laagwatergebeurtenis: juli/augustus 2006

### 1 Afvoergolven:



### 2 Parameters:

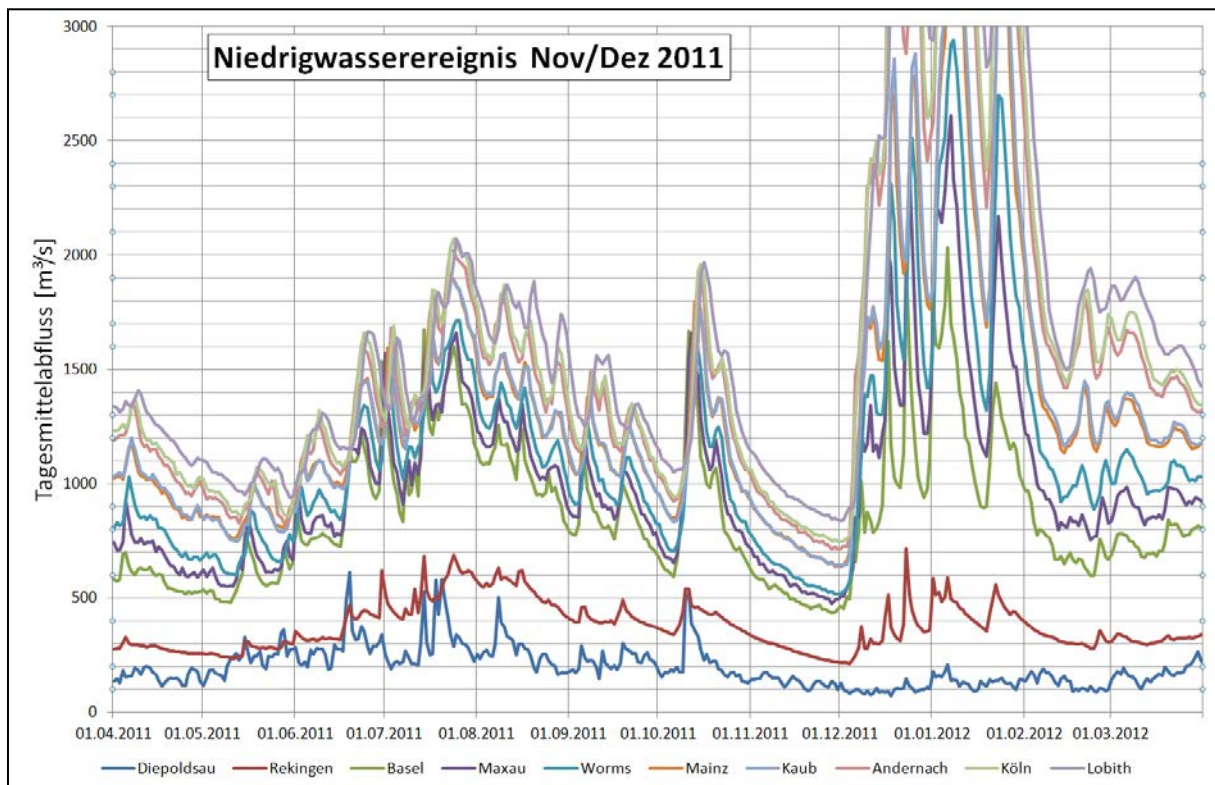
	Laagwaterafvoer [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]			Laagwaterduur [dagen]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q jul-aug 2006	Herhalingstijd jul-aug 2006	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q jul-aug 2006	Herhalingstijd jul-aug 2006
Diepoldsau	92,2	178	< 2	4	0	-
Rekingen	238	329	< 2	7	0	-
Bazel	527	756	< 2	5	0	-
Maxau	645	766	< 2	5	0	-
Worms	720	845	< 2	5	0	-
Mainz	850	1.008	< 2	6	0	-
Kaub	851	1.008	< 2	6	0	-
Andernach	998	1.084	< 2	6	0	-
Keulen	1.028	1.120	< 2	6	0	-
Lobith	1.095	1.190	< 2	6	0	-

MaxD = maximale duur van een aaneengesloten periode < MNM7Q  
 NM7Q2 = laagwaterafvoer NM7Q met een herhalingstijd van 2 jaar  
 De herhalingstijden hebben betrekking op de referentieperiode 1961-2010



## Laagwatergebeurtenis: november/december 2011

### 1 Afvoergolven:



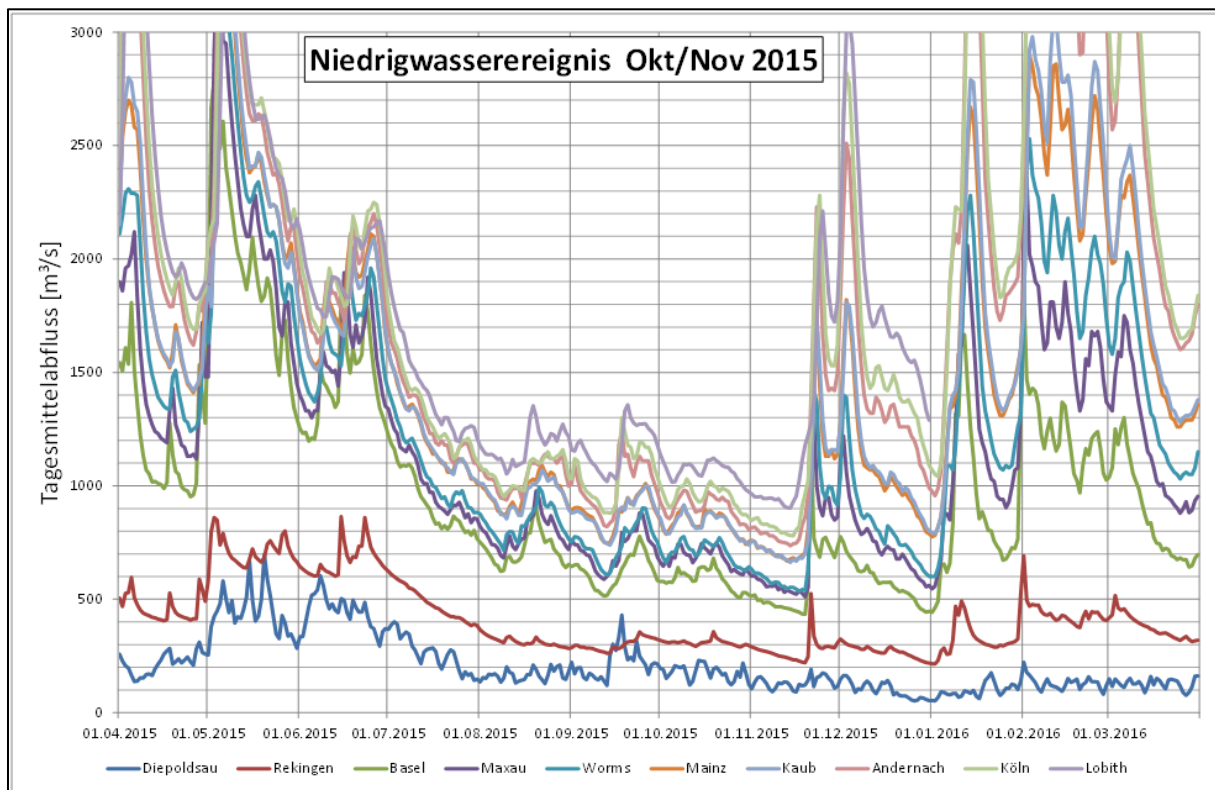
### 2 Parameters:

	Laagwaterafvoer [m³/s]			Laagwaterduur [dagen]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q nov/dec 2011	Herhalingstijd nov/dec 2011	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q nov/dec 2011	Herhalingstijd nov/dec 2011
Diepoldsau	92,2	92	2	4	2	< 2
Rekingen	238	218	2	7	13	2-5
Basel	527	447	5	5	23	5
Maxau	645	495	5-10	5	30	5-10
Worms	720	523	10	5	32	5-10
Mainz	850	647	10	6	30	5-10
Kaub	851	645	10	6	30	5-10
Andernach	998	721	10	6	32	5-10
Keulen	1.028	751	10	6	33	5-10
Lobith	1.095	848	10	6	33	5-10

MaxD = maximale duur van een aaneengesloten periode < MNM7Q  
 NM7Q2 = laagwaterafvoer NM7Q met een herhalingstijd van 2 jaar  
 De herhalingstijden hebben betrekking op de referentieperiode 1961-2010

## Laagwatergebeurtenis: oktober/november 2015

### 1 Afvoergolven:



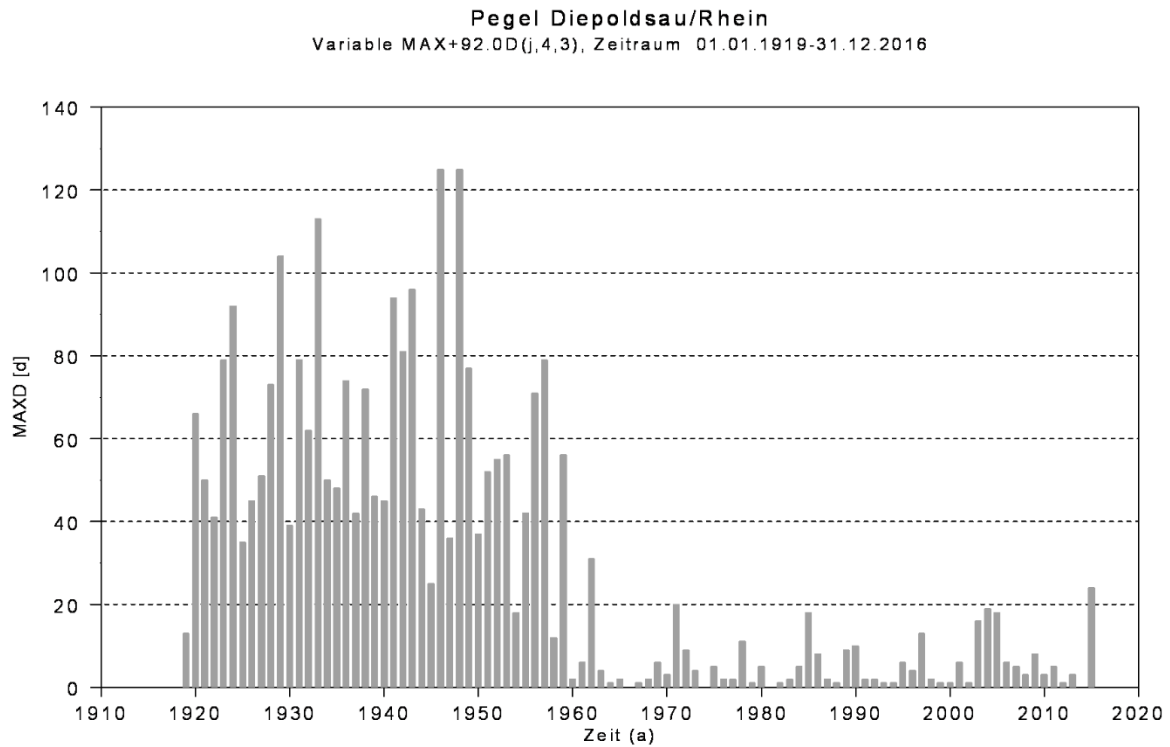
### 2 Parameters:

	Laagwaterafvoer [m³/s]			Laagwaterduur [dagen]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q okt/nov 2015	Herhalingstijd okt/nov 2015	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q okt/nov 2015	Herhalingstijd okt/nov 2015
Diepoldsau	92,2	115	< 2	4	1	< 2
Rekingen	238	231	2	7	5	< 2
Bazel	527	447	5	5	20	5-10
Maxau	645	528	5	5	27	5-10
Worms	720	545	10	5	29	5-10
Mainz	850	678	5-10	6	28	5-10
Kaub	851	675	5-10	6	28	5-10
Andernach	998	747	5-10	6	51	20
Keulen	1.028	792	5-10	6	41	15
Lobith	1.095	922	5-10	6	27	5

MaxD = maximale duur van een aaneengesloten periode < MNM7Q  
 NM7Q2 = laagwaterafvoer NM7Q met een herhalingstijd van 2 jaar  
 De herhalingstijden hebben betrekking op de referentieperiode 1961-2010

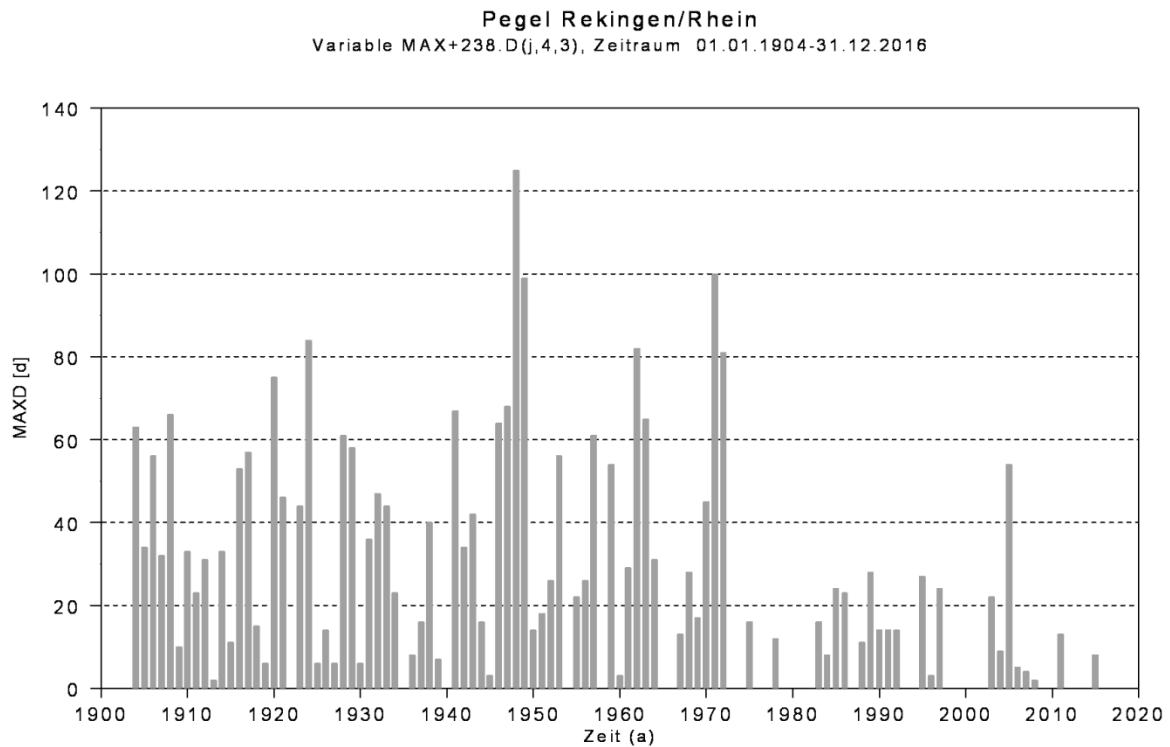
### Bijlage 3: Weergave van de laagwaterduur (max D)

*Niet vertaald; zie legenda in hoofdstuk 7.4*



HyStat HQ/NQ 3.0

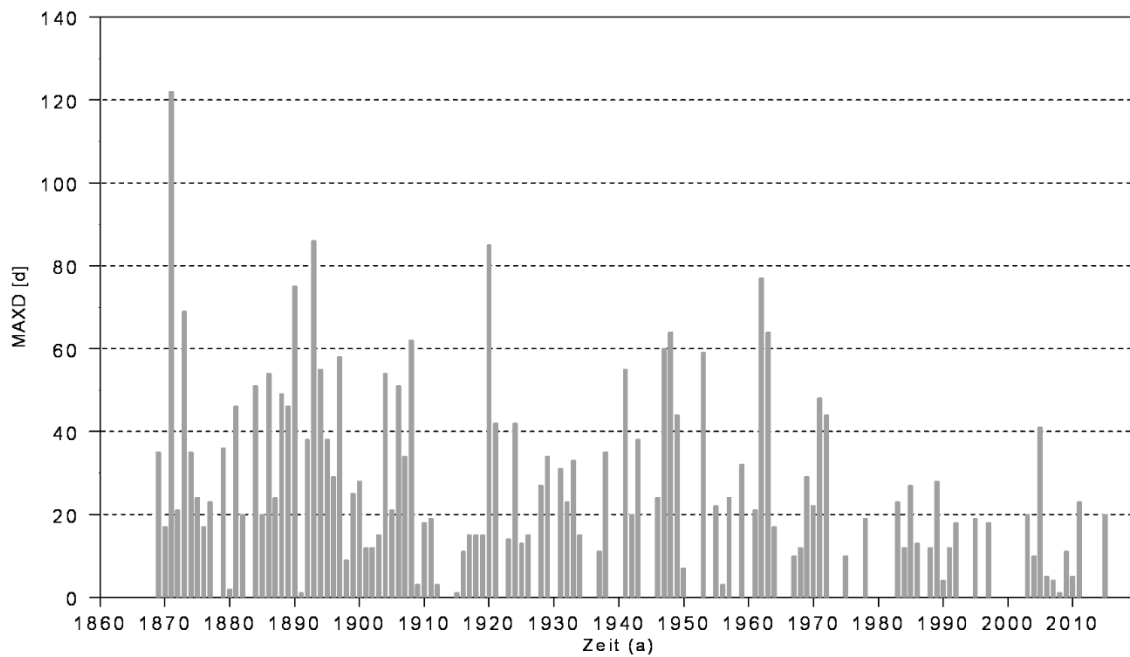
HLNUG 2017



HyStat HQ/NQ 3.0

HLNUG 2017

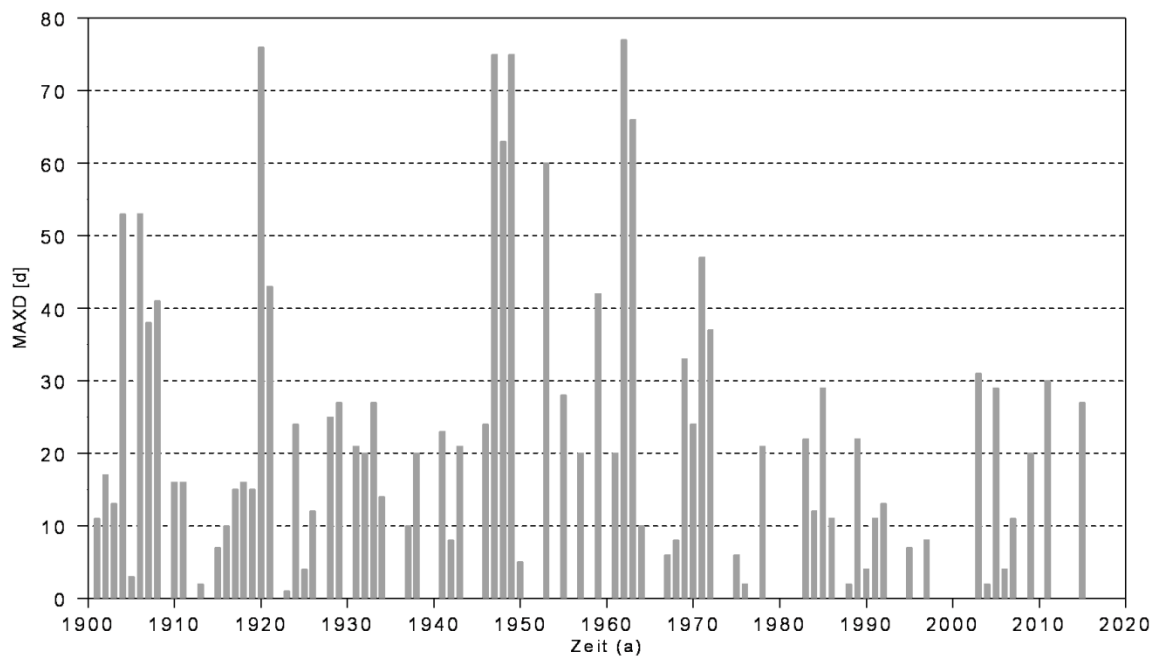
**Pegel Basel/Rhein**  
Variable MAX+527.D(j,4,3), Zeitraum 01.01.1869-31.12.2016



HyStat HQ/NQ 3.0

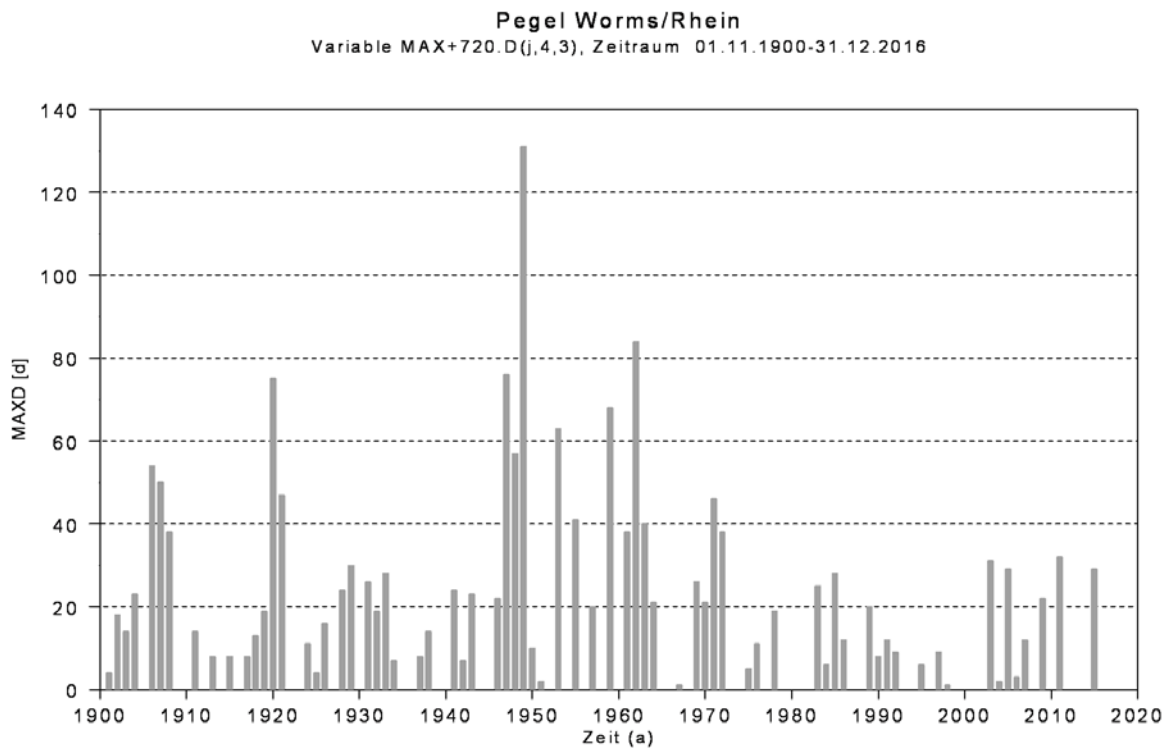
HLNUG 2017

**Pegel Maxau/Rhein**  
Variable MAX+645.D(j,4,3), Zeitraum 01.11.1900-31.12.2016



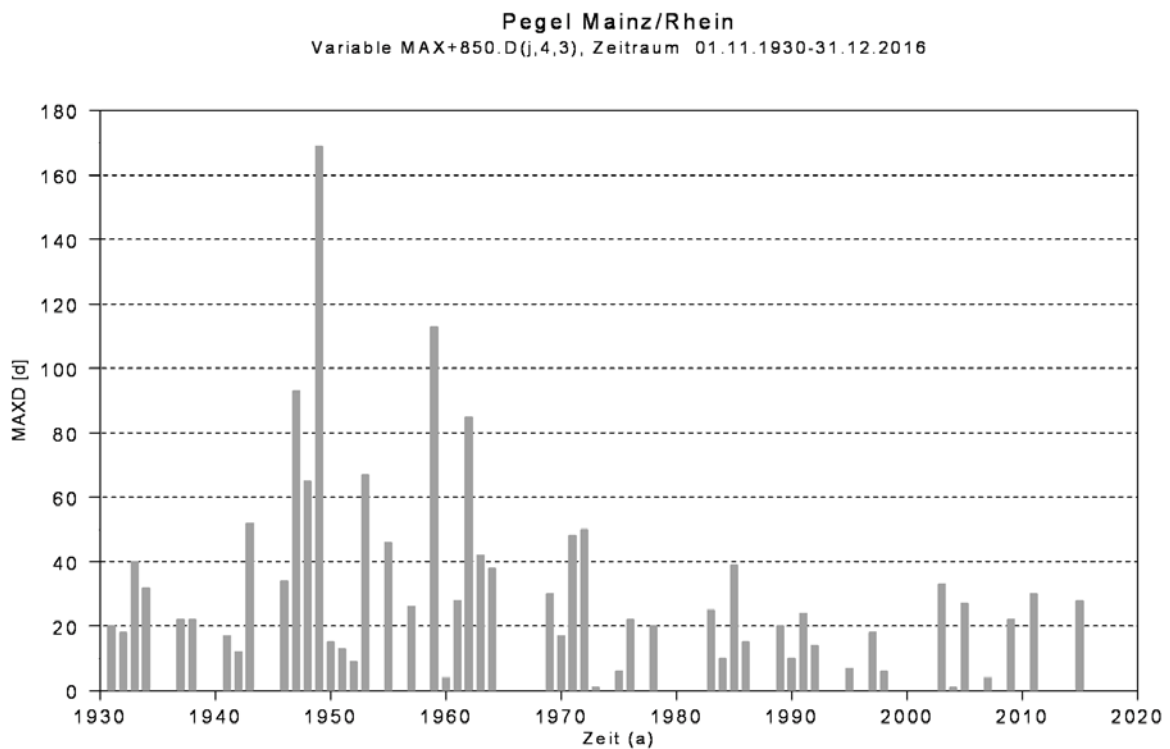
HyStat HQ/NQ 3.0

HLNUG 2017



HyStat HQ/NQ 3.0

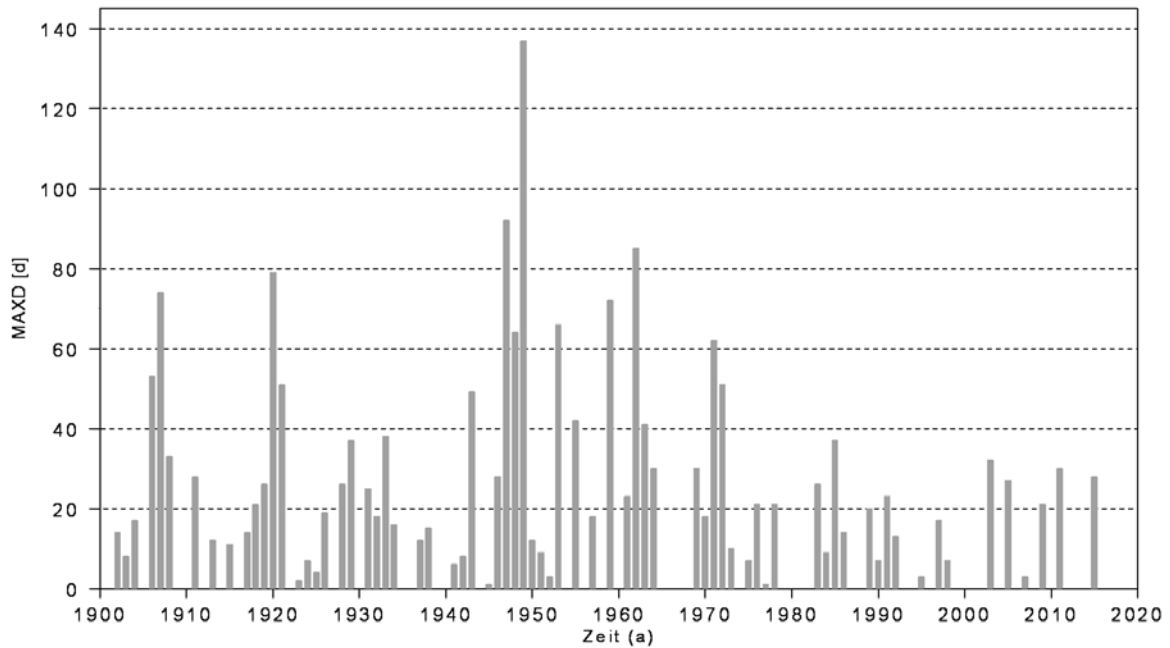
HLNUG 2017



HyStat HQ/NQ 3.0

HLNUG 2017

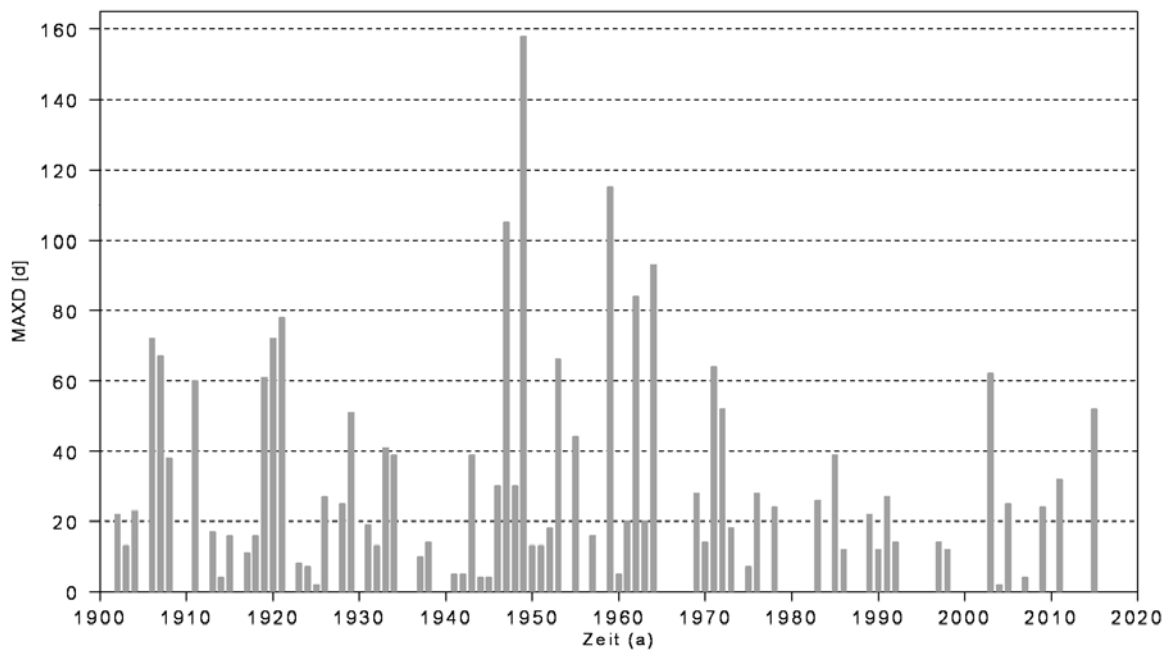
**Pegel Kaub/Rhein**  
Variable MAX+851.D(j,4,3), Zeitraum 01.11.1900-31.12.2016



HyStat HQ/NQ 3.0

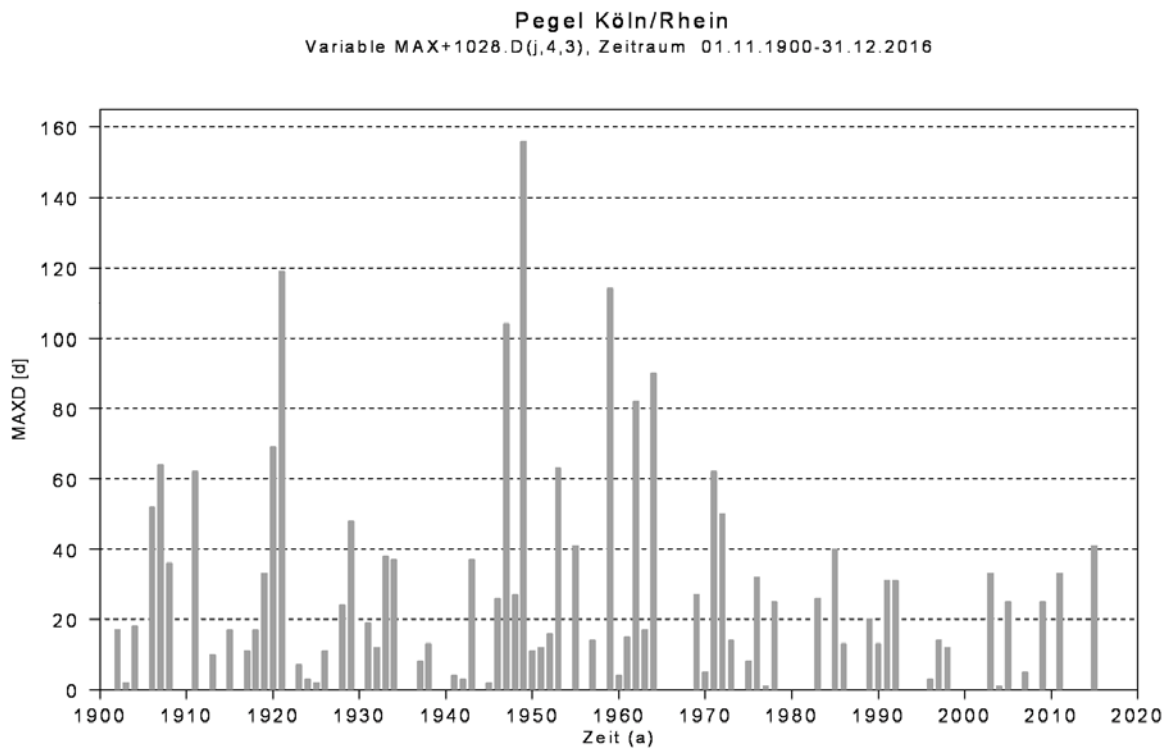
HLNUG 2017

**Pegel Andernach/Rhein**  
Variable MAX+998.D(j,4,3), Zeitraum 01.11.1900-31.12.2016



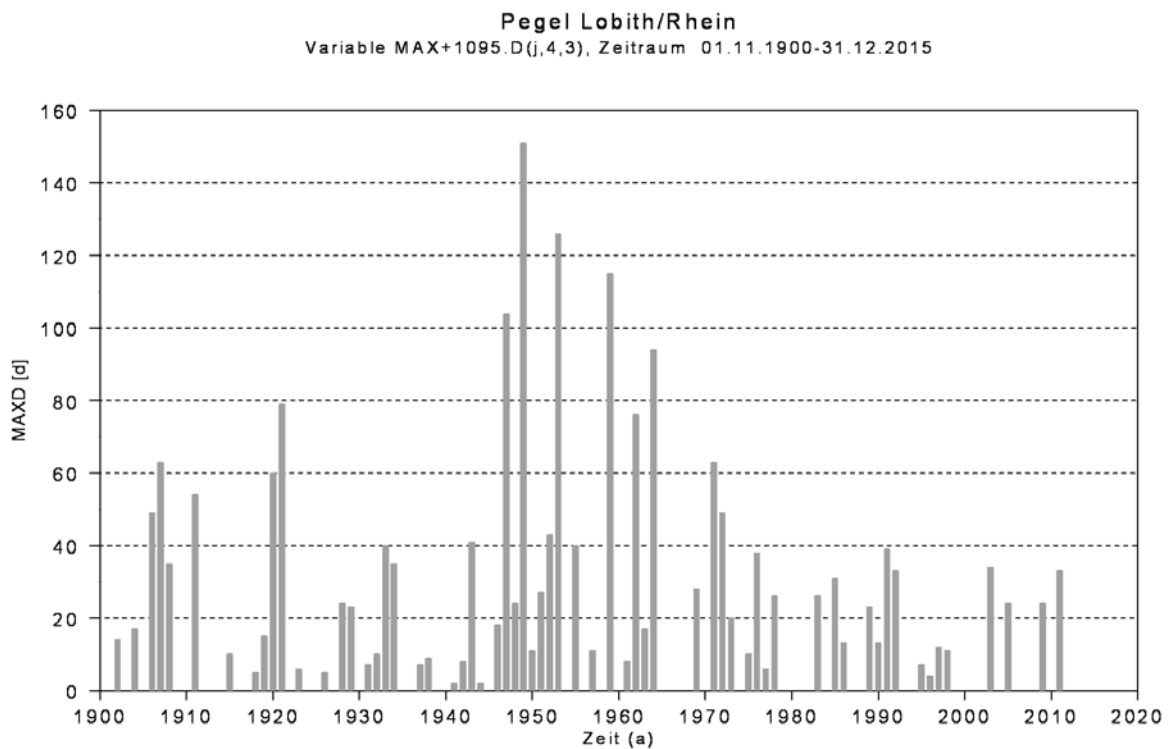
HyStat HQ/NQ 3.0

HLNUG 2017



HyStat HQ/NQ 3.0

HLNUG 2017

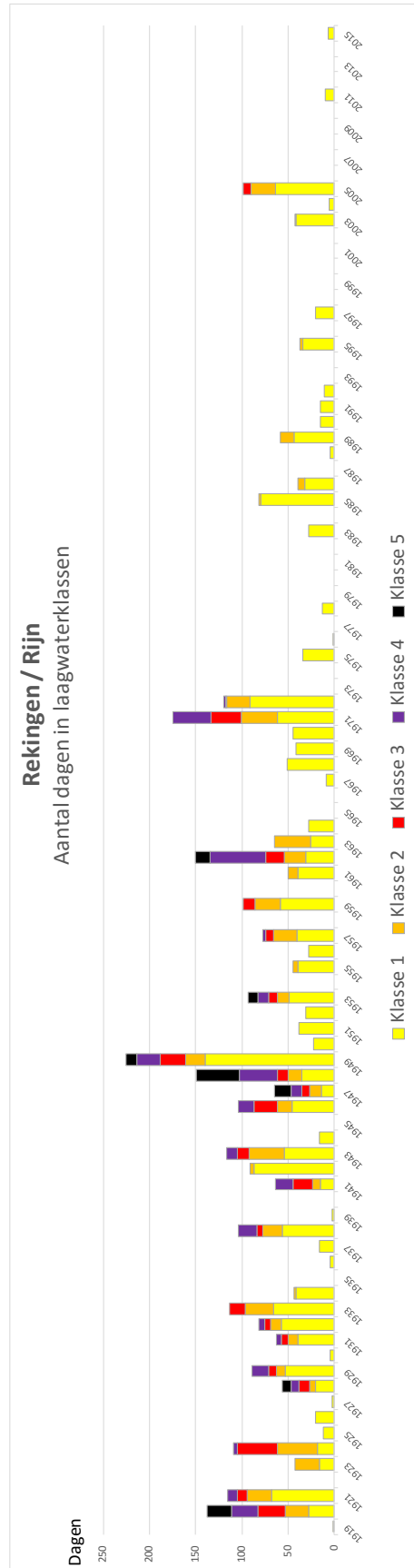
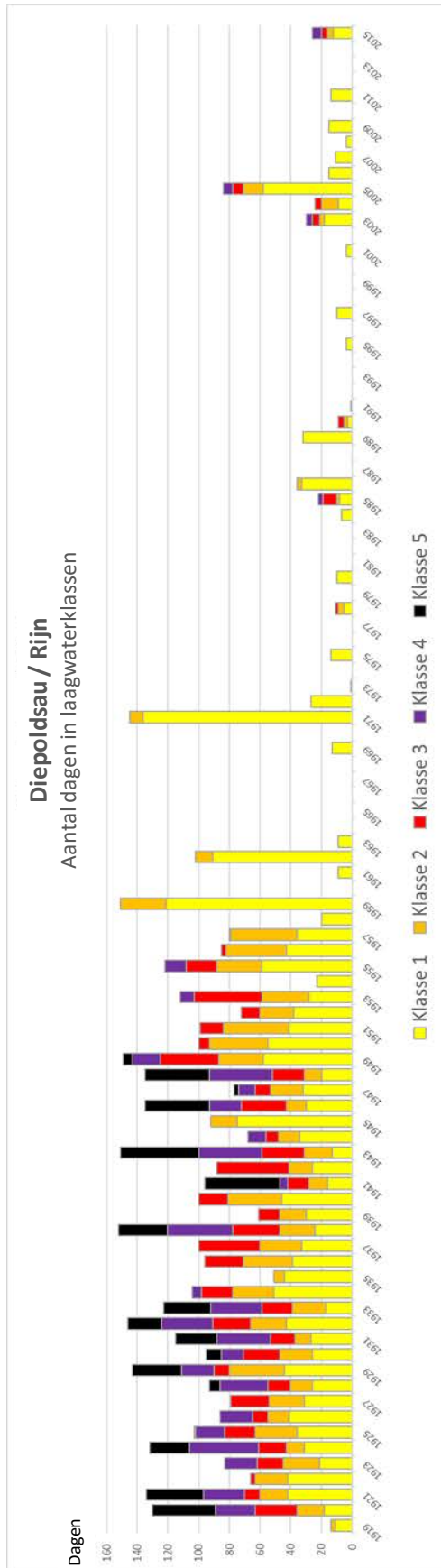


HyStat HQ/NQ 3.0

HLNUG 2017

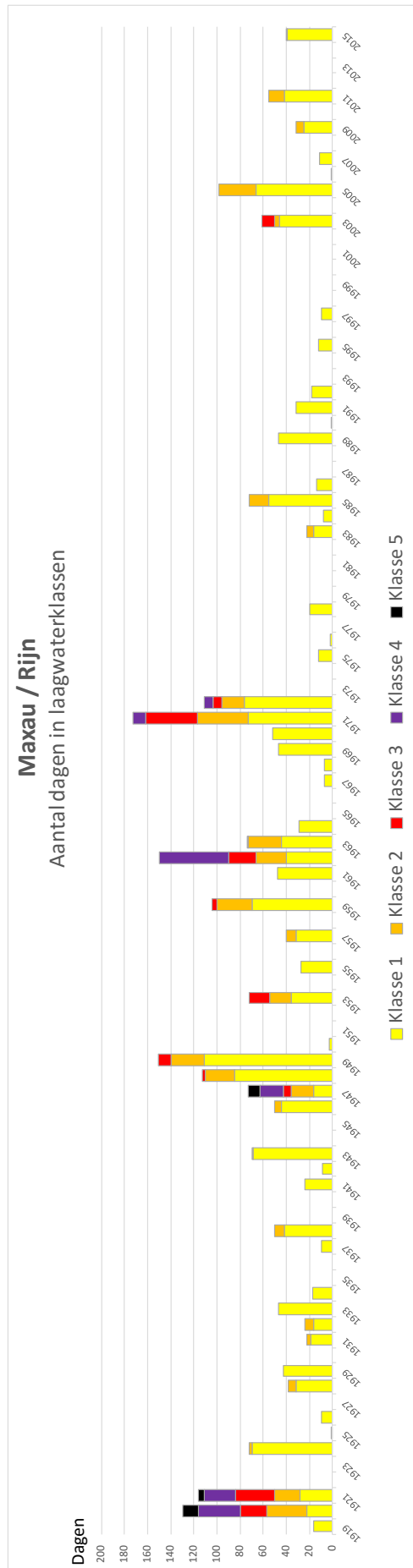
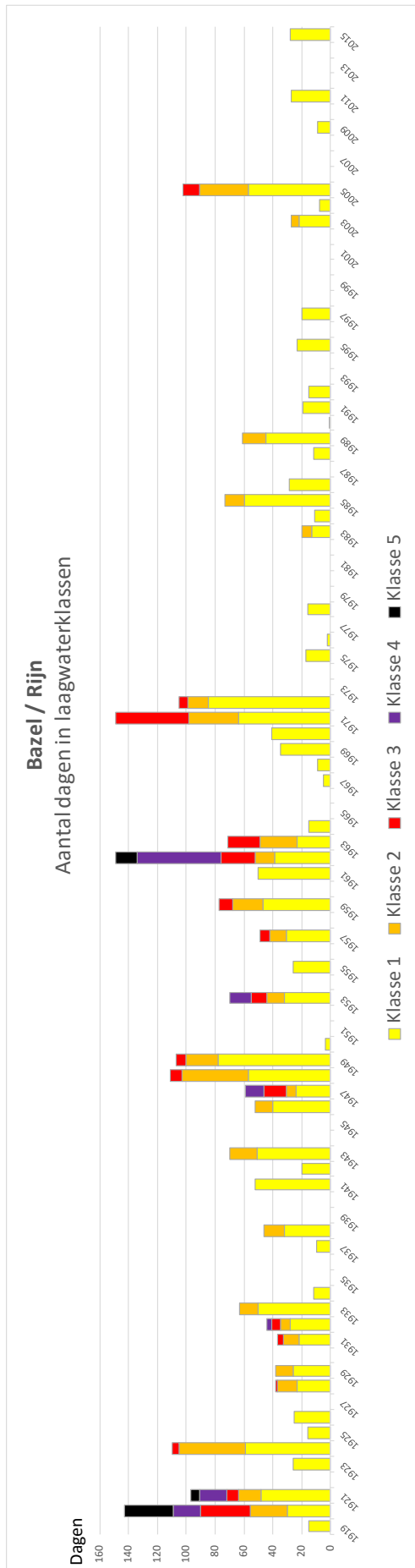
## Bijlage 4: Validatie van de laagwaterclassificatie aan de hand van historische tijdreeksen

### Retrospectieve monitoring op de meetpunten Diepoldsau en Rekingen

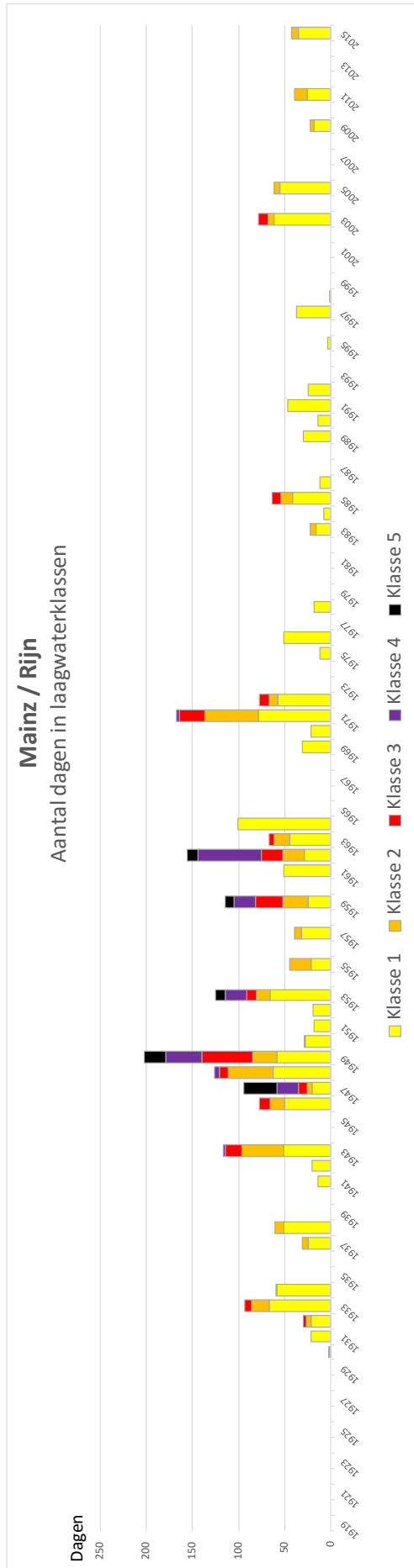
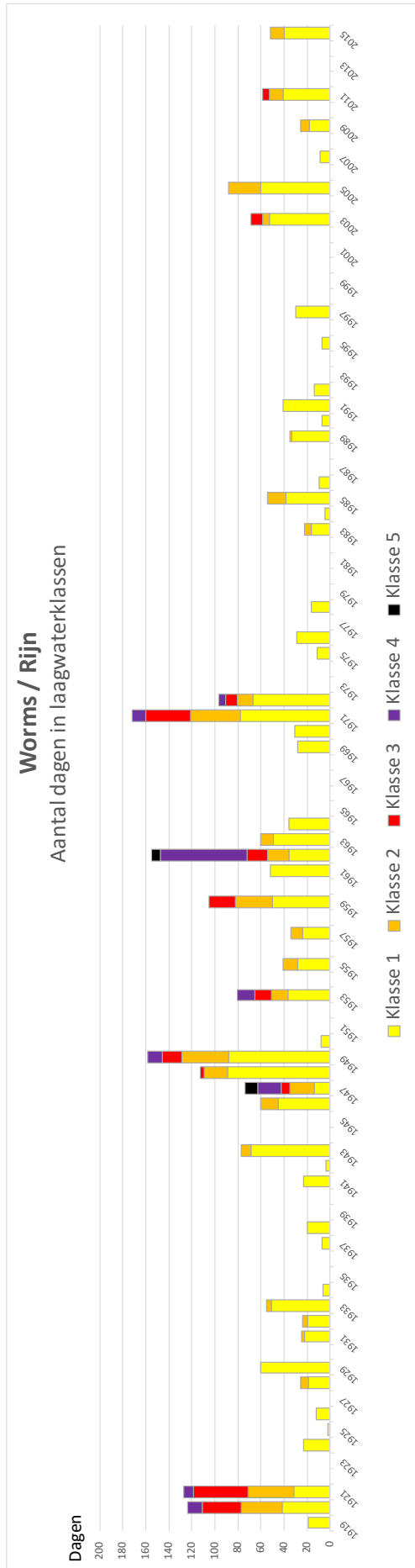




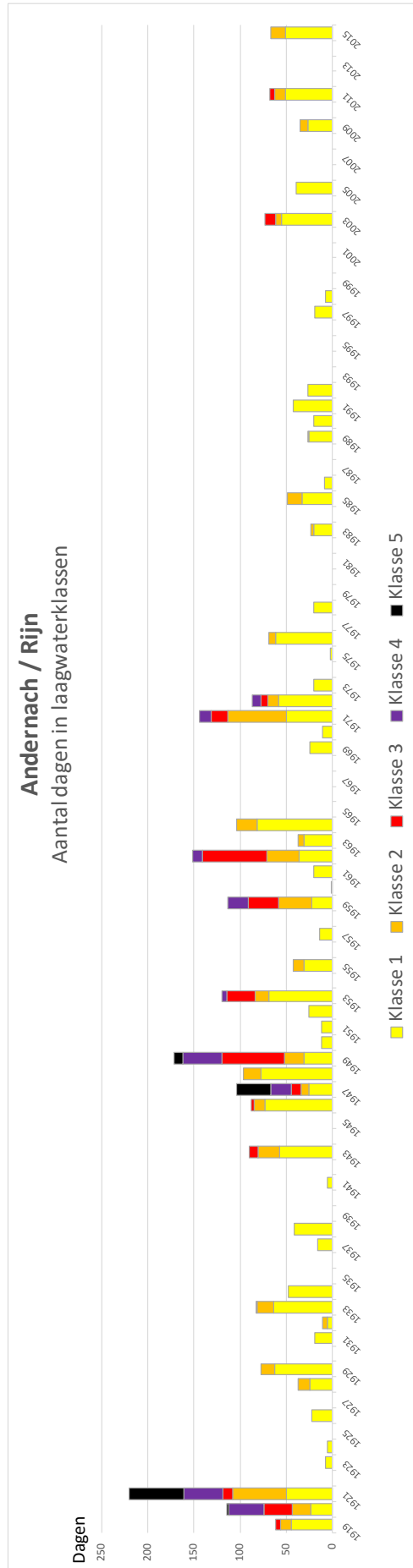
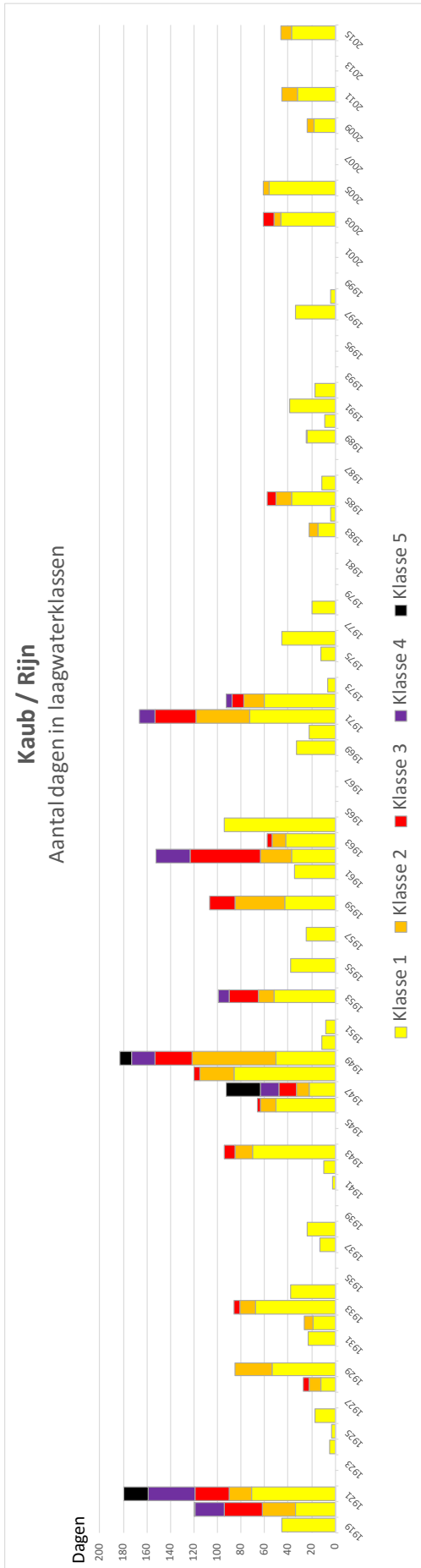
Retrospectieve monitoring op de meetpunten Bazel en Maxau



Retrospectieve monitoring op de meetpunten Worms en Mainz



Retrospectieve monitoring op de meetpunten Kaub en Andernach



## Retrospectieve monitoring op de meetpunten Keulen en Lobith

