

Extreme hoogwaters op de Rijn

deel I:

Een onderzoek naar de herkomst en oorzaak
van hoogwaters en de aan te houden maat-
gevende afvoer.

afstudeerverslag

van

H.J.Verheij

Technische Hogeschool Delft
Afdeling der Civiele Techniek
Vakgroep Rivier- en
Verkeerswaterbouwkunde

maart 1977

BIJLAGENLIJST

-
- Bijlage 1: Stroomgebied Rijn.
- Bijlage 2: Lengteprofiel van de Rijn en enige zijrivieren.
- Bijlage 3: Gegevens zijrivieren.
- Bijlage 4: Gemiddelde afvoerverlooplijnen over de jaren 1931/1940 en de invloed van sneeuwaccumulatie.
- Bijlage 5: Topafvoeren te Keulen.
- Bijlage 6: Frequentiekromme voor Keulen.
- Bijlage 7: Baan van een zone met dooi en neerslag in een normale situatie.
- Bijlage 8: Ligging peilschalen van Rijn en Moezel.
- Bijlage 9: Gegevens peilschalen Rijn.
- Bijlage 10: Gegevens peilschalen zijrivieren.
- Bijlage 11: Dwarsprofiel Rijn t.p.v. Maxau.
- Bijlage 12: Idem t.p.v. Worms.
- Bijlage 13: Idem t.p.v. Mainz.
- Bijlage 14: Idem t.p.v. Kaub.
- Bijlage 15: Idem t.p.v. Andernach.
- Bijlage 16: Idem t.p.v. Keulen.
- Bijlage 17: Idem t.p.v. Düsseldorf.
- Bijlage 18: Idem t.p.v. Wesel.
- Bijlage 19: Idem t.p.v. Rees.
- Bijlage 20: Idem t.p.v. Lobith.
- Bijlage 21: Dwarsprofiel Moezel t.p.v. Trier.
- Bijlage 22: Idem t.p.v. Cochem.
- Bijlage 23: Waterstanden tijdens topafvoeren.
- Bijlage 24: Waterstanden op zijrivieren tijdens topafvoeren.
- Bijlage 25: Hoogte boven MHW in cm en procenten en overschrijdingsduur van topafvoeren.
- Bijlage 26: Afwijking van hoogwaters groter dan $9000 \text{ m}^3/\text{s}$ te Keulen t.o.v. MHW.
- Bijlage 27: Grafische voorstelling van overschrijdingsduur in dagen en overschrijdingshoogte in m van afvoeren groter dan $9000 \text{ m}^3/\text{s}$ te Keulen.
- Bijlage 28: Datum waarop hoogste stand optreedt.

- Bijlage 29: Herhalingstijden van hoogwaters volgens D.Wiener.
- Bijlage 30: Gegevens t.b.v. sommatie van rivierafvoeren.
- Bijlage 31: Afvoercombinaties t.g.v. sommaties van de Rijn en haar zijrivieren.
- Bijlage 32: Resultaten aannemelijkheidstoets.
- Bijlage 33: Overzicht afvoeren in m^3/s voor een overschrijdingskans van $3 \cdot 10^{-4}$ per jaar volgens de Direktie Waterhuishouding en Waterbeweging.
- Bijlage 34: Overzicht maatgevende afvoeren.
- Bijlage 35: Fysisch mogelijke afvoeren

LITERATUUR

-
1. Mr C.J.G.Becht
(1976) Interimrapport Commissie Rivierdijken
Hoofddirectie van de Waterstaat,
's-Gravenhage, 1976
 2. Mr C.J.G.Becht
(1977) Rapport Commissie Rivierdijken
Hoofddirectie van de Waterstaat,
's-Gravenhage, 1977
 3. Prof.ir L.van Bendegom
(1961) Hydrografie van het Rijnbekken
Postacademiale cursus Drinkwater-
voorziening, 13e vakantiecursus,
1961
 4. J.Bucknell
(1967) Klimatologie
Prisma 1967, compendia nr 44
 5. Bundesanstalt für
Wasserbau
(1973) Untersuchungen zur Bestimmung der
Hohen der Rhein-Banndeiche im
Grenzgebiet
Bundesanstalt für Wasserbau,
Düsseldorf, 1973
 6. Deutsche Gewässerkundliche
Jahrbücher
 7. R.Frecaut
(1973) La Mozelle et son bassin
La Houille Blanche 1973, nr 4
 8. Gutachten
(1929) Die Ursachen und den Verlauf des
Hochwassers im Rheingebiet im
Dezember 1925 und Januar 1926
Gutachten der Preussischen Landes-
anstalt für Gewässerkunde, 1929
Jahrbuch für die Gewässerkunde
Norddeutschlands, Bes.Mitt.Band,
nr 2
 9. F.Hess
(1959) Probleme des Hochwasserschutzes
am Niederrhein
Düsseldorf, 1959
Heft 23 der limnologische Schrif-
tenreihe Gewässer und Abwässer
 10. J.G.Hillen
(1975) Analyse van topafvoeren op de
Bovenrijn
Afstudeerverslag vakgroep Rivier-
en Verkeerswaterbouwkunde,
TH-Delft, 1975
 11. La Houille Blanche
(1959) Quelques considerations générales
sur l'hydrologie du Rhin et sur
les aménagements de ce fleuve
La Houille Blanche, 1959, nr 2

12. Ir M. Jurriëns
(1976) Bepaling ontwerpafvoer m.b.v. waarschijnlijkheidsanalyse
Nota TH-Delft, afd. der Civiele Techniek, vakgroep irrigatie, mei 1976
13. Ir J. van Malde
(1959) Verband tussen sneeuwval in en regenval na een vorstperiode in het stroomgebied van de Duitse Rijn en het hoogwater te Lobith na het invallen van de dooi
Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afd. Studiedienst, nota 59.11
14. Monatlicher Witterungsbericht der Deutschen Wetterdiensten
Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Rhein
15. Der Rhein
(1951) Der Rhein
Wasser- und Schifffahrtsdirektion, Duisburg, 1951
16. Der Rheinstrom
(1889) Der Rheinstrom und seine wichtigsten Nebenflüsse
Centralbureau für Meteorologie und Hydrographie im Grossherzogtum Baden, Berlin, 1889
17. Prof. ir H. J. Schoemaker
(1975) Ordening van waarnemingen
Collegedictaat TH-Delft, afd. der Civiele Techniek, vakgroep irrigatie, 1975
18. Ir J. W. Tops
(1961) Het regiem van de Rijn
Verslag van de technische bijeenkomst, 15
Verslagen en mededelingen van de commissie voor hydrologisch onderzoek TNO, nr 6
19. H. P. Tzschucke
(1973) Stand der Arbeiten zum Ausbau des Rheins nördlich von Kehl/Strassburg
Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstrassen, 1973, nr 4
20. Ir A. van Urk
(1976 a) Overschrijdingskansen van uitzonderlijk hoge Bovenrijnafvoeren
Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, interimnota WH 7608, april 1976

21. Ir A. van Urk
(1976 b) Overschrijdingskansen van uitzonderlijk hoge Bovenrijnafvoeren
Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging,
tweede interimnota WH 7613,
november 1976
22. Wasserwirtschaftsamt
(1976) Bericht über den Hochwasserschütz
im Deutsch-niederländischer Grenz-
bereich
Wasserwirtschaftsamt Düsseldorf,
1976
23. K. Weinsprach
(1966) Verfahren zur Schätzung der Hochwasserwahrscheinlichkeit
Dissertation TH-Karlsruhe, 1966

1. INLEIDING

De Nederlandse overheid heeft plannen opgesteld om in het rivierengebied het risico van overstromingen te verkleinen tot een waarschijnlijkheid van $1/3000$ per jaar. Het gaat hierbij om het verhogen van de veiligheid van de bewoners en het verminderen van de kans op schade tengevolge van overstromingen. Hiermee ontstaat langs de rivieren een soortgelijke situatie als aan de Nederlandse kust, waar krachtens de Deltawet ten aanzien van overstroming een frequentie moet gelden van $1/10000$ per jaar.

De gevolgen van de plannen zijn voor het rivierengebied ingrijpend. Veel bandijken langs Waal, IJssel en Nederrijn moeten worden verzwaaard, waardoor een aanslag wordt gepleegd op een cultuurlandschap, zoals dat in het verloop van eeuwen is ontstaan. Zowel het totale beeld van het rivierengebied als onderdelen daarvan met specifieke waarden ten aanzien van monumentale bebouwing, flora en fauna dreigen verloren te gaan.

De laatste jaren is tegen de plannen van de overheid oppositie ontstaan van de zijde van onder meer natuurbeschermingsinstanties en wordt aangedrongen op een herbezinning.

Het voorgaande is aanleiding geweest een studie te verrichten naar een mogelijke alternatieve oplossing, namelijk een herverdeling van uitzonderlijk hoge topafvoeren en de morfologische gevolgen daarvan. Parallel aan deze studie loopt een onderzoek door de Commissie Rivierdijken naar de vraag of er aanleiding is de tot op heden gehanteerde maatstaf voor het ontwerp van maatregelen ter verbetering van de bescherming tegen hoge rivierstanden te herzien. De aanbevelingen van deze commissie hebben het onderzoek beïnvloed en zijn mede aanleiding geweest tot het verrichten ervan.

Het onderzoek is verricht in het kader van een afstudeeropdracht van de vakgroep Rivier- en Verkeerswaterbouwkunde van de Afdeling der Civiele Techniek. Het voorliggende verslag van het onderzoek is verricht onder leiding van Prof.Ir L.van Bendegom en werd begeleid door Ir J.van der Kolff.

2. DOEL VAN HET ONDERZOEK

Het verbeteren van de rivierdijken heeft tot doel een verlaging van het inundatierisico in het rivierengebied te bewerkstelligen. Het probleem dat hierdoor ontstaat is, dat vele natuurwetenschappelijke, cultuurhistorische en landschappelijke waarden verloren gaan. Milieugroeperingen hebben erop aangedrongen dat nieuw onderzoek zou worden verricht naar alternatieve oplossingen.

Gezien de huidige veiligheid tegen overstromingen in het rivierengebied, waarbij plaatselijk de kans op overstroming kleiner dan 1/100 per jaar bedraagt, moeten verbeteringen worden uitgevoerd. In het huidige maatschappelijk bestel is het sociaal en economisch onaanvaardbaar dat mensen en bedrijven worden blootgesteld aan de gevaren van overstromingen. Onaanvaardbaar vanwege de schade aan landbouwgronden en fabrieken, de ontwrichting van het maatschappelijk verkeer en de ontredde ring en het persoonlijk leed van vele mensen. In 1956 heeft de Minister van Verkeer en Waterstaat een afvoer van 18000 m³/s als maatgevend vastgesteld. Aanleiding tot het vaststellen van deze afvoer vormde de stormramp van 1953. Met het vaststellen van een maatgevende afvoer is geen uitspraak gedaan over een norm voor de veiligheid. Later is naar aanleiding van onderzoek door Rijkswaterstaat de bijbehorende frequentie van 1/3000 per jaar berekend en tot norm voor de veiligheid verheven.

Ten tijde van de vaststelling van de maatgevende afvoer speelden milieubelangen nog geen rol. Nadat de eerste plannen tot dijkverbeteringen waren voorgesteld, rees verzet van de kant van o.a. milieugroeperingen en bewoners van dijkdorpen tegen het aantasten van het karakteristieke rivierenlandschap. Hun eerste acties hebben geresulteerd in het instellen van een Commissie Rivierdijken, die nagaat of de norm moet worden herzien en, zo ja, op welke wijze dit dient te geschieden. Hierbij wordt rekening gehouden met alle belangen.

Deze studie heeft ten doel na te gaan hoe bescherming te bieden aan het rivierengebied, opdat recht wordt gedaan aan alle belangen, zoals de veiligheid tegen overstromingen en het behoud van het milieu. Nagegaan zal worden wat de te verwachten afvoer kan zijn, door middel van een analyse van enige in het verleden opgetreden hoogwaters. Bepaald zal worden met welke maatgevende afvoer moet worden gerekend en welke veiligheidsnorm hierbij behoort.

Na analyse van mogelijke oplossingen voor het probleem van de dijkverzwaring zal één oplossing, namelijk herverdeling van topafvoeren over de Nederlandse Rijntakken, nader worden uitgewerkt. De gevolgen van de gekozen herverdeling van topafvoeren voor de morfologie van de rivier zullen worden berekend, waarna een uitspraak zal worden gedaan over de realiseerbaarheid van deze oplossing. De aanbevelingen, gedaan door de Commissie Rivierdijken, zullen nauw bij het onderzoek worden betrokken.

3. PROBLEEMANALYSE

3.1 Inleiding

Het doel van het onderzoek is het bieden van een verhoogde veiligheid tegen overstromingen. In dit hoofdstuk zal een analyse worden gegeven van de problemen, voorts zal een aantal deelproblemen nader worden uitgewerkt.

Belangrijk bij de plannen tot dijkverzwaring zijn: de maatgevende afvoer waarmee moet worden gerekend en de invloed van de dijkverzwaringen op de diverse riviertrajecten. In verband met het doel van het onderzoek spelen alternatieve oplossingen een grote rol. De volgende deelproblemen kunnen worden onderscheiden:

- a) wat is de herkomst en de oorzaak van hoogwater ?
- b) welke afvoer moet als maatgevend worden beschouwd ?
- c) welke alternatieve oplossingen zijn voorhanden ?
- d) wat zijn de gevolgen van deze oplossingen ?

In het kort zullen deze deelproblemen nu worden toegelicht.

De vraag naar de herkomst en de oorzaak van hoogwaters zal worden onderzocht aan de hand van een literatuurstudie. Aspecten als meteorologische en klimatologische omstandigheden zijn de oorzaak van hoogwaters. In welk gedeelte van het stroomgebied van de Rijn ontstaat een hoogwater en is dit steeds het geval ? Welke zijrivieren spelen in deze een rol. Nagegaan zal worden of het gedrag van de hoogwatergolven veranderd is. Beïnvloeding is mogelijk door wijzigingen van het klimaat of door veranderingen in het stroomgebied. Bij het laatste valt te denken aan dijkverhogingen, winterbedverruiming, aanleg reservoirs, verstedelijkingen enz.

De maatgevende afvoer die gehanteerd zal worden, wordt bepaald door de te stellen veiligheidsnorm en door de fysisch "maximaal" mogelijke afvoer. De veiligheidsnorm oftewel de kans op inundatie moet worden vastgesteld na afweging van alle belangen zoals risico voor het

menselijk leven, schade aan bedrijven en landbouwgronden en verlies aan cultuurhistorische en milieu-aspecten. De maatgevende afvoer kan worden berekend nadat de norm is vastgesteld. Diverse methodes staan hiertoe ter beschikking, welke verschillende resultaten opleveren. Na afweging van de verschillen in grondslagen van de diverse methodes zal een keus moeten worden gedaan, welke afvoer als maatgevend wordt beschouwd.

Uitgaande van de huidige norm met een overstromingskans van een 1/3000 per jaar, zijn de volgende oplossingen te onderscheiden:

- 1e verlaging van de huidige norm
- 2e verlaging van de afvoer op één of op alle riviertakken.

Verlaging van de norm houdt in dat de maatgevende afvoer bepaald op veiligheidsoverwegingen niet wordt gehandhaafd. Dit is te rechtvaardigen door te stellen dat andere belangen dan uitsluitend de veiligheid evenzeer van invloed zijn.

Verlaging van de afvoer is mogelijk door herverdeling van topafvoeren over de riviertakken; de aanleg van hoogwateropvangbekkens, waardoor de top van de golf wordt afgehaald; de aanleg van overlaten, waardoor bedreigde riviertakken worden ontlast; of de afleiding van grote hoeveelheden water naar de Maas. Tegen een herverdeling van topafvoer is aan te voeren dat sommige riviertakken zullen worden ontlast en andere zwaarder worden belast. Psychologisch kan dit van invloed zijn op de bewoners van het rivierenlandschap. De aanleg van hoogwaterbekkens is mogelijk, maar zal gezien de hoeveelheden waarom het gaat (Becht, 1977) een groot beslag op de ruimte leggen. Overlaten zijn maatschappelijk gezien onaanvaardbaar, gezien het feit dat grote delen rivierenlandschap als praktisch onbruikbaar moeten worden beschouwd. Bebouwing kan niet plaats hebben in dergelijke gebieden. De mogelijkheid van afleiding van grote watermassa's naar de Maas is onzeker daar een samenvallen van hoogwatergolven niet is uitgesloten.

De gevolgen van de diverse oplossingen zijn in het voorgaande al gedeeltelijk genoemd. Hieraan kan worden toegevoegd dat genoemde oplossingen grote waterbouwkundige ingrepen vereisen die invloed hebben op het gedrag van de rivier. Ten behoeve hiervan zullen hoge investeringen noodzakelijk zijn. Bij het doen van een keuze zullen deze factoren moeten worden afgewogen tegen de kosten van dijkverzwaring.

In deze studie zullen de volgende deelproblemen worden geanalyseerd:

- de herkomst en de oorzaak van hoogwaters (hoofdstuk 3.2)
- de maatgevende afvoer (hoofdstuk 3.3)
- de herverdeling van topafvoeren (deel 2)
- de morfologische gevolgen van een hoogwater (deel 3).

Het verdient aanbeveling in latere studies onderzoek te doen naar de invloed van ingrepen in het stroomgebied en het rivierbed op hoge afvoeren. Eveneens is het interessant na te gaan op welke wijze de hier geanalyseerde oplossing van herverdeling van topafvoeren moet worden werkstelligd.

3.1.1 Het stroomgebied van de Rijn

De Rijn stroomt door drie staten, te weten Zwitserland, West-Duitsland, Nederland en langs Frankrijk. Het oppervlak dat tot afstroming komt op deze rivier bedraagt tot aan de Duits-Nederlandse grens ongeveer 160000 km² (bijlage 1). De grootste lengte en breedte van het stroomgebied bedragen respectievelijk 630 en 470 km. Circa 30% van dit gebied is bedekt door bos (Der Rhein, 1951). Het karakter van het stroomgebied is sterk afwisselend tengevolge van de verschillen in hoogteligging van de diverse delen ervan.

De oorsprong van de Rijn ligt in het hooggebergte in Zwitserland. Na de Bodensee te zijn gepasseerd, begint een vlak riviervedeelte tot aan Basel, dat ligt ingeklemd tussen het Zwitserse Middelgebergte en het Zwarte Woud in Duitsland. Het Zwitserse deel van de Rijn wordt beïnvloed

door de vele natuurlijke meren die de afvoeren van de zijrivieren reguleren, en door de Bodensee, welke topafvoeren van de rivier zelf opvangt.

Eenmaal bij Basel gekomen, buigt de rivier noordwaarts om tussen de Vogezen en de Elzas aan de ene en het Zwarte Woud aan de andere zijde verder te stromen. Deze streek heeft de kenmerken van een middelgebergte. Van Mannheim tot Bingen loopt de Rijn door een gebied met laaggebergte als Odenwald en Pfalz. Hünserück, Taunus en Westerwald behoren tot het middelgebergte, waar de Rijn zich daarna tussen Bingen en Koblenz doorheen moet worstelen: reden dit traject de Gebirgsstrecke te noemen. Van Koblenz tot Keulen wordt de Rijn begrensd door de Rifel, een laaggebergte. Na Keulen kan het gebied als laagland worden beschouwd.

Na het passeren van de Duits-Nederlandse grens kan er worden gesproken van de mondingsdelta van de Rijn. Kenmerkend zijn de riviersplitsingen bij Pannerdse Kop in Waal en Pannerdens Kanaal en bij IJsselkop in Nederrijn en IJssel.

De verschillen in onder meer topografie van de gebieden welke de Rijn doorkruist, hebben tot gevolg dat ook de aard van de rivier zelf voortdurend verandert. Afwisselend kent de Rijn boven-, midden- en benedenlopen, waarbij de laatste twee meer dan eenmaal voorkomen, hetgeen blijkt uit het lengteprofiel (Van Bendegom, 1961; en bijlage 2).

Op zijn weg naar de Nederlandse delta neemt de Rijn vele zijrivieren op, waardoor het stroomgebied een grote, vrij constante breedte kent. De zijrivieren ontspringen in de diverse gebergten. De belangrijkste zijrivieren zijn: Neckar, Main, Roesel en Ruhr (bijlage 3).

De Neckar ontspringt in het Zwarte Woud en wordt gevoed door diverse zijrivieren. Het stroomgebied is tengevolge van de loop van de Neckar en de daarop uitkomende zijrivieren enigszins driehoekig van vorm. Dat wil zeggen smal bij de monding in de Rijn en breed in het brongebied. Een gevolg hiervan is het snel aanzwellen van hoogwaters. De grootte van het stroomgebied bedraagt 14000 km².

Het stroomgebied van de Main heeft een gelijkmatige breedte met een oppervlak van 27500 km^2 .

De Main ontspringt in het Fichtelgebirge en neemt onderweg verscheidene zijrivieren op. De Main stroomt afwisselend door een smal en een breed rivierdal, wat gevolgen heeft voor de hoogwaterafvoer, zoals een langere looptijd tengevolge van opstuwning.

De Moezel wordt gevoed door bronnen in de Vogezen, Eifel en Ardennen en ontvangt daarmee water uit een oppervlak van 28000 km^2 . Belangrijke zijrivieren zijn de Saar en de Sauer met hun oorsprong respectievelijk in de Vogezen en in de Ardennen. Beide worden gekenmerkt door een snelle afvoer en beslaan gezamenlijk 40% van het Moezelstroomgebied (Der Rheinstrom, 1889).

Na instroming van beide zijrivieren wordt het stroomgebied van de Moezel sterk versmald en vindt nog slechts toevoer plaats door enkele zijriviertjes welke het karakter van bergbeken hebben (Der Rhein, 1951).

De Ruhr heeft een stroomgebied ter grootte van 4500 km^2 , gekenmerkt door een grote breedte in het brongebied, het Sauerland. De breedte neemt geleidelijk af om vrij smal te worden ter plaatse van instroming in de Rijn. In de bovenloop van de Ruhr zijn vele stuwweren aanwezig, welke invloed uitoefenen op de hoogwaterafvoer (afvlakking van de toppen).

Na deze beknopte beschrijving zal duidelijk zijn dat de Rijn wordt beïnvloed door variërende omstandigheden in de verschillende delen van het stroomgebied. In Zwitserland zijn het de gletschers van het hooggebergte en de natuurlijke meren, en in Duitsland is het hoofdzakelijk neerslag, welke het afvoerverloop van de Rijn sterk beïnvloeden (bijlage 4).

3.1.2 Het klimaat

In West-Europa is het gematigd koele klimaat overheersend. Kenmerkend is een koud jaargetijde met een duur van één

tot vijf maanden en een gemiddelde temperatuur in deze maanden, welke beneden de 6 graden Celsius ligt. Twee typen zijn te onderscheiden: een zee- en een landklimaat. Het eerste kent neerslagmaxima in de winter of gelijke neerslaghoeveelheden in alle jaargetijden en het tweede kent neerslagmaxima in de zomer (Bucknell, 1967). Welk van beide typen optreedt, is afhankelijk van de geografische breedte en de afstand tot de wereldzeeën. Verder spelen orografische effecten een grote rol.

Het stroomgebied van de Rijn staat grotendeels onder invloed van het zeeklimaat. Slechts het gedeelte in Zuid-Duitsland en Zwitserland wordt beïnvloed door het continentale type. Een gevolg van het zeeklimaat zijn de overheersende westenwinden, in samenhang waarmee de baan van depressies in oostelijke richting loopt. De hoofdtrajecten van deze depressies lopen van Het Kanaal naar het Roergebied en van Bretagne over het Roergebied naar Polen. In het winterjaargetijde zijn deze depressies het talrijkst. De Zwitserse Rijn wordt hoofdzakelijk beïnvloed door depressies welke van de Middellandse Zee afkomstig zijn. Depressies worden vaak tegengehouden door uitgestrekte hogedrukgebieden boven Finland, Polen en Rusland, welke daar in de winter tengevolge van het landklimaat kunnen ontstaan. In de zomer daarentegen ontstaan lagedrukcentra boven Centraal-Europa, waardoor vochtige lucht aangevoerd kan worden (Bucknell, 1967).

Samenvattend, wordt het klimaat in het stroomgebied van de Rijn dus in zijn algemeenheid bepaald door de overgang van het zee- naar het landklimaat. Plaatselijk spelen overigens de ligging boven zeeniveau, het relief en de richting van de bergketens een grote, soms overheersende rol.

Kwantificeerbare aspecten van een klimaat zijn bijvoorbeeld temperatuur en neerslag.

De temperatuur is in gebieden onder invloed van het zee-klimaat gelijkmatig over het jaar verdeeld, dus koele zomers en zachte winters. Het landklimaat kent daarentegen strenge winters en warme zomers. Onder invloed van deze factoren varieert de amplitude van het jaarlijkse temperatuursverloop ook van 15,5 graad in de Duitse laagvlakte tot 20,2 graad in Zwitserland (Der Rhein, 1951). Hiernaast speelt de hoogteligging een rol, want bij toenemende hoogte boven zeeniveau neemt de temperatuur geleidelijk af.

Een bijzondere invloed op de temperatuur heeft de föhn, die in Zwitserland en Zuid-Duitsland kan voorkomen. Deze warme valwind, in de zomer veroorzaakt door lagedrukgebieden, welke luchtmassa's uit de Alpen wegzuigen, treedt vooral op in de noord-zuid richting lopende dalen.

Vanwege zijn in het Middellandse Zeegebied gelegen oorsprong veroorzaakt deze sterke temperatuurstijgingen. De föhn wordt vaak gevolgd door neerslag (Der Rhein, 1951).

De neerslag is het meest sprekende effect van de invloed van een klimaat. Onder invloed van de beide klimaattypen in het Rijngebied zijn ook twee gebieden te onderscheiden met verschillende neerslagkarakteristieken. In het noordwestelijke en westelijke deel, dus Duitse laagvlakte, Voergezen, Ardennen en Eifel, treden hoofdzakelijk maxima in de winter op. Het overige deel van het stroomgebied wordt gekenmerkt door zomerregens. De zomerregens komen evenwel slechts gedeeltelijk tot afstroming door de invloed van de verdamping. De gemiddelde neerslag over het gehele Rijnstroomgebied bedraagt 910 mm per jaar en de gemiddelde verdamping 470 mm. De afvoercoëfficiënt bedraagt gemiddeld dus ongeveer 50%, wat een afvoer geeft bij Lobith van gemiddeld $2200 \text{ m}^3/\text{s}$ (Van Bendegom, 1961). De neerslaggegevens voor de diverse gebieden zijn op jaarbasis (Der Rhein, 1951, en Tops, 1961):

- hooggebergte in de Alpen	2000 - 2500 mm
- merengebied in Zwitserland	950 mm
- Vogezen, Zwarte Woud	200 - 2300 mm
- Neckarstroomgebied	600 - 1600 mm
	gemiddeld 700 mm
- Mainstroomgebied	600 - 1000 mm
	gemiddeld 650 mm
- Ardennen	1000 mm
- Hünserück, Eifel	600 mm
- Ruhrstroomgebied	1300 mm
- Duitse laagvlakte	700 mm

De hoge neerslagcijfers in de Alpen worden veroorzaakt door Atlantische depressies en Middellandse Zeecyclonen (Der Rhein, 1951). Gemiddeld is de neerslag in Zwitserland 1420 mm en de verdamping 480 mm, zodat de afvoercoëfficiënt gemiddeld 70% bedraagt. De afvoer te Basel is hierdoor in de zomer 1000 m³/s (Van Bendegom, 1961).

3.1.3 De afvoer

Regenbuien en de geleidelijke afsmelting na de winter van het sneeuwdek in het hooggebergte veroorzaken de zomerhoogwaters in het Zwitserse deel van het Rijnstroomgebied, evenals van Basel tot Mannheim. Het geleidelijk smelten van de sneeuw vindt in hoofdzaak plaats tussen hoogten van 700 en 3000 m boven zeeniveau. Beneden 700 m blijft de sneeuw in de winter en in het voorjaar in het algemeen niet liggen. Boven de 3000 m smelt deze zelfs in de zomer niet (Van Bendegom, 1961). De sneeuwval is 's winters het gevolg van hogedrukcentra, samenhangend met het landklimaat. Grote hoeveelheden neerslag worden op deze wijze geaccumuleerd en komen na de winter tot afstroming. Ook de eerder genoemde föhn kan hierin een grote rol spelen.

Vanaf Mannheim staat het Rijngebied meer onder invloed van het zeeklimaat. Dit betekent dat Atlantische depressies in hoofdzaak de neerslag veroorzaken, dat wil zeggen 's winters meer regen dan 's zomers. Grote afvoeren benedenstroms van Mannheim komen dan ook in hoofdzaak in het

3.2 Waargenomen hoge afvoeren

3.2.1 Algemeen

Hoofdstuk 3.1 behandelde de algemene gegevens van stroomgebied, klimatologie en afvoer. In dit hoofdstuk worden de hoogwaters meer in detail beschouwd. Topafvoeren, welke besproken worden, staan vermeld op bijlage 5. Het betreft afvoeren, waarvan het debiet te Keulen groter is dan $7500 \text{ m}^3/\text{s}$, hetgeen ongeveer overeenkomt met een waterstand op de peilschaal te Keulen van meer dan 8,00 m.

Hierbij wordt de restrictie gemaakt dat de opgegeven waarden van afvoeren uit de 19e eeuw mogelijk niet met de werkelijkheid overeenstemmen. Oorzaak hiervan is het geheel of gedeeltelijk ontbreken van afvoergegevens, waardoor de betreffende afvoeren moesten worden geschat. In verband hiermee moeten vergelijkingen tussen hoogwaters uit deze eeuw en uit de vorige eeuw met de nodige voorzichtigheid worden geïnterpreteerd.

De nadruk bij het onderzoek zal daarom worden gelegd op de waterstanden ondanks bezwaren welke daaraan kleven. De bezwaren betreffen het buiten beschouwing blijven van bodemdaling, peilschaalverplaatsingen en dergelijke.

Slechts over enkele hoogwaters worden in de literatuur meer gegevens vermeld dan waterstanden alleen. Het betreft hier de topafvoeren van november 1882, december 1882 / januari 1883, december 1919 / januari 1920, november 1924 en december 1925 / januari 1926 (Der Rheinstrom, 1889, en Gutachten, 1929). In par. 3.2.3 worden de genoemde hoogwaters vergeleken, alsmede de hoogwaters van januari 1948, januari 1955 en februari 1970. De ligging van deze hoogwaters op de frequentiekromme van Keulen (volgens de Gumbel-verdeling) is weergegeven op bijlage 6. De kromme is ontleend aan Hillen (1975) en opgesteld voor de periode 1918-1969. Het hoogwater van 1925/1926 heeft een gemiddelde herhalingsstijd van 50 jaar te Keulen, hetgeen overeenstemt met de waarde die Hess (1959) vermeldt.

In zijn algemeenheid zal de herkomst van het hoogwater, voorzover te bepalen, worden onderzocht, alsmede de meteorologische omstandigheden.

Vooraf dienen nog enige opmerkingen te worden gemaakt:

- 1e) voor het traject tussen Basel en Mannheim is de oorsprong van hoogwaters moeilijk vast te stellen vanwege de vele natuurlijke en kunstmatige meren in Zwitserland en Zuid-Duitsland (Der Rheinstrom, 1889).
- 2e) de invloed van het hooggebergte op de afvoer wordt benedenstrooms van Kaub steeds minder duidelijk. Het regiem vervormt voortdurend, hetgeen blijkt uit de gemiddelde afvoerverlooplijn (bijlage 4).
- 3e) bij gelijktijdige neerslag op het gehele stroomgebied van de Rijn geldt voor alle zijrivieren, dat zij op de hoofdgolf van de Rijn voorijlen tengevolge van kortere looptijden. Met andere woorden, de toppen van de zijrivieren bereiken in dat geval eerder de plaats waar zijrivier en Rijn samenvloeien dan de Rijn golf zelf. In de praktijk zal de neerslag evenwel nooit gelijktijdig vallen (Hesse, 1959).
- 4e) in een normale situatie nadert een zone met dooi en neerslag het stroomgebied uit westelijke richting en breidt deze zich uit naar het zuiden (bijlage 7).

Gegevens van de onderzochte hoogwaters zijn te vinden op de bijlagen 5 en 8 t/m 25.

3.2.2 Beschrijving van enige hoogwaters

De opgetreden waterstanden worden vergeleken met MHW (Mittelbar Hochwasser). Dit peil is het gemiddelde van de jaarlijkse hoogwaters gedurende een bepaalde periode. Op bijlage 25 is voor elk onderzocht hoogwater aangegeven met hoeveel cm en met welk percentage (overschrijdingspercentage) het MHW werd overschreden.

december 1819

Slechts waterstandgegevens benedenstrooms van Koblenz staan ter beschikking. Der Rheinstrom (1889) vermeldt als oorzaak van dit hoogwater neerslag in het Zwarte

Woud en de Vogezen, wat via Neckar, Main en Moezel op de Rijn is afgevoerd. Vergelijking van de opgetreden waterstanden met het MHW 1896/1920 geeft aan, dat de top van de golf hoge waterstanden veroorzaakt heeft ter plaatse van Andernach, Linz en Koblenz met overschrijdingspercentages t.o.v. MHW 1896/1920 van respectievelijk 38, 51 en 33%.

november 1824

Dit hoogwater is afkomstig uit Zuid-Duitsland volgens Der Rheinstrom (1889). De oorzaak is regenval. De waterstanden te Mannheim en Mainz illustreren dit (bijlage 23), want bovenstrooms van genoemde plaatsen komen geen hoge standen voor. De Neckar bereikte haar grootste afvoer, namelijk $4800 \text{ m}^3/\text{s}$ (Der Rheinstrom, 1889). De Moezel kende een zeer grote afvoer, gezien de waterstanden te Trier en Kochem met een overschrijdingspercentage te Kochem van 58%. De overschrijdingspercentages te Ruhrort, Wesel en Emmerich zijn hoog, wat kan duiden op behoorlijke toevoer door Ruhr en Lippe.

december 1833 / januari 1834

Waterstandgegevens zijn vermeld in Der Rheinstrom (1889). Uit de waterstanden van de Moezel blijkt dat deze rivier een lage afvoer kende, want de waterstanden blijven beneden gemiddeld hoogwater. De oorzaak van dit hoogwater moet dus gelegen zijn bovenstrooms van Koblenz. Verdere gegevens ontbreken, waardoor niets over de herkomst of de oorzaak gezegd kan worden. Het overschrijdingspercentage ten opzichte van MHW vertoont te Ruhrort een stijging, wat betekent dat de Ruhr een grote afvoer gehad zal hebben.

februari 1844

Ten aanzien van dit hoogwater gelden gelijke opmerkingen als voor het vorige voor wat betreft oorzaak en herkomst. Uit de waterstanden van de Moezel blijkt dat deze een zeer grote afvoer kende. Het overschrijdingspercentage te

Kochen bedraagt 57% ten opzichte van MW. De geleidelijke afname van de overschrijdingspercentages benedenstrooms van Keulen geeft aanleiding te veronderstellen dat Ruhr en Lippe een kleine afvoer hadden. De vermoedelijke herkomst ligt dan ook in de Vogezen en de Elzas.

maart 1845

Hoge waterstanden te Mannheim en Mainz geven aanleiding te veronderstellen dat de herkomst in Zuid-Duitsland ligt. Neckar, Main, Lahn en Moezel kenden grote afvoeren, wat erop wijst dat zware neerslag moet zijn gevallen, gepaard gaande met dooi. Overschrijdingspercentages van de zijrivieren zijn voor de Main te Frankfurt 98% en voor de Moezel te Kochen 41%. De waterstanden blijven ook in de Duitse laagvlakte hoog, echter het overschrijdingspercentage daalt zodat de Ruhr een matige bijdrage geleverd zal hebben. In de literatuur zijn niet meer gegevens gevonden dan de waterstanden, zoals vermeld in Der Rheinstrom (1889), terwijl de geschatte afvoer meer dan $10000 \text{ m}^3/\text{s}$ bedraagt. Dit wijst erop dat de gegevens van dit hoogwater mogelijk minder betrouwbaar zijn.

januari 1846

Geen gegevens zijn gevonden betreffende dit hoogwater, uitgezonderd de in Der Rheinstrom (1889) en in Gutachten (1929) genoemde waterstand te Keulen. Weinsprach geeft een afvoer van $8280 \text{ m}^3/\text{s}$.

februari 1850

De waterstanden van dit zeer hoge hoogwater, meer dan $10000 \text{ m}^3/\text{s}$ te Keulen, zijn niet bekend. In Der Rheinstrom (1889) en Gutachten (1929) wordt de waterstand te Keulen genoemd. Verder staan de waterstanden te Trier en Kochen ter beschikking. Uit het laatste blijkt dat de Moezel in ieder geval een zeer grote afvoer heeft gehad met een overschrijdingspercentage te Kochen van 56%.

Evenals voor het hoogwater van maart 1845 kan hier worden getwijfeld aan de juiste waarde van de afvoer en de waterstand.

februari 1862

Gegevens over dit hoogwater zijn schaars. Wel blijkt uit de beschikbare waterstanden volgens Der Rheinstrom (1889) en Gutachten (1929) dat de afvoeren relatief gering geweest zijn, hetgeen overeenkomt met de door Weinsprach opgegeven afvoer van $8500 \text{ m}^3/\text{s}$. De herkomst moet gezocht worden bovenstrooms van Koblenz of op de Moezel.

maart 1876

De overschrijdingspercentages van de waterstanden volgens Der Rheinstrom (1889) en Gutachten (1929) zijn bovenstrooms van Mannheim laag, terwijl de benedenstrooms grotere percentages bereikt worden. De oorzaak is dus neerslag en eventueel dooi in de stroomgebieden van Neckar en Main. De waterstanden benedenstrooms Koblenz zijn eveneens hoog, echter de topstanden worden twee tot vier dagen eerder bereikt dan te Mannheim. Dit wijst op een hoge hoezelsafvoer, die enige dagen voor de Rijngolf is afgestroomd (Gutachten, 1929). De neerslag zal uit westelijke richting over het stroomgebied van de Rijn zijn getrokken. Ruhr en Lippe hebben gezien de waterstanden op de Rijn respectievelijk een geringe en een behoorlijke afvoer gehad. De overschrijdingsduur van dit hoogwater bedraagt gemiddeld 33 dagen, wat zeer lang is.

november 1882

Dit hoogwater is gedetailleerd onderzocht en de bevindingen zijn vermeld in Der Rheinstrom (1889). De waterstanden op de Rijn in Zuid-Duitsland zijn niet extreem hoog. Vanaf Mannheim evenwel stijgt de waterstand snel en dit blijft het geval tot aan de Duits-Nederlandse grens. De overschrijdingspercentages van Mannheim tot Bonn zijn groter dan 50%. Alle zijrivieren kenden grote afvoeren, maar vrijwel alle ijlden vooruit op de Rijngolf. De Moezelgolf arriveerde gelijk met de Rijngolf te Koblenz wat de hoge waterstanden benedenstrooms van Koblenz verklaart (Der Rheinstrom, 1889). Het voorijlen blijkt duidelijk te Mannheim: op 24 novem-

ber steeg de waterstand tengevolge van opstuwing door de Neckarafvoer. Hierna trad een daling in, welke op 1 december gevolgd werd door de topstand tengevolge van de Rijn golf. Hetzelfde geldt voor de Ruhr, waarvan de afvoergolf reeds op 25 en 26 november de Rijn bereikte, dat wil zeggen drie dagen voor de Rijn golf (Gutachten, 1929).

Meteorologisch gezien stond het hele stroomgebied onder invloed van zware regenval, die vanuit het westen in de richting van het zuiden trok. Duidelijk dus een normale situatie, zoals genoemd onder ten vierde in paragraaf 3.1.2.

december 1882 / januari 1883

Der Rheinstrom (1889) wijdt veel aandacht aan dit hoogwater, waarvan de herkomst ligt in Zuid-Duitsland en de Alpen. De waterstanden te Basel, Kehl en Maxau zijn zeer hoog, terwijl benedenstrooms van Koblenz wel hoge, doch geen extreme waterstanden optreden, zoals blijkt uit de overschrijdingspercentages.

Der Rheinstrom (1889) vermeldt dat Moezel, Lahn en Nahe slechts geringe topafvoer hadden, waarbij de Moezel te Kochem het MHW met 24% overschreed. Ook blijkt uit de data van de topstanden dat Main en Neckar voor de Rijn golf afstroonden. Ruhr, Lippe en Sieg kenden grote afvoeren (Der Rheinstrom, 1889).

De oorzaak van dit hoogwater moet gezocht worden in een weersomslag op 26 december, die volgde op een periode met onweer en sneeuwval. De weersomslag ging gepaard met storm en regen, waarbij in de Alpendalen een föhn optrad. De watermassa's ontstaan tengevolge van dooi en neerslag, werden snel afgevoerd over de bevroren bodem. Een bijkomend ongunstig effect was de nog hoge Rijnafvoer, veroorzaakt door het hoogwater van november 1882.

december 1919 / januari 1920

Kenmerkend voor dit hoogwater is het optreden van twee golven, ongeveer 14 dagen na elkaar. De herkomst van beide

golven ligt in Zuid- en Midden-Duitsland (Gutachten, 1929). De eerste golf is veroorzaakt door regenval op 21 december in Midden-Duitsland en op 23 december in Zuid-Duitsland. Op 28 en 29 december valt opnieuw veel regen in respectievelijk Zuid- en Midden-Duitsland. Deze tweede neerslaghoeveelheid is ongunstiger dan de eerste in verband met het later vallen van de neerslag in de noordelijke delen van het Rijnstroomgebied, waardoor de afvoeren samenvallen, rekening houdend met de looptijden. In wezen bestaat de eerste afvoergolf dus uit twee toppen die door de zijdelingse toevoeren samenvallen. Het Gutachten (1929) vermeldt ook voor de Moezel twee toppen, waarvan de tweede samenviel met de Rijn golf veroorzaakt door de Neckar. De afvoer van de Moezel was niet buitengewoon groot. De Main had wel een grote afvoer. De tweede golf ontstond door neerslag op 10 en 11 januari in Midden-Duitsland en op 11 en 13 januari in Zuid-Duitsland. Opnieuw kende de Main een grote afvoer, maar ook de Moezel voerde nu aanzienlijk meer af dan tijdens de eerste golf (Gutachten, 1929). Tezamen met het feit dat de basisafvoer van de Rijn hoog was tengevolge van de eerste golf, ontstonden zeer grote afvoeren in met name het deel benedenstrooms van Koblenz, in tegenstelling tot de eerste golf welke de meeste invloed bovenstrooms van Mainz had. De overschrijdingspercentages bereiken waarden van 48% te Bonn en Keulen. Opgemerkt kan nog worden dat volgens Gutachten (1929) de zijrivieren benedenstrooms van Koblenz alle betrekkelijk laag waren, zowel tijdens de eerste als de tweede golf.

november 1924

Het hoogwater treedt op benedenstrooms van Koblenz, daar de waterstanden bovenstrooms beperkt blijven (Gutachten, 1929). Uit de waterstanden van de Moezel is af te leiden dat de afvoer groot is geweest, getuige ook het overschrijdingspercentage te Kochem van 51%.

De oorzaak van de topafvoer zal neerslag op de westelijke hellingen van de Vogezen zijn geweest. Gutachten (1929) vermeldt dat de afvoeren van Ruhr en Lippe laag geweest zijn, hetgeen ook blijkt uit de constante overschrijdings-

percentages van de waterstanden ten opzichte van MHW 1896/1920 op de Rijn.

december 1925 / januari 1926

Dit is het grootst bekende hoogwater. De oorzaken zijn terug te vinden in de sterk wisselende weersomstandigheden die in Europa heersten van eind november tot begin januari. Van eind november tot 9 december heerste vorst, gepaard gaande met sneeuwval. Dooi trad in van 9 tot 13 december, tengevolge van zuidwesten winden, welke warme lucht aanvoerden. Hoge afvoeren waren het gevolg. Een nieuwe periode van weersverslechtering zorgde voor vorst, regen en sneeuwval, waardoor een bevroren bodem in Mid-den-Duitsland ontstond. Een uiterst ongunstige situatie ontstond op 19 december, toen een zuidenwind de temperatuur deed stijgen en veel neerslag bracht tengevolge van het grote warmtetransport.

Een combinatie van factoren speelt dus een rol: een al aanwezige hoge basisafvoer tengevolge van de dooi van 9 tot 13 december, hevige neerslag van 26 december tot 1 januari, dooi en een verzadigde of bevroren bodem (Gutschten, 1929). Dit alles leidt tot zeer grote afvoeren van de Zwitserse Rijn en de Moezel, Neckar, Main, Lahn en Nahe. Gunstig werkte het feit dat Nahe en Neckar voorijlden, terwijl Main en Lahn achterliepen, gezien de data van de topstanden. Gunstig was ook dat de Ruhr slechts een geringe topafvoer kende met een overschrijdingspercentage te Mülheim van 45%. De Moezel daarentegen bepaalde de afvoer van de Rijn benedenstrooms van Koblenz grotendeels, daar zij samenviel met de Rijn golf en zelf de hoogste top uit haar historie kende. Het overschrijdingspercentage bedroeg te Kochem 62% en de afvoer $4100 \text{ m}^3/\text{s}$ (Hess, 1959). De invloed van dit hoogwater is in de benedenloop niet groot ondanks de hoogste overschrijdingspercentages, daar vele dijken in de Duitse laagvlakte hersteld en verhoogd waren na de schade ontstaan door dijkdoorbraken tijdens het hoogwater van 1919/1920 (zie ook paragraaf 3.2.3).

november 1930

Het hoogwater is ontstaan tengevolge van een regenrijke periode, die duurde van begin oktober tot eind november. Kenmerkend is dan ook dat drie hoogwatertoppen na elkaar optreden (Deutsche Gewässenkundliches Jahrbuch 1930 en 1931). De laatste topstand overschrijdt het MHW 1931/1940 te Keulen met 34%. Bovenstrooms van Mainz blijven de topstanden beneden MHW, hetgeen wijst op geringe afvoeren. Main, Neckar, Lahn en Nahe overschrijden juist het MHW. De Moezel had een grote afvoer getuige de waterstand te Kochem, die met 38% het MHW overschrijdt. Gegevens van de Ruhr zijn niet bekend, maar een grote afvoer zal niet opgetreden zijn, gezien de lage waterstanden op de Lippe. Het Moezelstroomgebied moet dus als herkomst van het hoogwater gezien worden, waarbij de reeds hoge basisafvoer tengevolge van de eerdere toppen een rol speelde.

februari 1932

De afvoer van dit hoogwater bedraagt te Keulen $7070 \text{ m}^3/\text{s}$. Te Lobith is de afvoer echter $7680 \text{ m}^3/\text{s}$, reden het toch te behandelen. Alle zijrivieren overschrijden het MHW met slechts geringe percentages. De herkomst is daarom niet vast te stellen. Meteorologisch gezien is de oorzaak van het hoogwater een front dat subtropische lucht naar Zuid-Duitsland stuurt, wat dooi en neerslag tot gevolg heeft.

december 1939

De zelfde reden als bij het voorgaande hoogwater is aanleiding dit hoogwater te bespreken, ondanks de afvoer te Keulen van $7240 \text{ m}^3/\text{s}$. Bovenstrooms van Koblenz ligt de herkomst van dit hoogwater, met name in de stroomgebieden van Neckar en Main. Waterstandgegevens ontbreken, echter het Monatlicher Witterungsbericht vermeldt dat de Neckar een grote afvoer had. De Moezel kende een kleine afvoer en ijelde drie dagen voor op de Rijn golf (overschrijdingspercentage te Kochem bedraagt 8%). Ter plaatse van Ruhr-ort en Wesel stijgt het overschrijdingspercentage op de

Rijn tot 30%. Ruhr en Lippe zullen dus hoge afvoeren hebben gekend. De waterstanden bevestigen dit.

januari 1941

Een korte periode met zuidwestenwind veroorzaakte neerslag en dooi in geheel Duitsland (Monatlicher Witterungsbericht). Overschrijdingspercentages van 20% en hoger worden bereikt. Met name de Moezel kende een grote afvoer. Zij overschreed te Trier het MHW met 138 cm, dat wil zeggen 28%. Ruhr en Lippe overschreden MHW in het geheel niet. Geen gegevens zijn voorhanden van Neckar en Main. Grote afvoeren zullen daar niet opgetreden zijn, gezien de geringe opstuwing te Mannheim en Mainz.

maart 1942

Het Monatlicher Witterungsbericht vermeldt als herkomst van het hoogwater de stroomgebieden van Lahn, Neckar en Main. Lahn en Lippe overschrijden beide MHW met respectievelijk 10 en 4%, waarbij moet worden opgemerkt dat beide golven voorijlen op de Rijn. Van Neckar en Main ontbreken gegevens. Ruhr en Moezel overschrijden MHW niet.

Vanwege het voorijlen van Lahn en Lippe zal de afvoer van Neckar en Main de grootste invloed hebben gehad op de waterstanden.

De oorzaak van het hoogwater is het intreden van dooi, wat werd veroorzaakt door depressies uit het westen (Monatlicher Witterungsbericht).

november 1944

Het hoogwater is een gevolg van grote afvoer van Moezel, Neckar en Main (Monatlicher Witterungsbericht). De Moezel overschrijdt te Trier MHW met 18% gedurende 5 dagen. Gezien de data van de topstanden op de peilschalen benedenstrooms van Koblenz is de Moezelgolf de Rijn. Van Neckar en Main zijn geen nadere gegevens beschikbaar dan de hoge waterstanden te Mannheim en Mainz op de Rijn. Gedeeltelijk zijn deze veroorzaakt door op-

stuwing en gedeeltelijk door een hoge afvoer van de Zwitserse Rijn. Nahe, Ruhr en Lippe onderschreden het MHW. De oorzaak van het hoogwater is gelegen in langdurige neerslag in Zuid-Duitsland tengevolge van de aanvoer van warme zuidelijke lucht (Monatlicher Witterungsbericht).

februari 1945

Kleine overschrijdingen van MHW bovenstrooms van Bingen doen geringe afvoeren van Neckar en Main veronderstellen. Het Monatlicher Witterungsbericht noemt de Moezel als oorzaak, hetgeen overeenstemt met de overschrijdingspercentages van 8 en 9% te Trier en Kochem. De Moezel ijfde 1 dag voor op de Rijn golf. Ruhr, Lippe en Nahe onderschreden MHW. De overschrijdingsduur van het hoogwater is in het Ruhrgebied met 12 à 13 dagen vrij lang. Talloze ingestorte bruggen tengevolge van oorlogshandelingen zijn hiervan de oorzaak. Deze veroorzaakten opstuwingen, waardoor hoge waterstanden optreden.

februari 1946

Het hoogwater doet zich getuige de geleidelijk groter wordende overschrijdingspercentages van de waterstanden, het meeste gelden in de Duitse laagvlakte. Te Ruhrort en Wesel worden percentages bereikt van respectievelijk 35 en 39%. De Ruhr kende één van zijn grooste afvoeren uit de historie met $1500 \text{ m}^3/\text{s}$. Hetzelfde geldt voor de Lippe met een afvoer van $750 \text{ m}^3/\text{s}$ (Hess, 1959). De overschrijdingspercentages van de waterstanden bedragen respectievelijk 25 en 33%.

Het Monatlicher Witterungsbericht noemt als rivieren met een grote afvoer: Neckar, Main, Moezel, Lahn, Lippe en Ruhr, hetgeen overeenkomt met in de bijlagen vermelde gegevens.

De herkomst van het hoogwater is moeilijk te bepalen gezien de vele rivieren die een bijdrage geleverd hebben. Meteorologische gegevens ontbreken volledig.

januari 1948

Het hoogwater is een gevolg van topafvoeren van Main en Moezel (Monatlicher Witterungsbericht). Te Mannheim, Worms en Mainz overschreden de topstanden MHW met respectievelijk 25, 28 en 22%. In verband hiermee en gezien de lage waterstand te Rheinweiler moet de Neckar ook een hoge afvoer gehad hebben. Het Monatlicher Witterungsbericht bevestigt dit.

Alle overige rivieren overschreden MHW ook aanzienlijk, waarbij op de Moezel zelfs een percentage van 62% te Trier werd bereikt. Dit hoge hoogwater overschreed te Keulen het MHW met 300 cm ofwel met 47%.

De oorzaak moet worden gezocht in extreme meteorologische omstandigheden. Veel sneeuw valt er van 15 tot 23 december 1947 in Zuid-Duitsland. Op 27 december treedt een weersomslag in: een front trekt van noord naar zuid over het stroomgebied en doet de sneeuw smelten en laat tegelijkertijd zware neerslag vallen. Grote schade is het gevolg van de hoge afvoer. Overstromingen te Kehl en in de Rheingau, talrijke vernielde bruggen over de Neckar, Main en Lahn (Monatlicher Witterungsbericht, zie ook paragraaf 3.2.3).

december 1952

Het hoogwater kende twee toppen, waarvan de eerste lager was dan de tweede. Neckar en Moezel overschrijden MHW zeer ruim met percentages van respectievelijk ongeveer 40 en 25%. Hetzelfde geldt voor de Nahe. Main, Lahn, Ruhr en Lippe blijven beneden MHW. Uit de data van topstanden blijkt de Moezel voor te ijlen op de Rijngolf, zodat de invloed van de grote afvoeren van Neckar, Nahe en Moezel tot benedenstrooms van Koblenz beperkt blijft. De overschrijdingsduur en het overschrijdingspercentage ten opzichte van MHW bedragen te Keulen respectievelijk 6 dagen en 22%.

De oorzaak van het hoogwater is dooi tengevolge van een uitloper van een lagedrukgebied boven de Noordzee (Monatlicher Witterungsbericht).

januari 1955

De waterstanden van het hoogwater overschreden overal MHW. In Zuid-Duitsland werden de hoogste percentages bereikt te Mannheim met 48% en Worms met 53%. Neckar en Moezel kenden grote afvoeren (Monatlicher Witterungsbericht). De Moezel overschreed MHW te Kochem met 39%. Tot Keulen bleven de percentages boven de 40%. Benedenstrooms van Keulen dalen ze tot ongeveer 20%. Ruhr en Lippe overschreden MHW niet. De herkomst van het hoogwater is daarom gelegen in Zuid-Duitsland. De meteorologische oorzaak is een voortdurende afwisseling van dooi en vorst, gepaard gaande met neerslag, vanaf begin december 1954. Een hoge basisafvoer was hierdoor aanwezig toen van 14 tot 17 januari Atlantische cyclonen de temperaturen deden stijgen, hetgeen dooi en zware neerslag veroorzaakte (Monatlicher Witterungsbericht).

maart 1956

Het hoogwater overschreed te Keulen de $7500 \text{ m}^3/\text{s}$ niet. Toch hier behandeld vanwege een afvoer van $7610 \text{ m}^3/\text{s}$ te Lobith. De grote afvoeren treden bovenstrooms van Koblenz op. Neckar, Main en Lahn kenden grote afvoeren, waarbij de Lahn MHW overschreed met 38% en de Neckar te Heidelberg 415 cm boven het stuwpeil stond. Moezel en Nahe hadden een kleine afvoer. Ruhr en Lippe overschreden MHW wel, maar gedurende slechts korte tijd. De herkomst van het hoogwater is dus Midden- en Zuid-Duitsland, waarbij Ruhr en Lippe zorgden voor een toename van de afvoer te Emmerich ten opzichte van de afvoer te Keulen. De oorzaak van het hoogwater is dooi volgens het Monatlicher Witterungsbericht.

februari 1958

Het hoogwater bestond uit twee golven. De eerste golf van half februari zorgde voor een hoge basisafvoer en is in hoofdzaak afkomstig van de Moezel, waarbij te Trier het MHW met 30% werd overschreden. Deze eerste Moezelgolf

ijlde voor op de Rijn golf, waardoor de waterstanden benedenstrooms van Keulen beperkt bleven. De tweede golf is veroorzaakt door Neckar, Lahn en Moezel (Monatlicher Witterungsbericht). De Neckar overschreed het stuwpeil met 274 cm, dus met meer dan 50%. Lahn en Moezel overschreden het MHW met ongeveer 15%. In de Duitse laagvlakte kenden Ruhr en Lippe een geringe afvoer, waarbij de waterstanden juist boven MHW lagen. De oorzaak van beide golven is dooi en neerslag tengevolge van fronten (Monatlicher Witterungsbericht).

februari 1970

Dit zeer hoge hoogwater bereikte een afvoer van 9740 m³/s te Keulen. Evenals in 1958 traden twee toppen circa 14 dagen na elkaar op, zodat ten tijde van de hoogste golf, eind februari, een hoge basisafvoer aanwezig was.

De waterstanden liepen bovenstrooms van Koblenz hoog op met overschrijdingspercentages van meer dan 40%. Te Rheineweiler kende de Rijn reeds een grote afvoer met een overschrijdingspercentage van 17%. Neckar en Main vergrootten de afvoer, waarbij de Neckar 2 dagen voorijlde.

Benedenstrooms van Koblenz bepalen Moezel en Lahn de afvoer. Beide ijlen 2 à 3 dagen voor op de Rijn golf en overschrijden MHW met ongeveer 18%. Ruhr en Lippe overschreden MHW met respectievelijk 8 en 9%, terwijl beide rivieren 3 dagen voorijlden.

De herkomst van het hoogwater is moeilijk vast te stellen, daar vrijwel alle zijrivieren een bijdrage leverden, maar niet samenvielen met de hoofdgolf.

Meteorologisch gezien is langdurige neerslag in de Duitse laagvlakte en de Vogezen van 21 tot 23 februari en dooi in Zuid- en Midden-Duitsland van 18 tot 23 februari de oorzaak. Storingen, aangevoerd door westenwinden, blijven boven Midden-Europa hangen, tengevolge van een hogedrukgebied boven Oost-Europa (Monatlicher Witterungsbericht).

3.2.3 Vergelijking van opgetreden hoogwaters

De topafvoeren van 1876, 1882, 1882/83, 1919/20, 1924, 1925/26, 1948, 1955 en 1970 zullen worden vergeleken. Beschouwd zullen worden: overschrijdingsduur en overschrijdingspercentage ten opzichte van MHW, meteorologische omstandigheden, opgetreden schade en herkomst van het hoogwater. Alles zal worden vergeleken met het grootste hoogwater uit de historie, dat van 1925/26, en staat vermeld in de tabel op pagina 33. Op de bijlagen 26 t/m 28 zijn enkele gegevens van de genoemde hoogwaters in grafische vorm tegen elkaar uitgezet.

Uit genoemde bijlagen is af te lezen dat de hoogwaters van 1876, 1882, 1882/83 en 1919/20 langer duurden dan het hoogwater van 1925/26. Het name de twee eerstgenoemde duurden veel langer, respectievelijk ongeveer drie- en tweemaal zo lang. Beide hoogwaters bereikten bovenstrooms van Koblenz ook hogere waterstanden dan in 1925/26, maar benedenstrooms van Koblenz waren de toppen lager. Een zelfde tendens vertoonde het hoogwater 1882/83, echter minder uitgesproken.

Het hoogwater 1919/20 veroorzaakte na 1925/26 de hoogste waterstanden. Het betrof hier evenwel de eerste golf. De tweede was korter van duur en kende lagere waterstanden. Lagere waterstanden dan in 1925/26 werden ook veroorzaakt door de hoogwaters in 1924, 1948 en 1955. Bovenstrooms van Bingen echter bereikte het hoogwater in 1955 de hoogste waterstanden uit de historie. Genoemde hoogwaters duurden alle korter, met uitzondering van 1948, dan 1925/26.

Vergelijken we tenslotte het meest recente hoogwater 1970 met dat van 1925/26, dan valt op dat dit hoogwater in Zuid-Duitsland even lang duurde, maar hogere waterstanden bereikte. Benedenstrooms van Koblenz echter duurde het hoogwater korter.

Indien we de 9 genoemde hoogwaters nader vergelijken ten aanzien van het overschrijdingspercentage te Keulen en Emmerich, dan blijken de afvoeren van 1925/26 en 1919/20 de hoogste waarden te hebben bereikt. Opvallend is verder het hoge overschrijdingspercentage dat het hoogwater 1882, 83 te Emmerich bereikt, terwijl de afvoer relatief gering is. Een relatief kleine overschrijding ten opzichte van de overige hoogwaters, in aanmerking genomen hun grote afvoeren, bereiken de hoogwaters 1955 en 1970.

hoogwater	afvoer (m ³ /s)	Keulen duur (dagen)	over- schr. (%)	rang orde	Emmerich duur (dagen)	over- schr. (%)	rang orde	herkomst
1876	9020	32	35	9	33	22	5/6/7	bovenstr. Neckar, Main benedenstr. Moezel
1882	10700	23½	47	3/4	17½	24	4	bovenstr. Neckar benedenstr. Moezel
1882/ 83	9400	14	38	6	14	25	3	Zd-Duitsland + Ruhr, Lippe
1919/ 20	11100	10	48	2	11	26	2	Mid. & Zd-Duitsland (Moezel en Neckar)
1924	9420	6	36	7/8	7	21	8	Moezel
1925/ 26	11300	9½	50	1	12½	31	1	Zwarte Woud + Moezel
1948	9460	4½	47	3/4	11½	22	5/6/7	Main, Moezel
1955	9540	6½	41	5	7	20	9	Neckar, Moezel
1970	9740	7	36	7/8	8	22	5/6/7	Zd-Duitsland benedenstr. Moezel, Lehn

Een meteorologische vergelijking leert dat de oorzaak van alle hoogwaters neerslag in de vorm van regen is. Vrijwel altijd gaat dit gepaard met dooi tengevolge van stijgende temperaturen.

In Zuid- en Midden-Duitsland kunnen een bevroren bodem tengevolge van vorst in de voorafgaande periode en het optreden van een föhn een rol spelen, zoals in 1882/83 en 1925/26. In de stroomgebieden van Moezel, Lahn, Ruhr en Lippe is een verzadigde bodem tengevolge van langdurige neerslag aanleiding tot verhoogde afvoeren, zoals in 1970. Het gelijktijdig optreden van deze meteorologische condities trad op in 1925/26.

Zoals reeds vermeld in paragraaf 3.12 is de normale situatie dat dooi en neerslag het stroomgebied vanuit het westen binnentrekken. Dit gebeurde in 1882, 1920 en 1948 (Der Rhein, 1951).

Van zuid naar noord gaande neerslag en dooi is aanzienlijk ongunstiger door het mogelijk gaan samenvallen van de golf-toppen van de zijrivieren met de hoofdgolf op de Rijn. In 1925/26 deden deze omstandigheden zich voor, waarbij de Moezel wel, maar de Neckar en de Main niet samenvielen met de golf op de Rijn.

Hogelijk kan een bestudering van de heersende weersomstandigheden en de weersomstandigheden tijdens de maand daarvoor leiden tot voorspellingen ten aanzien van te verwachten afvoeren. Van Malde (1959) heeft hiertoe een aanzet gegeven door voorspellingen te koppelen aan de dikte van het sneeuwdek.

De herkomst van de hoogwaters beschouwd naar de streek waar ze ontstaan, levert twee hoofdgebieden op: Zuid-Duitsland en het stroomgebied van de Moezel. De Moezel-invloed is de belangrijkste, daar vele topafvoeren uit Zuid-Duitsland na Mainz hun betekenis verliezen. Slechts de extreem hoge afvoeren ontstaan tengevolge van een samengaan van beide invloeden. De afvoeren kleiner dan $9000 \text{ m}^3/\text{s}$ kunnen worden veroorzaakt door een combinatie van hoge basisafvoer tengevolge van een relatief geringe

Moezelafvoer en een hoge afvoer van Ruhr en Lippe. Een voorbeeld hiervan is 1946. Nauwkeuriger aangeven van de herkomst is niet mogelijk op grond van de ter beschikking staande gegevens.

Verschuivingen in de zin van een in de tijd toenemende invloed van een bepaalde streek of fenomeen, zijn in de topafvoeren niet te constateren. Op te merken is wel dat voor relatief matige hoogwaters de invloed van het weer in één streek maatgevend kan zijn. Voor de extremen moet het weer in verschillende streken ongunstig zijn, zodat de toppen tezamen kunnen optreden.

Omtrent de schade aangericht door hoogwaters zijn slechts gegevens voorhanden van de hoogwaters 1919/20, 1925/26 en 1948. Gutachten (1929) vermeldt dat tijdens het hoogwater 1919/20 dijkdoorbraken hebben plaats gehad in de omgeving van Wesel en Düsseldorf. Vele zomerpolders tussen Wesel en Emmerich zijn ondergestroomd, waaronder de Rückstaupolder. Het totaal ondergelopen gebied was ongeveer 10000 ha groot (Hess, 1959). Schattingen van de aangerichte schade zijn niet bekend!

Het hoogwater 1925/26 veroorzaakte in de Duitse laagvlakte minder schade, doordat maatregelen waren genomen tegen overstromingen na het hoogwater 1919/20 (Hillen, 1975). Dijkdoorbraken traden slechts op te Langel, bovenstrooms van Keulen en te Neuss. Op andere plaatsen werden de bandijken overstroomd, maar bleven intact (Gutachten, 1929). Veel cultuurland werd verwoest tengevolge van sedimentafzettingen en huizen en gebouwen zijn ingestort of werden onbewoonbaar. In de zijrivieren moesten vooral kunstwerken als bruggen en wegen het ontgelden. De schade in de deelstaat Pruisen werd geschat op 100 miljoen RM (Gutachten, 1929).

Ten aanzien van 1948 worden in het Monatlicher Witterungsbericht overstromingen genoemd te Kehl en in de Rheingau.

Diverse bruggen en spoorbanen over en langs de Lahn, Neckar en Main werden vernield. Een dam in de Lahn te Grossfelden brak door, waardoor straten en landerijen overstroomden en afgedekt werden met grind en zand. Ook Neckar en Main brachten veel schade toe aan ingezaaide gewassen. Tengevolge van de Neckarafvoer werd aan overheidseigendommen een schade toegebracht van 1 miljoen RM.

Dat de topafvoeren van de jongste hoogwaters niet groter zijn dan de voorgaande, kan worden aangetoond door het gemiddelde van de jaarlijkse hoogwaters over telkens 20 jaar te Keulen te bepalen. Er blijkt dan geen sprake te zijn van een duidelijke toe- of afname van het MHW (Gutachten, 1929).

	<u>1821- 1840</u>	<u>1841- 1860</u>	<u>1861- 1880</u>	<u>1881- 1900</u>	<u>1901- 1920</u>	<u>1921- 1940</u>	<u>1941- 1960</u>	<u>1961- 1969</u>
Keulen	656	693	642	667	643	631	665	657
Emmerich	602	601	578	590	598	592	566	557

Opm.: De peilschaal te Emmerich is in 1951 verlaagd van 10,05 tot 8,05 ü.NN. Evenzo is de peilschaal te Keulen verhoogd van 35,93 tot 35,98 ü.NN. De waargenomen waterstanden zijn voor de periode 1951 t/m 1969 dienovereenkomstig respectievelijk 2 m verlaagd en 0,05 m verhoogd, opdat een vergelijkbaar gemiddelde bepaald kon worden.

Daar de bodem te Keulen gedaald is tussen 1880 en 1920, zou men kunnen aanvoeren dat de hoogwaters toch grotere afvoeren kennen. Vergelijking met een andere peilschaal waar de bodem niet wezenlijk veranderd is, zal dit moeten weerleggen. De peilschaal Emmerich voldoet hieraan voor de periode 1820 t/m 1930. Na 1930 treden grote bodemdalingen op (Hillen, 1975), hetgeen blijkt uit de drie laatst genoemde waarden voor Emmerich. Vanaf 1930 treden te Keulen evenwel geen aantoonbare bodemdalingen meer op (Hillen, 1975).

De beide reeksen beschouwend, is er geen aanleiding een bepaalde trend in de grootte van de hoogwaterafvoeren te

veronderstellen.

Willen verschuivingen aantoonbaar zijn, dan zullen langere reeksen waarnemingen nodig zijn. Overigens is het dan nog de vraag of iets zinvol gezegd kan worden, daar klimaatveranderingen slechts zeer moeilijk zijn vast te stellen.

3.2.4 Slotbeschouwing

De periode van 1820 tot 1975 beschouwend, leert dat de extreme hoogwaters opgetreden zijn in groepen met tussenpozen van 25 tot 40 jaar. We zien hoogwaters in de periode van 1845 tot 1850, van 1876 tot 1883 en van 1919 tot 1926. De mogelijke oorzaak hiervan moet wellicht gezocht worden in klimatologische perioden. Vastgesteld kan worden dat de oorzaken van hoogwaters gelegen zijn in bijzondere weersomstandigheden, waarbij zware neerslag meestal en sneeuwval met daarna dooi vaak optreedt. Voor de zeer hoge afvoeren geldt de combinatie neerslag, sneeuwval, dooi bijna altijd. De beschrijving van hoogwaters in paragraaf 3.2.2 laat zien dat een extreem hoogwater optreedt onder condities die afhankelijk zijn van de weersgesteldheid in een voorgaande maand. Situaties welke een ongunstig gevolg kunnen hebben, zijn:

- 1e) vorst en sneeuwval welke zorgen voor accumulatie van grote watermassa's, gevolgd door sterke dooi met zware regenbuien
- 2e) vorst en sneeuwval (accumulatie van water), gevolgd door een korte periode van dooi met enige regen (hierdoor ontstaat een hoge basisafvoer en geraakt de bodem op veldcapaciteit), waarna een nieuwe periode van vorst en sneeuwval gevolgd wordt door dooi en neerslag die over het stroomgebied trekken van zuid naar noord, waardoor golftoppen van Rijn en zijrivieren kunnen samenvallen tengevolge van de looptijden bij de zijrivieren.

Omstandigheden als deze zijn in het verleden opgetreden, echter niet alle gedeelten van het stroomgebied hadden een even groot aandeel. Diverse combinaties van hoogwaters uit het verleden zijn op te stellen (Hess, 1959), waarvoor verwezen wordt naar hoofdstuk 3.3 van deze studie. Mis-

schien kunnen voorspellingen ten aanzien van te verwachten afvoeren worden afgeleid uit meteorologische omstandigheden (paragraaf 3.2.3; Van Malde, 1959).

De voor Nederland en de Duitse laagvlakte belangrijke afvoeren zijn vrijwel alle het gevolg van hoge Moezelafvoeren, zoals is aangetoond in paragraaf 3.2.3. Vanaf Koblenz lopen de topstanden veel hoger op dan meer bovenstrooms, hetgeen duidelijk blijkt uit bijlage 13. Samenvallen van een hoogwatertop van bovenstrooms van Koblenz en van de Moezel is mogelijk. Afhankelijk van diverse omstandigheden kwam in het verleden nu eens deze, dan weer de andere top met enkele dagen verschil als eerste in Koblenz aan.

Belangrijk is de constatering in paragraaf 3.2.3, dat er in het MHW geen tendens valt te onderkennen die wijst op een toename van de waterstanden bij jongere hoogwaters ten opzichte van de oudere. Hieruit mag niet de conclusie worden getrokken dat een grotere afvoer dan die van 1925/26 niet mogelijk zou zijn.

Samenvattend kan gesteld worden dat het grootste bekende hoogwater in de beschouwde periode -- dat van 1925/26 -- weliswaar niet overtroffen is, maar dat dit geen onmogelijkheid is. Gunstig werkende factoren als lage afvoeren van Ruhr en Lippe, zo ook het voor- of nalijven van Neckar- en Maingolf op de Rijn golf beperkten de afvoer in 1925/26. Werken dergelijke factoren tegengesteld, dan kunnen aanzienlijk grotere afvoeren ontstaan.

3.3 Maatgevende afvoer

3.3.1 Algemeen

Diverse onderzoekers en instanties hebben zich beziggehouden met het bepalen van de maatgevende afvoer. Het gevolg is dat de afvoeren welke genoemd worden als maatgevend uiteenlopen, ondanks het gebruik van gelijke normen ten aanzien van frequenties.

De oorzaken hiervan zijn enerzijds de verschillende methoden die worden gehanteerd, anderzijds de subjectieve elementen die verborgen zitten in de gebruikte methoden. Als voorbeeld van het laatste kan worden genoemd het trekken van de best-passende-rechte bij extrapolatiemethoden.

De factoren welke de vaststelling van de maatgevende afvoer beïnvloeden, kunnen worden ingedeeld in een aantal groepen: de meteorologische omstandigheden, het stroomgebied, de rivierbedding of de beschikbaarheid van waarnemingsmateriaal. Achtereenvolgens zullen moeilijkheden, die genoemde factoren veroorzaken bij de bepaling van maatgevende afvoeren, worden besproken.

De meteorologische omstandigheden op een bepaald tijdstip zijn het gevolg van het heersende klimaat.

Het klimaat is geen constante factor, maar een natuurverschijnsel met een sterk stochastisch karakter. De kennis van het klimaat en het weer is nog te beperkt om conclusies te mogen trekken ten aanzien van maximaal mogelijke afvoeren. Vanwege de nog beperkte kennis is het ook niet mogelijk het hydrologisch waarnemingsmateriaal te corrigeren naar klimaatschommelingen, zo die ooit kunnen worden onderscheiden ten opzichte van klimaatwijzigingen (Van Urk, 1976 b). Periodiciteit, trends en persistenties zijn het gevolg van deze meteorologische omstandigheden, waardoor de afvoeren worden beïnvloed.

Veranderende omstandigheden in het stroomgebied hebben gevolgen voor het afvoerverloop. Te denken valt aan:

<u>ingreep</u>	<u>effect op de afvoer</u>
ontbossing	versnelling
verstedelijking	versnelling
industrie- en ()	
drinkwatergebruik)	vertraging
irrigatie	vertraging

De invloed van dergelijke ingrepen is kwalitatief moeilijk te bepalen, maar zij verstoren wel de homogeniteit van het waarnemingsmateriaal.

De veranderingen in het rivierbed en de gevolgen staan vermeld in het volgende staatje:

<u>ingreep</u>	<u>effect op de hoge afvoertoppen</u>
aanleg stuwmeren	vermindering/vertraging
bochtafsnijding	versnelling
bedijking	versnelling
bodemdeling	afhankelijk van plaats en topgrootte
kanalisatie	versnelling

Het fysisch systeem waarin een bepaalde afvoer plaats heeft, is dus niet constant. Correcties aanbrengen is een niet eenvoudige zaak, want vele daarvoor benodigde gegevens ontbreken meestal.

Het beschikbare waarnemingsmateriaal geeft aanleiding tot problemen met betrekking tot de juistheid van de gegevens. De waarnemingen moeten onderling onafhankelijk en aselekt getrokken zijn (random) en afkomstig zijn uit dezelfde populatie (homogeen). Gevolgen van deze eisen zijn:

- wijziging van meetplaats kan tot gevolg hebben dat niet meer hetzelfde verschijnsel wordt gemeten
- hoge afvoeren, welke nogal eens aanleiding zijn dat een begin wordt gemaakt met het doen van waarnemingen, zijn als beginwaarde van een reeks niet toevallig (Jurriëns, 1976)

- een topafvoer welke binnen de reeks valt, maar waarvan bekend is dat deze veel zeldzamer is, is niet afkomstig uit dezelfde populatie. Een voorbeeld hiervan is de afvoer van 1925/26, die in een periode van 200 jaar niet is overschreden en waarvoor aanwijzingen zijn dat deze periode veel groter is (Van Urk, 1976 a).

Het hier gegeven overzicht is zeker niet volledig: slechts enkele zaken zijn genoemd. Alle hebben ze gemeen dat ze invloed uitoefenen op de bepaling van de maatgevende afvoer. Het kwantificeren van de effecten is echter nauwelijks of in het geheel niet mogelijk, waardoor de uitkomsten van alle methoden ter bepaling van de maatgevende afvoer een zekere mate van onbetrouwbaarheid bezitten. De methoden welke in het verleden gehanteerd zijn, waren alle gebaseerd op een bepaalde grootheid of verschijnsel. Deze kunnen zijn: de meteorologische omstandigheden, een historisch hoogwater, de afvoerverlooplijn en de opgetreden topafvoeren. Op basis hiervan zijn mogelijkheden aanwezig om de maatgevende afvoer te bepalen. De diverse methoden zijn de volgende:

- 1e) bepaling maatgevende afvoer uit de meteorologie
- 2e) bepaling maatgevende afvoer door verhoging van de afvoer van een historisch hoogwater
- 3e) bepaling maatgevende afvoer door sommatie van extreme afvoeren van de Rijn en haar zijrivieren
- 4e) bepaling maatgevende afvoer door splitsing van een topafvoer in een beginafvoer en een verhoging
- 5e) bepaling maatgevende afvoer door extrapolatie van frequentiekrommen van opgetreden topafvoeren.

In paragraaf 3.3.3 e.v. zullen de genoemde methoden nader worden toegelicht, waarbij de resultaten kritisch zullen worden beschouwd. Een overzichtstabel van de verschillende maatgevende afvoeren staat vermeld op bijlage 34.

Allereerst zal echter aandacht worden besteed aan frequenties en daarmee samenhangende problemen.

3.3.2 Frequentiekrommen

Eén van de methoden om de maatgevende afvoer te bepalen berust op de extrapolatie van een frequentiekromme. Deze methode is afgeleid uit de statistiek en berust op de aanname dat een reeks hydrologische waarnemingen voldoet aan een bepaalde verdeling.

In de praktijk zijn vele verdelingen bekend; te noemen zijn: de Fisher-Tippett-Gumbel verdeling, de Pearson-III verdeling, de log-Pearson-III verdeling, de Galton verdeling, de Goodrich verdeling, de Füller-Coutagne verdeling, de normale en de log-normale verdeling en de Frechet verdeling.

Veel verdelingen staan dus ter beschikking welke moet worden toegepast, dient echter te worden onderzocht. Dit wil zeggen dat de verdelingsfunctie, die in eerste instantie gekozen is, moet aansluiten bij de waarnemingsreeks. Hiervoor staan toetsen ter beschikking die elkaar soms tegenspreken. De keuze wordt dan subjectief.

Uit het grote aantal verdelingen en het subjectieve element in de keuze van de te gebruiken verdeling is een aanwijzing te distilleren voor de verschillen in maatgevende afvoer welke kunnen ontstaan bij gebruikmaking van een gelijke overschrijdingsfrequentie (zie paragraaf 3.3.1).

Het waarnemingsmateriaal waarmee een extrapolatie moet worden uitgevoerd, dient te voldoen aan een aantal eisen, wil een statistische verwerking toelaatbaar zijn. Deze eisen betreffen de homogeniteit, de onafhankelijkheid, het stationair zijn en de toevalligheid (Jurriëns, 1976). Homogeen wil zeggen dat de afvoeren hebben plaatsgevonden in een zelfde fysisch systeem. Praktisch gezien is dit uitgesloten, want altijd zullen wijzigingen opgetreden zijn. Correcties op de afvoeren kunnen de homogeniteit verbeteren.

De waarnemingen moeten onafhankelijk van elkaar zijn, daar anders de onderlinge beïnvloeding een rol speelt. Het optreden van hoogwaters moet toevallig zijn, dat wil zeggen een stochastisch karakter dragen. Een hoge afvoer

tengevolge van het droogzetten van een stuwmeer is niet toevallig.

De afvoeren moeten stationair zijn: dus trends, periodiciteiten en persistenties (het doorzetten van bepaalde verschijnselen over lange tijd) mogen niet optreden. Het waarnemingsmateriaal zal moeten worden getoetst op deze eisen.

Is een bepaalde verdeling gekozen op grond van toetsen, dan moeten de waarnemingen grafisch worden weergegeven ("geplot"). De wijze van plotten geschiedt met behulp van een plotformule, die een functie is van het totaal aantal waarnemingen en van het rangordenummer van een bepaalde grootheid, in dit geval de afvoer. De bekendste zijn de California-formule en de formules van Hazen, Chegodayev en Weibull (Jurriëns, 1976). Toepassing van één dezer formules leidt dus tot afwijkingen ten opzichte van toepassing van een andere.

Ten behoeve van extrapolatie is het noodzakelijk een rechte te bepalen die zo goed mogelijk aansluit bij de geplotte waarden. Het trekken van deze zogenaamde bestpassende-rechte met de hand is aan te bevelen. Wiskundige methoden als de kleinste-kwadraten-methode, de momentenmethode en de maximale aannemelijkheid doen voorkomen alsof hiermee een grote nauwkeurigheid is te bereiken. Dit is niet juist (Jurriëns, 1976) en daarnaast zijn ze bewerkelijk.

Is geen rechte te trekken, dan moet men die ook niet trekken maar een transformatie toepassen. Een bepaalde verdeling is geen wetmatigheid die bij die rivier behoort (Schoemaker, 1975).

De meest algemene fout is het gebruik van betrouwbaarheidsbanden als de 2/3- en de 95%-band. Men suggereert hiermee dat bij een bepaalde herhalingstijd de afvoer tussen een maximum en een minimum-waarde ligt. Dit is principieel onjuist, want de afvoer is een vaststaand gegeven. De afwijkingen komen niet in de afvoer, maar in de herhalingstijd tot uitdrukking (Schoemaker, 1975).

In het voorgaande zijn een aantal opmerkingen gemaakt over frequentiekrommen. Gesteld moet worden, dat met vrucht van deze wiskundige hulpmiddelen gebruik kan worden gemaakt voor de bepaling van extremen, maar dat toepassing een grote zorgvuldigheid vereist.

3.3.3 Bepaling maatgevende afvoer uit de meteorologie

De basis voor een bepaling van de maatgevende afvoer is de weersgesteldheid en met name de neerslag. Met behulp van de statistiek kunnen de neerslagcijfers worden omgewerkt tot een maatgevende afvoer met een bepaalde overschrijdingsfrequentie. Veelal echter is het werkelijke doel van het onderzoek de vaststelling van een fysisch maximum, dat wil zeggen de bepaling van de maximaal mogelijke rivierafvoer. Van Urk (1976 a) is op grond van literatuur-onderzoek tot een mogelijke afvoer van de Rijn gekomen, die ligt tussen de 13000 en 40000 m³/s. Het KNMI heeft bevestigd dat een afvoer van 40000 m³/s niet voor onmogelijk moet worden gehouden. Een overschrijdingsfunctie behorend bij een afvoer van 40000 m³/s is niet te bepalen. Zoals reeds gesteld in paragraaf 3.1.2 is de kennis van het klimaat nog zeer beperkt. Het gevolg is dat geen vergaande conclusies mogen worden getrokken uit de genoemde afvoer. De mate van onnauwkeurigheid en onbetrouwbaarheid zal groot zijn. Wel is een dergelijke berekening van belang voor de onderlinge vergelijking van maatgevende afvoeren.

3.3.4 Bepaling maatgevende afvoer door verhoging van de afvoer van een historisch hoogwater

In paragraaf 3.2.4 is reeds vermeld dat, door uit te gaan van een bepaald hoogwater, combinaties zijn op te stellen voor extreme hoogwaters. Hess (1959) vermeldt berekeningen van D.Wiener, welke leiden tot een drietal mogelijkheden, te weten:

- 1e) De afvoer van 1882/83 op de Rijn bovenstrooms van Koblenz valt samen met de afvoer van de Moezel in 1925/26. De afvoer is dan 1600 m³/s groter dan

in 1925/26, wat resulteert in een afvoer te Keulen van $12900 \text{ m}^3/\text{s}$ en te Wezel van $13600 \text{ m}^3/\text{s}$.

- 2e) De afvoer van 1925/26 bovenstrooms van Ruhrort wordt verhoogd met de afvoer van Ruhr en Lippe uit 1946. De Ruhr kende toen een afvoer van $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ (tegen $900 \text{ m}^3/\text{s}$ in 1925/26) en de Lippe $750 \text{ m}^3/\text{s}$ (tegen $250 \text{ m}^3/\text{s}$ in 1925/26). Dit heeft een verhoging van de afvoer te Wezel tengevolge tot $13100 \text{ m}^3/\text{s}$ (tegen $12000 \text{ m}^3/\text{s}$ in 1925/26).
- 3e) Een combinatie van de gevallen genoemd onder ten eerste en ten tweede. Resultaat: een afvoer te Wezel van $14700 \text{ m}^3/\text{s}$.

Aan de hand van de Q-h-kromme van Wezel kan berekend worden wat de optredende waterstanden zullen zijn. Te verwachten zijn dan de volgende standen:

$13600 \text{ m}^3/\text{s} - 1260 \text{ cm}$

$13100 \text{ m}^3/\text{s} - 1230 \text{ cm}$

$14700 \text{ m}^3/\text{s} - 1310 \text{ cm}$

Wiener (Hess, 1959) berekende, dat een afvoer van $14700 \text{ m}^3/\text{s}$ een gemiddelde kans van optreden heeft, die groter is dan $1/500^{\text{per}}$ jaar (zie tabel op pagina 50). Bij de berekening is gebruik gemaakt van de waarschijnlijkheidsrekening, echter is niet duidelijk hoe dit is geschied.

Op bijlage 29 staat een tabel, ontleend aan Hess (1959), welke deze conclusies bevestigt en eveneens is berekend met de waarschijnlijkheidsrekening. Voor de afvoeren van 13600 en $13100 \text{ m}^3/\text{s}$ gelden respectievelijk waarden van ongeveer 300 en 180 jaar.

Hoe groot de mate van betrouwbaarheid is bij dit soort berekeningen, valt niet te zeggen. Gewerkt wordt met afvoeren welke in het verleden niet zijn gemeten, doch geschat of berekend. Ten aanzien van de herhalingstijd kan worden opgemerkt dat het bepalen hiervan met behulp van waterstanden risico's in zich draagt in verband met eventuele bodemdalingen en peilschaalverplaatsingen.

3.3.5 Bepaling maatgevende afvoer door sommatie van extreme afvoeren van de Rijn en haar zijrivieren

In tegenstelling tot de vorige methode wordt hier niet uitgegaan van één bepaald hoogwater, maar worden combinaties gemaakt van de hoogste bekende afvoeren op de Rijn en de zijrivieren. Verschillende alternatieven staan ter beschikking, welke alle zullen worden uitgewerkt. Een belangrijk punt is, waar te beginnen op de Rijn, ter plaatse van Basel of ter plaatse van Bingen. In paragraaf 3.1.1 is vermeld dat juist bovenstrooms van Bingen de Rijn het karakter van een benedenloop heeft, dat wil zeggen een breed rivierbed met een groot bergend vermogen. Dit feit zou aanleiding kunnen zijn te starten met de sommatie te Bingen. Hiertegen kan worden aangevoerd dat daarmee de invloed van hoge Main- en Neckarafvoeren op de Rijn golf verloren gaat. Volgens bijlage 13 echter is de invloed van topafvoeren bovenstrooms van Bingen op de afvoer benedenstrooms gering. Zowel te Maxau als te Bingen zal echter worden begonnen. De gegevens ten behoeve van de sommatie staan vermeld op bijlage 30.

In totaal zijn er vijf mogelijkheden (bijlage 31), welke hieronder staan aangegeven:

- 1e) Beginnend te Maxau met een overschrijdingsfrequentie van 10^{-3} per jaar (verdelingsfunctie niet bekend) en een Neckarafvoer van $4800 \text{ m}^3/\text{s}$
- 2e) Beginnend te Maxau met een overschrijdingsfrequentie van 10^{-3} per jaar en een Neckarafvoer van $2800 \text{ m}^3/\text{s}$
- 3e) Beginnend te Maxau met een hoogste bekende afvoer van $4300 \text{ m}^3/\text{s}$ en een Neckarafvoer van $4800 \text{ m}^3/\text{s}$
- 4e) Beginnend te Maxau met een hoogste bekende afvoer van $4300 \text{ m}^3/\text{s}$ en een Neckarafvoer van $2800 \text{ m}^3/\text{s}$
- 5e) Beginnend te Bingen met een hoogste bekende afvoer van $6800 \text{ m}^3/\text{s}$.

Het onderscheid tussen een Neckarafvoer van $2800 \text{ m}^3/\text{s}$ en $4800 \text{ m}^3/\text{s}$ berust op de verschillende schattingen die in de literatuur worden vermeld voor de Neckarafvoer in november 1824. Zoals te verwachten, levert combinatie 1 de hoogste afvoer te Wezel op met $26150 \text{ m}^3/\text{s}$. Gaan we uit

van de hoogste bekende afvoer te Maxau (combinatie 3) dan ontstaat een afvoer van $21950 \text{ m}^3/\text{s}$. Indien we de Neckarafvoer verminderen tot $2800 \text{ m}^3/\text{s}$ dan worden deze cijfers respectievelijk $24150 \text{ m}^3/\text{s}$ (combinatie 2) en $19950 \text{ m}^3/\text{s}$ (combinatie 4). Combinatie 5 levert een afvoer te Wezel op van $15170 \text{ m}^3/\text{s}$.

Gezien de opmerkingen in het begin van deze paragraaf gemaakt -- dat de invloed van topafvoeren bovenstrooms van Bingen van weinig belang meer is voor de topafvoeren benedenstrooms -- lijkt het redelijk te veronderstellen dat de afvoer dicht bij de $15170 \text{ m}^3/\text{s}$ zal liggen dan bij de $26150 \text{ m}^3/\text{s}$. Uiteraard is omtrent de overschrijdingsfrequentie niets te zeggen, omdat elke afvoer welke door sommatie wordt toegevoegd aan de totale afvoer een eigen overschrijdingsfrequentie bezit. Zo deze al bekend zou zijn, dan is sommatie hiervan statistisch niet toegestaan.

Wel valt iets te zeggen omtrent de meteorologische mogelijkheid van optreden. Een voorwaarde voor dergelijke grote afvoeren is namelijk, dat de weersomstandigheden daarvoor gunstig zijn, dat wil zeggen zware neerslag en dooi op het gehele stroomgebied van de Rijn, zodanig dat de afvoertoppen van hoogwatergolven op alle zijrivieren en van de hoogwatergolf op de Rijn samenvallen (zie ook paragraaf 3.2.4). De kans dat dergelijke omstandigheden optreden moet vrijwel uitgesloten worden geacht (Hess, 1959).

3.3.6 Bepaling maatgevende afvoer door splitsing van een topafvoer in een beginafvoer en een verhoging

Hillen (1975) heeft een methode toegepast, waarbij alle topafvoeren in een winterhalfjaar (1 oktober tot 1 april) worden gesplitst in een beginafvoer en een verhoging. Reden voor de splitsing is het verminderen van de onderlinge afhankelijkheid van de topafvoeren. Met behulp van de kansdichtheidsfuncties van beginafvoer en verhoging is een vergelijking bepaald voor de frequentielijn voor de totale afvoer.

Hillen komt dan tot een afvoer van $18500 \text{ m}^3/5$ te Lobith met een overschrijdingsfrequentie van $3 \cdot 10^{-4}$ per jaar.

Een punt van kritiek is de keuze van de afvoeren welke voor splitsing in aanmerking komen. Hillen gebruikt namelijk die afvoeren, waaruit een verhoging is af te leiden groter dan $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, hetgeen arbitrair is. Verder stelt hij dat een verhoging afhankelijk is van een bui, die zelf onafhankelijk is van een voorgaande bui, welke een bepaalde basisafvoer heeft veroorzaakt. Dit is juist, maar basisafvoer en verhoging zijn daardoor nog niet onafhankelijk, alhoewel Hillen dit aantoonst met behulp van een tweetal statistische toetsen. Het tijdsverloop tussen een bui en de afstroming daarvan veroorzaken een afhankelijkheid tussen een beginafvoer tengevolge van enige voorgaande buien en de verhoging tengevolge van de laatste bui. De analyse van hoogwaters in hoofdstuk 3.2 bevestigt dit verband. Zie hiervoor de beschrijving in paragraaf 3.2.2 van de hoogwaters van december 1882 / januari 1883, december 1919 / januari 1920, december 1925 / januari 1926, januari 1955 en februari 1958.

Opmerkelijk is, dat de uitkomst van zijn berekeningen goed aansluit bij andere methoden ter bepaling van de maatgevende afvoer.

3.3.7 Bepaling maatgevende afvoer door extrapolatie van een frequentiekromme van opgetreden hoogwaters

In paragraaf 3.3.2 zijn een aantal opmerkingen gemaakt ten aanzien van het gebruik van frequentiekrommen.

Veel onderzoekers hebben de extreme waarden voor de Rijn bepaald. De volgende onderzoekers en instanties, met de door hen genoemde extreme afvoeren, zullen worden besproken: 1e) Minister van Verkeer en Waterstaat

2e) Hess

3e) Hillen

4e) directie Waterhuishouding en Waterbeweging RWS

5e) Duitse instanties

ad 1: Minister van Verkeer en Waterstaat

De Rijkswaterstaat heeft in 1956 onderzoek verricht naar extreem hoge rivierafvoeren en de kans op voorkomen daarvan. De uitkomsten zijn:

afvoer (m ³ /s)	frequentie (jaar)
18000	$3 \cdot 10^{-4}$
17200	$5 \cdot 10^{-4}$
16200	10^{-3}
14600	$2 \cdot 10^{-3}$

Het onderzoek heeft zich gericht op de periode 1911-1960. Alle hoogwaters welke 15 dagen voor of na de topstand niet worden overschreden zijn geselecteerd. Toepassing van de exponentiële verdeling leidde tot bovenstaand resultaat. De aanleiding tot het onderzoek vormde het feit dat voor de Nederlandse kust normen waren opgesteld voor de veiligheid van de inwoners na de stormramp van februari 1953. De Minister van Verkeer en Waterstaat heeft in een brief (nr 63231, afd.A) van 2 oktober 1956 aan Gedeputeerde Staten van Gelderland de afvoer van 18000 m³/s tot norm verheven. Kritiek kan worden uitgeoefend op de wijze waarop de gehele procedure tot aanwijzing van een norm is geschied. De opstellers van de nota van Rijkswaterstaat hebben erop gewezen, dat de cijfers nog geenszins vaststonden en dat is afgezien van een statistische interpretatie. Ten einde toch een indruk te geven, is de frequentie van $3 \cdot 10^{-4}$ per jaar genoemd. De Minister heeft echter geen uitspraak gedaan over de mate van veiligheid die wenselijk is, maar een afvoer vastgesteld.

ad 2: Hess

Hess (1959) haalt berekeningen aan van D.Wiener. Enerzijds zijn deze gebaseerd op waterstanden, anderzijds op afvoeren. De extrapolatie van waterstandgegevens is niet zonder risico, zoals reeds eerder vermeld. Wiener gaat uit van de waterstand in 1925/26 en verhoogt deze met 1.00 m naar aanleiding van een plan tot dijkverhoging en inpoldering. In verband met waking worden de hoogten vermindert met 0.40 m en voor de dan optredende waterstanden

heeft hij de frequentie berekend ter plaatse van verschillende peilschalen met behulp van de waarschijnlijkheidsrekening.

	hoogwater 1925/26 (cm)	hoogwater 1925/26 + 0.60 m (cm)	frequentie (jaar)
Keulen	969	1029	10^{-2}
Düsseldorf	1110	1170	$5 \cdot 10^{-3}$
Ruhrort	1300	1360	$5 \cdot 10^{-3}$
Wesel	1231	1291	$2 \cdot 10^{-3}$
Rees	997	1057	10^{-3}
Emmerich	983	1043	10^{-3}

Met behulp van de Q-h-relatie is de afvoer te bepalen. Op pagina 45 wordt de Q-h-relatie voor Wesel genoemd. Hieruit is af te leiden dat een waterstand van 12.91 m te Wesel een afvoer geeft van ongeveer $14300 \text{ m}^3/\text{s}$ met een frequentie van $2 \cdot 10^{-3}$ per jaar. Opvallend in bovenstaande tabel is de toenemende waarde van de herhalingsstijd, gezien in stroomafwaartse richting, ondanks de toenemende afvoer tussen Keulen en Emmerich.

Een tweede extrapolatieberekening heeft Wiener uitgevoerd met de afvoeren. De resultaten staan vermeld op bijlage 29. Vergelijking met de afvoeren van 1925/26 geeft hier het beeld, dat de frequenties van dit hoogwater ongeveer $1/100$ per jaar bedragen. Zij nemen niet toe in stroomafwaartse richting. Hieruit blijkt het gevaar van extrapolatie met waterstanden. De waarden te Wesel bij een frequentie van $2 \cdot 10^{-3}$ per jaar, zijnde $14300 \text{ m}^3/\text{s}$ volgens extrapolatie met waterstanden van $14400 \text{ m}^3/\text{s}$ volgens extrapolatie met afvoeren, stemmen goed overeen.

ad 3: Hillen

Het onderzoek van Hillen (1975) bestrijkt de periode van 1901-1972. Het al dan niet inlopen van bergingsgebieden tijdens hoogwaters is in zijn onderzoek betrokken en aanleiding geweest de betreffende hoogwaters te corrigeren. Door vergelijking van de frequentiekrommen van Keulen en Lobith, teneinde de zijdelingse toevoer te bepalen, en door de invloed van het afsluiten van polders en het ver-

hogen van de bandijken te bepalen op de rivierafvoer, is hij in staat geweest een fictieve frequentielijn te construeren. Kenmerkend voor deze lijn is de afwezigheid van verticale accumulatie in het rivierbed. Op deze wijze komt hij tot een mogelijke afvoer van $19000 \text{ m}^3/\text{s}$ met een overschrijdingsfrequentie van $3 \cdot 10^{-4}$ per jaar volgens de methode Gumbel. Hierbij is dus verondersteld dat een hoogwaterbestrijdingsplan in de Duitse laagvlakte wordt uitgevoerd. Bij een zelfde frequentie, maar gebruikmakend van de methode log-Pearson III, geeft Hillen een waarde van $16700 \text{ m}^3/\text{s}$. Beide genoemde getallen zijn gebaseerd op berekeningen met de jaarmaxima. Worden alle toppen gebruikt dan geeft dit met de methode log-Pearson III een afvoer van $13200 \text{ m}^3/\text{s}$.

Hillen noemt zelf reeds enige punten van kritiek, zoals de inhomogeniteit in het waarnemingsmateriaal en de instabiliteit van de scheefheidscoëfficiënt, waardoor de methode Pearson onbetrouwbaar is. Het gebruik van de Kolmogorov-toets ten behoeve van het toetsen of het waarnemingsmateriaal a-select uit een populatie afkomstig is, wordt gebruikt ondanks duidelijk vermelde bezwaren als het slechts geldig zijn voor continu verdeelde grootheden.

De constructie van de fictieve frequentielijn met behulp van schattingen voor de zijdelingse toevoer geschiedt via een groep afvoeren, waarbij geen berging optreedt. Kleine afvoeren, niet behorend tot de groep waarmee de fictieve frequentielijn is geconstrueerd, kunnen daarentegen het gevolg zijn van zijdelingse toevoer. Ten aanzien van de top van de fictieve frequentielijn stelt Hillen, dat de grootste bekende afvoeren van 1925/26 en 1919/20 hierbij goed aansluiten, indien de afvoeren een weinig vergroot worden. Voor 1919/20 berust deze vergroting van de afvoer op een schatting van $500 \text{ m}^3/\text{s}$ door een Oberdeichinspektor en voor 1925/26 is deze vergroting in het geheel niet bekend tengevolge van overstromingen.

Een laatste punt van kritiek betreft de Q-h-relatie van Keulen. Deze is bepaald aan de hand van afvoergegevens uit de jaren 1937, 1938 en 1939 en is geldig verklaard voor de periode 1917-1950. De relatie waterstand - afvoer wordt hierdoor niet betrouwbaarder en bijgevolg ook niet de fictieve frequentielijn.

ad 4: Direktie Waterhuishouding en Waterbeweging

Op grond van kritiek gebaseerd op de norm zoals die tot nu door Rijkswaterstaat wordt gehanteerd, vastgesteld door de Minister van Verkeer en Waterstaat (ad 1), heeft de Minister van Verkeer en Waterstaat een Commissie Rivierdijken geïnstalleerd. De opdracht aan de commissie is te onderzoeken of er aanleiding bestaat de tot nu gehanteerde norm te herzien.

De commissie heeft de Direktie Waterhuishouding en Waterbeweging van de Rijkswaterstaat gevraagd om een nader onderzoek, waarvan de in deze paragraaf gegeven uitkomsten een uitvloeisel zijn.

In een eerste onderzoek (Van Urk, 1976 a) zijn de volgende reeksen beschouwd: 1911-1960, 1901-1975 en 1776-1975. De reeks 1911-1960 is gebruikt om de langere reeks van 1901-1975 mee te kunnen vergelijken en is berekend met alle afvoertoppen. De laatste twee reeksen bestaan uit de jaarmaxima van topafvoeren, terwijl voor de reeks 1776-1975 correcties op de afvoeren zijn aangebracht in verband met een discontinuïteit.

Een zevental verdelingen is in aanmerking gekomen bij het onderzoek. Toetsen zijn uitgevoerd om de aanpassing van de frequentieverdeling aan het waarnemingsmateriaal te controleren. Het resultaat is dat de Pearson III en de log-Pearson III verdeling het beste zijn (bijlage 32). Gebruikmaking van de reeks 1901-1975 wordt aanbevolen: vanwege de grotere lengte dan de reeks 1911-1960 en omdat in de reeks 1776-1975 een mogelijke trend aanwezig is.

De betreffende reeksen zijn ook bekeken, indien de hoogste afvoer, die van 1925/26, of de afvoeren kleiner dan $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ (hieronder slechts afvoer in het zomerbed) zijn weggelaten. Beide veranderingen geven voor alle verdelingen een betere aanpassing. Alle reeksen en wijzigingen daarop beschouwend (bijlage 32 en 33), geeft de reeks 1776-1975 thans de beste aanpassing, waarbij de beide Gumbelverdelingen en de log-Pearson III verdeling elkaar nauwelijks ontlopen. Een combinatie van deze afvoeren geeft een afvoer van $14750 \text{ m}^3/\text{s}$ bij een frequentie van $3 \cdot 10^{-4}$ per jaar. Alleen de reeks 1901-1975 in ogenschouw nemend, met weglating van de laagste afvoertoppen, levert voor de Pearson III, log-Pearson III en Gumbel-(momentenmethode) verdeling de beste aanpassing. Combinatie geeft een afvoer van $17100 \text{ m}^3/\text{s}$. Onderstaande tabel geeft voor de reeks 1901-1975 (afvoeren groter dan $4000 \text{ m}^3/\text{s}$) enige resultaten voor de verschillende verdelingen (Van Urk, 1976 a).

frequentie	herh. tijd	Pearson III	log-Pearson III	Gumbel (MM)
$3 \cdot 10^{-4}$	3333	16250	18600	16500
$4 \cdot 10^{-4}$	2500	15900	18100	16150
$5 \cdot 10^{-4}$	2000	15700	17650	15850
10^{-3}	1000	14850	16300	14950

Bijlage 33 geeft een overzicht van alle afvoeren die optreden bij een frequentie van $3 \cdot 10^{-4}$ per jaar volgens een bepaalde verdeling.

In een tweede onderzoek van Van Urk (1976 b) worden nieuwe toetsingen uitgevoerd. De reeks 1776-1975 vertoont nu inhomogeniteit. De reeksen zijn ook onderzocht op gevoeligheid ten aanzien van wijzigingen in de grootste afvoeren. Beide Pearson III verdelingen blijken zeer gevoelig, hetgeen logisch is, want de verdeling is opgebouwd met de scheefheidscoëfficiënt als parameter. De Gumbel- en de exponentiële verdeling zijn minder gevoelig dus betrouwbaarder. Van Urk heeft ook reeksen met alle afvoertoppen onderzocht over de periode 1901-1975. Persistentie en een cyclisch

verloop zijn niet onmogelijk in dat geval. Weglaten van de lage afvoertoppen geeft bij deze reeksen betere resultaten.

Een advies gevraagd aan het Mathematisch Centrum, ten aanzien van de exponentiële verdeling, luidt dat deze verdeling de beste aanpassing geeft, mits alle afvoertoppen groter dan $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ worden meegenomen. Hieraan kan worden toegevoegd dat dan ook Gumbel voldoet, daar geldt dat als een grootte voldoet aan de exponentiële verdeling, haar maxima over een lange periode voldoen aan de Gumbel-verdeling. Uitgaande van dit advies concludeert Van Urk (1976 b) tot de volgende aan te houden extremen:

<u>frequentie</u>	<u>afvoer</u>
$3 \cdot 10^{-4}$	$18000 \text{ m}^3/\text{s}$
$4 \cdot 10^{-4}$	17500
$5 \cdot 10^{-4}$	17200
$8 \cdot 10^{-4}$	16500
10^{-3}	16150
$5 \cdot 10^{-3}$	13650

Volgens deze frequentiekromme heeft de afvoer van $13000 \text{ m}^3/\text{s}$ in 1925/26 een herhalingstijd van 132 jaar.

Beide onderzoeken dient men niet onafhankelijk van elkaar te zien. Het tweede is een vervolg op het eerste onderzoek. Een aantal opmerkingen zal worden gemaakt ten aanzien van de toetsingen.

Het waarnemingsmateriaal is bij het eerste onderzoek niet onderzocht op homogeniteit, trend of toevalligheid. Een onderzoek van prof. E. Mosonyi, verricht op het waarnemingsmateriaal van de peilschaal Rees over de periode 1901-1970 is ook voor Mobbith geldig verklaard ten aanzien van de reeks 1901-1975. Voornoemd onderzoek leidde tot de conclusie dat een lichte inhomogeniteit mogelijk aanwezig was. In het tweede onderzoek is de waarnemingsreeks wel getoetst. De resultaten spreken elkaar nu tegen. Enerzijds is er wel sprake van een trend en anderzijds niet. Het weglaten van lage afvoeren (reeks met jaarmaxima) geeft bij de ene toets wel en bij de andere geen aanleiding tot

het veronderstellen van een cyclisch verloop, persistentie of discontinuïteiten. Bij het eerste onderzoek bestond er geen aanleiding deze verschijnselen te veronderstellen. Worden alle topafvoeren meegenomen, maar exclusief de lage, dan is een cyclisch verloop of persistentie niet uitgesloten. In beide gevallen betreft het de periode 1901-1975, dus de periode waaruit de aanbevolen extremen (pagina 53) worden afgeleid. Van Urk vermeldt zelf reeds dat onder statistici geen eenstemmigheid bestaat over het toelaatbaar zijn van het toepassen van toetsen op deelreeksen. Aangezien tevens geen waarde rangschikking van toetsen bestaat, mag de conclusie worden getrokken dat de aanwijzingen voor trend, persistentie, cyclisch verloop gering zijn, ondanks de elkaar tegensprekende uitkomsten. Op de wijze waarop de beste aanpassing tot stand is gekomen, kan het volgende worden opgemerkt. Vier toetsen zijn toegepast, waarvan er drie niet voldoen om uiteenlopende redenen. De chi-kwadraattoets vereist een klasse-indeling, hetgeen een subjectieve zaak is. Voorts zijn de resultaten niet vergelijkbaar, want de verdelingen kunnen een ongelijk aantal vrijheidsgraden. De toets van Smirnov-Komolgorov geeft geen informatie, want alle verdelingen voldoen. De toets van Benson geeft een betere aanpassing van de ongecorrigeerde reeks 1776-1976 dan de gecorrigeerde, waardoor getwijfeld moet worden aan de waarde van de toets. De aannemelijkheidstoets is de enige die overblijft, maar hier is het bezwaar aan te voeren dat een nieuwe grootheid wordt ingevoerd, waarvan niet zeker is of dit juist is (Van Urk, 1976 a). Het aanwijzen van de Pearson-verdelingen als beste berust in feite dus slechts op één toets, waarbij voorzichtigheid geboden is in verband met de nieuw ingevoerde grootheid.

Concluderend moet worden gesteld dat zeer veel toetsingen zijn uitgevoerd op het waarnemingsmateriaal, terwijl als eindconclusie een verdeling wordt genomen, welke dezelfde is als vermeld onder ad 1, zijnde de norm van de Minister van Verkeer en Waterstaat, namelijk de exponentiële, echter beter gefundeerd. In dat geval werden de lage afvoeren meegenomen en bij dit onderzoek niet, terwijl statistici

het er niet over eens zijn of de toetsen geldig zijn voor deelreeksen.

Ondanks de onzekerheden welke aan de toetsingen verbonden zijn, moet worden vastgesteld dat de onderzoeken van Van Urk waardevol zijn.

ad 5: Duitse instanties

De Bundesanstalt für Wasserbau te Düsseldorf (1973) heeft een afvoer maatgevend gesteld van $15000 \text{ m}^3/\text{s}$. De bijbehorende herhalingsstijd is berekend op 1000 jaar. De afvoer van $15000 \text{ m}^3/\text{s}$ is tot stand gekomen door de hoogste bekende afvoer van $12300 \text{ m}^3/\text{s}$ in 1925/26 te verhogen met 20%.

Een verhoging van 30% leidt tot een afvoer van $16000 \text{ m}^3/\text{s}$ met een frequentie van $3 \cdot 10^{-4}$ per jaar. De afvoer te Lobith zal ongeveer $800 \text{ m}^3/\text{s}$ groter zijn tengevolge van zijdelingse toevoer.

De wijze van onderzoek is niet bekend. Op grond van de ter beschikking staande gegevens blijkt een verhoging met een bepaald percentage tamelijk willekeurig.

3.4 Fysisch mogelijke afvoer

De fysisch mogelijke afvoer bedraagt maximaal $40000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Van Urk, april 1976). Hillen (1975) heeft voor diverse gevallen berekend wat technisch mogelijk is. Zijn onderzoek gaat uit van de veronderstelling dat een hoogwaterbestrijdingsplan in Duitsland wordt uitgevoerd. Hess (1959) vermeldt hiervan onderdelen als bandijkverhoging en afsluiting van zomerpolders. Een bandijkverhoging tot 1.00 m boven de waterstand van 1925/26 leidt tot een vergroting van de afvoercapaciteit met $4000 \text{ m}^3/\text{s}$. Tengevolge van een maximale bodemdaling te Rees van 1.10 m kan de afvoer nog eens verhoogd worden met $900 \text{ m}^3/\text{s}$. Resultaat is een maximale afvoer van ongeveer $17000 \text{ m}^3/\text{s}$ met een herhalingsstijd van 700 à 800 jaar (Hillen, 1975).

D.Wiener (Hess, 1959) komt tot een afvoer van $14300 \text{ m}^3/\text{s}$ met een herhalingsstijd van 500 jaar (zie ook paragraaf 3.3.7). Bij deze laatste berekening is evenwel geëxtra-

poleerd met behulp van de waterstanden te Wesel en is de bodemdaling niet in de berekening betrokken. Ook is de dijkhoogte die effectief is gesteld op de waterstand van 1925/26, vermeerderd met 0.60 m.

Worden de bandijken niet verhoogd, maar blijven deze op het oude niveau -- dat wil zeggen 0.20 m boven de waterstanden van 1925/26 -- dan geeft dit een afvoervergroting met $900 \text{ m}^3/\text{s}$ ten opzichte van de afvoer van 1925/26. Tezamen met de bodemdaling geeft dit een maximale afvoer van ongeveer $14000 \text{ m}^3/\text{s}$ met een herhalingsstijd van 170 jaar (Hillen, 1975).

De Bundesanstalt für Wasserbau te Düsseldorf (1973) heeft berekend dat geen overstromingen zullen optreden bij een afvoer van $15000 \text{ m}^3/\text{s}$, indien de bandijken op de huidige hoogte -- dat wil zeggen 1.00 m boven de waterstand van 1925/26 -- gehandhaafd worden; de wijze van berekenen is echter niet bekend.

De plannen van de Duitse instanties zijn niet exact bekend. De polder te Grieth en Griethausen is afgesloten, wat een afvoerverhoging met $400 \text{ m}^3/\text{s}$ tot gevolg heeft (Van Urk, 1976 a). Volgens een nota van het Wasserschaftsamt Düsseldorf (1976) behoeft niet op uitvoering van een hoogwaterbestrijdingsplan te worden gerekend. Gesteld wordt dat diverse bandijkverhogingen gedurende de laatste 20 jaar zijn uitgevoerd, tot 1.00 m boven de waterstand van 1925/26, zodat het op economische gronden niet wenselijk wordt geacht nieuwe verhogingen uit te voeren.

Concluderend kan worden vastgesteld, dat uitvoering van het hoogwaterbestrijdingsplan, bestaande uit bandijkverhoging tot 1.00 m boven de waterstand van 1925/26, voorlopig het uiterste zal zijn waartoe de Duitse instanties zullen gaan. De Duitse overheden verbinden hier zelf een afvoer van $15000 \text{ m}^3/\text{s}$ aan (paragraaf 3.3.7 ad 5; Becht, 1977).

Wiener komt tot $14300 \text{ m}^3/\text{s}$, maar brengt een waking van 0.40 m in rekening en houdt geen rekening met de inpoldering te Grieth en Griethausen noch met een opgetreden bodemdaling. Worden deze wel in rekening gebracht, dan bedraagt de afvoer $15600 \text{ m}^3/\text{s}$.

Hillen houdt geen rekening met de waking en komt zodoende op $17000 \text{ m}^3/\text{s}$ inclusief de bodemdaling. Dit houdt dus in dat bij $17000 \text{ m}^3/\text{s}$ de dijken overstromen.

3.5 Aanbevelingen Commissie Rivierdijken

Zoals reeds vermeld in paragraaf 3.3.7 ad 4, is door de Minister van Verkeer en Waterstaat een Commissie Rivierdijken ingesteld. In een rapport (Becht, 1977) doet deze commissie aanbevelingen voor een aan te houden maatgevende afvoer op grond van een gedegen onderzoek. Factoren welke hierbij o.a. in de afweging zijn betrokken betreffen de cultuurhistorische, landschappelijke en natuurwetenschappelijke waarden, de veiligheid, de werkgelegenheid, het kostenaspect en de sociaal-economische schade. Het resultaat is een voorgestelde maatgevende afvoer van $16500 \text{ m}^3/\text{s}$ met een herhalingstijd van 1250 jaar.

De commissie heeft voor zijn aanbeveling een keuze gedaan uit een aantal varianten welke onderling verschilden enerzijds door een grote, respectievelijk kleine herhalings-tijd en anderzijds door een gewijzigde afvoerverdeling. Voor de gedetailleerde afweging wordt verwezen naar het rapport.

Ten aanzien van de bepaling van de maatgevende afvoer zoals in deze studie ondernomen, voegt de aanbeveling van de commissie geen nieuwe informatie toe, daar haar afvoeren en bijbehorende frequenties gebaseerd zijn op de resultaten van het onderzoek dat door de Directie Waterhuishouding en Waterbeweging (Van Urk, 1976 b) is uitgevoerd. Hieraan kan worden toegevoegd dat de aanbeveling niet slechts een op zuiver technische gronden gebaseerde maatgevende afvoer aangeeft, maar op een bredere basis is gefundeerd.

4. SAMENVATTING EN AANBEVELINGEN

In het voorgaande is een beschrijving gegeven van het stroomgebied van de Rijn, het klimaat, de afvoer en in het verleden waargenomen hoge afvoeren. Daarnaast zijn de maatgevende afvoeren behandeld zoals deze zijn bepaald door diverse onderzoekers en instanties.

Vastgesteld kan worden dat de oorzaken van hoogwaters gelegen zijn in bijzondere weersomstandigheden, waarbij zware neerslag en dooi gecombineerd optreden. De weersgesteldheid in de voorafgaande maand is hierbij van grote invloed (paragraaf 3.2.2).

Hoge afvoeren in Nederland zijn vrijwel alle het gevolg van hoge Moezelafvoeren (paragraaf 3.2.3).

Aanwijzingen welke kunnen leiden tot het verwachten van een toename van de waterstanden bij gelijke afvoer zijn niet geconstateerd (paragraaf 3.2.3). Desondanks moet worden vastgesteld dat extreme afvoeren geenszins uitgesloten zijn.

Het verdient aanbeveling verder onderzoek te verrichten naar de mogelijkheid voorspellingen te doen ten aanzien van te verwachten afvoeren aan de hand van de meteorologische omstandigheden. Daarnaast lijkt het nuttig na te gaan wat de invloed is van ingrepen in het stroomgebied en van rivierwerken op het voorkomen en het gedrag van hoogwaters.

Ten aanzien van de voor plannen voor dijkverbetering aan te houden maatgevende afvoer, geeft bijlage 34 een overzicht van de resultaten van diverse onderzoekers en instanties. De maatgevende afvoeren lopen uiteen van $13100 \text{ m}^3/\text{s}$ (extrapolatie historisch hoogwater) tot $26150 \text{ m}^3/\text{s}$ (sommatie afvoer Rijn en zijrivieren). Onderlinge vergelijking van de diverse waarden zal moeten leiden tot aanwijzing van een aan te houden maatgevende afvoer ten behoeve van het verdere onderzoek.

Hierbij zal rekening moeten worden gehouden met de wijze waarop de onderzoekers tot hun resultaat zijn gekomen. De definitieve bepaling van een maatgevende afvoer zal daarna moeten geschieden in aanmerking genomen de fysisch mogelijke

afvoer volgens de huidige rivierconfiguratie en rekening houdend met plannen voor de toekomst.

Alle extremen beschouwend, moeten we concluderen dat de waarde van de diverse methoden relatief is gezien de vrij grote onderlinge verschillen. We kunnen vaststellen dat alle afvoeren kleiner zijn dan het geschatte fysisch maximum van $40000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Als vergelijkingswaarde is deze afvoer dus niet geschikt, zoals gesuggereerd werd in paragraaf 3.3.3. De historische hoogwaters leveren de kleinste afvoeren, hetgeen logisch is daar slechts een paar mogelijkheden zijn aangegeven. De nadruk bij die aanpak is gelegd op het aantonen dat een grotere afvoer dan die van 1925/26 mogelijk is. Sommatie van Rijn- en zijrivierafvoeren geeft uiteenlopende extremen, afhankelijk van beginpunt en startwaarde. Zoals uit bijlage 13 blijkt is een beginpunt bovenstrooms van Bingen niet zinvol in verband met de geringe invloed van hoge afvoeren bovenstrooms van Bingen op de afvoeren benedenstrooms van Bingen. Bingen als startpunt lijkt daarom het meest redelijk. Een bezwaar is het ontbreken van de herhalingstijd, met andere woorden, er is geen veiligheidscriterium op te stellen. De kansdichtheidsfunctie geeft een extreem dat goed aansluit bij de overige waarden, ondanks de subjectieve elementen die de methode in zich draagt.

De extrapolatiemethoden bezitten alle een wetenschappelijke ondergrond, de mathematische statistiek, in tegenstelling tot de meeste voorgaande methoden. Een nadeel hiervan is dat de subjectieve elementen in de methoden worden onderdrukt door de hoeveelheid wiskundige bewerkingen, zoals reeds in paragraaf 3.3.2 gesteld. De verschillen tussen de uitkomsten zijn te wijten aan de diverse toegepaste verdelingen en waarnemingsreeksen. Overigens liggen de waarden wel dicht bijeen. Het meest uitgebreid is het onderzoek dat door Directie Waterhuishouding en Waterbeweging verricht is, waarbij verschillende extrapolatieverdelingen en waarnemingsreeksen tegen elkaar zijn afgewogen.

Samenvattend, lijkt een extreem hoogwater met een afvoer tussen de 15000 en 20000 m³/s aannemelijk volgens extrapolatie van een historisch hoogwater en volgens sommatie van Rijn- en zijrivierenafvoeren.

Alle overige methoden ter bepaling van de maatgevende afvoer bevestigen dit en geven voor deze afvoeren herhalings-tijden die liggen tussen ongeveer 500 en 3333 jaar.

Fysisch zijn afvoeren tussen 15000 en 18000 m³/s niet alle mogelijk. Bijlage 35 geeft een overzicht van de mogelijke afvoeren. Uitvoering van een hoogwaterbestrijdingsplan (bandijkverhoging tot 1.00 m boven de waterstand van 1925/26 en inpoldering) en rekening houdend met bodemdaling, geeft een mogelijke afvoer van 17000 m³/s, als geen waking in rekening wordt gebracht. Zoals vermeld in hoofdstuk 3.4 blijft deze situatie voorlopig gehandhaafd en lijkt daardoor een afvoer van 17000 m³/s het maximaal mogelijke. In rekening brengen van een waking van 0.40 m geeft de kans op een afvoer van 15600 m³/s (paragraaf 3). De bijbehorende herhalings-tijden liggen voor de afvoer van 17000 m³/s tussen 1000 à 15000 jaar en voor de afvoer van 15600 m³/s tussen 500 à 1000 jaar.

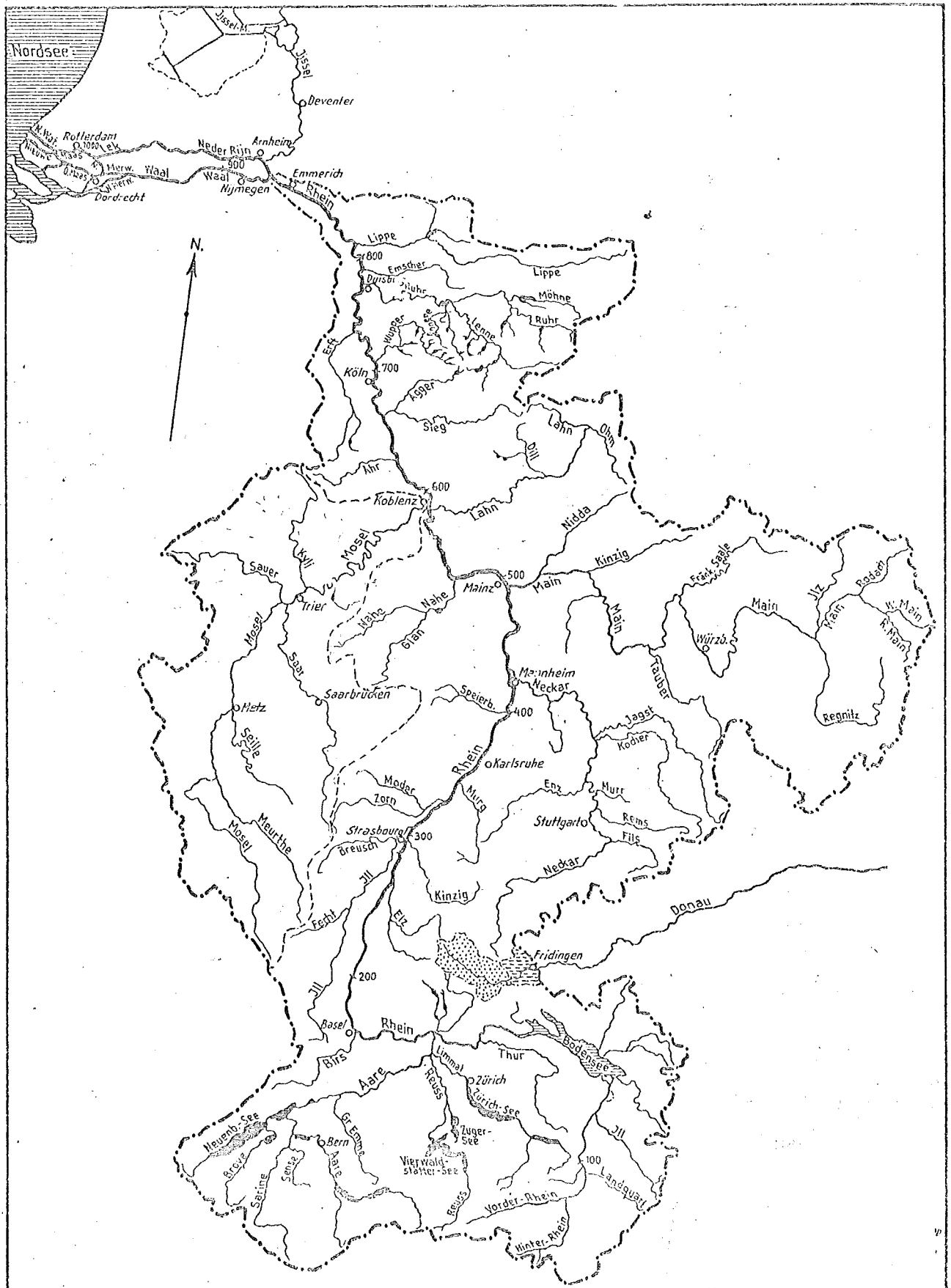
Rekening houdend met het feit dat een afvoer van 17000 m³/s weliswaar het maximum is, maar dat ten eerste een afvoer van 18000 m³/s overeenkomt met de huidige norm van Rijkswaterstaat en dat ten tweede de reductie in waterstanden gering zal zijn ten opzichte van een afvoer van 18000 m³/s, worden daarom op grond van het bovenstaande voor verder onderzoek de volgende extreme afvoeren aanbevolen:

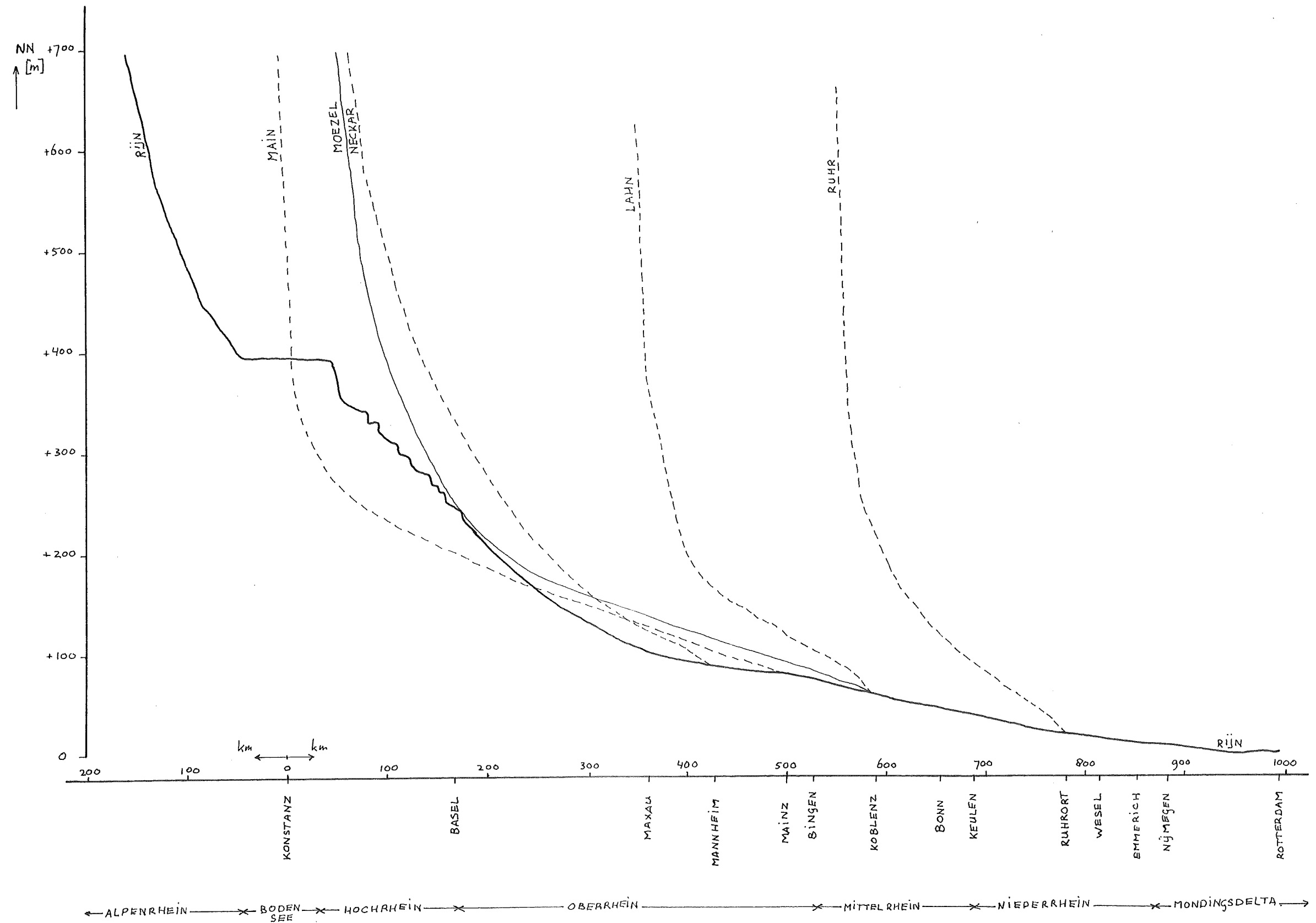
- a) 18000 m³/s bij uitvoering van een hoogwaterbestrijdingsplan zonder rekening te houden met een waking (herhalings-tijd 3333 jaar)
- b) 15600 m³/s indien een hoogwaterbestrijdingsplan wordt uitgevoerd, maar rekening houdend met een waking van 0.40 m (herhalings-tijd 500 à 1000 jaar).

Bij deze aanbeveling moet worden aangetekend dat geen rekening is gehouden met het resultaat van het onderzoek van de Commissie Rivierdijken (hoofdstuk 3.5), n.l. een afvoer van

16500 m³/s met een frequentie van 1/1250 per jaar. Reden hiervoor is dat haar aanbeveling niet de fysisch mogelijke maatgevende afvoer weergeeft, maar hierbij andere factoren een rol laat spelen zoals het kostenaspect en de sociaal-economische schade.

Genoemde waarden van 18000 en 15600 m³/s zullen worden gebruikt als aan te houden maatgevende afvoeren bij een onderzoek naar een herverdeling van topafvoeren, teneinde op die wijze een bijdrage te leveren aan de oplossing van de vraagstukken rond de dijkverzwaring in het Nederlandse rivierengebied.





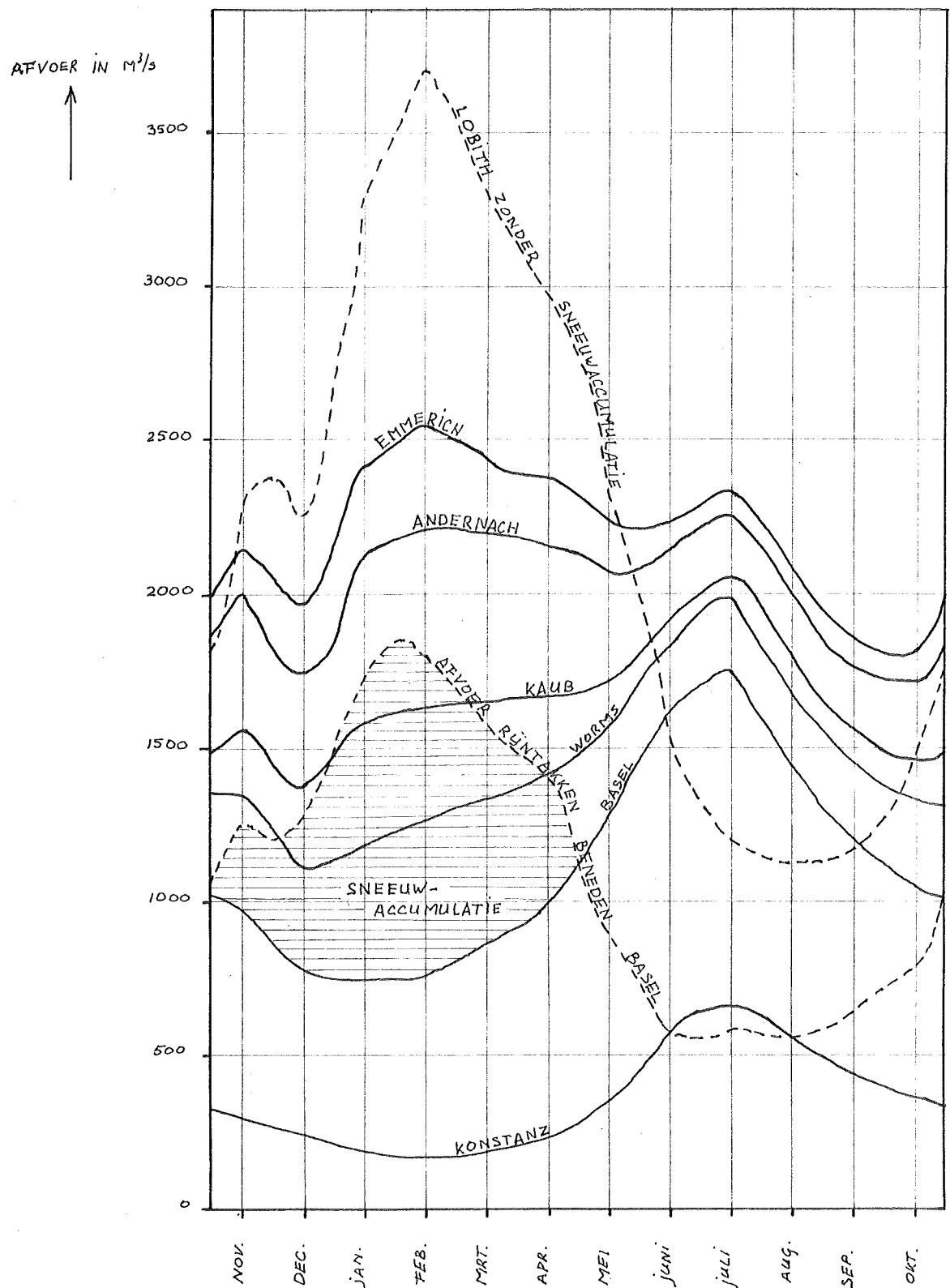
Gegevens zijrivieren.

rivier	opp.stroom- gebied (km ²)	grootst bekende afvoer		verhouding grootste en kleinste afvoer	
		debiet (m ³ /s)	datum	Q _{HHW}	: Q _{NNW}
Neckar	13966	4800	nov 1824	192	: 1
Main	27395	2500	jan 1920	69	: 1
Nahe	4043	1980	jan 1918	510	: 1
Lahn	5946	1150	feb 1909	165	: 1
Moezel	28156	4100	dec 1925	165	: 1
Ruhr	4500	2200	feb 1890 ¹⁸⁹⁰	6666	: 1
Lippe	4891	920	jan 1926	132	: 1

bronnen: Der Rheinstrom, 1889
 Der Rhein, 1951
 Tops, 1961
 Hess, 1959

BIJLAGE 4

GEMIDDELDE AFVOERVERLOOPLIJK OVER DE JAREN 1931/40 (DER RHEIN, 1951) EN INVLOED VAN SNEEUWACCUMULATIE

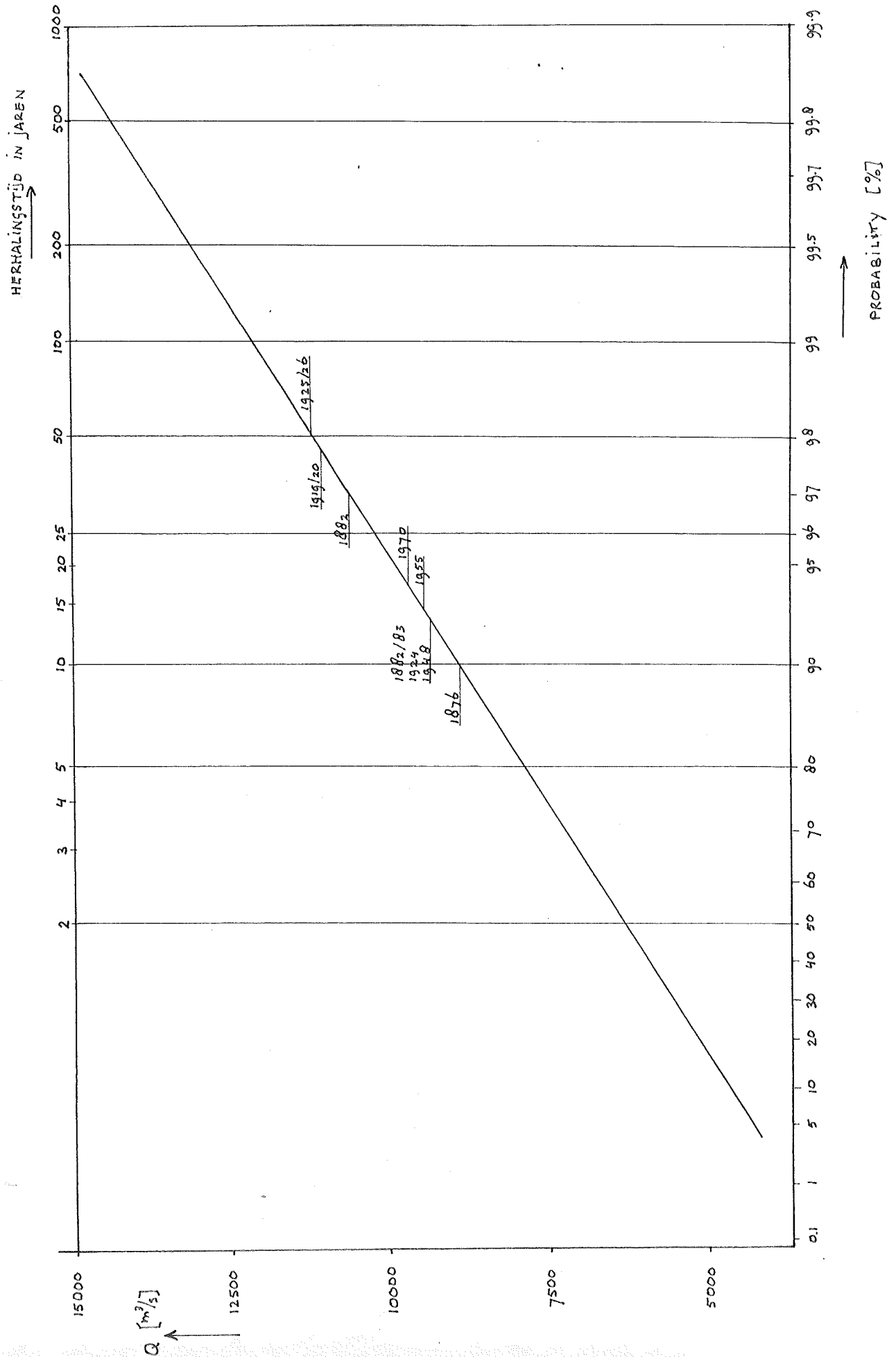


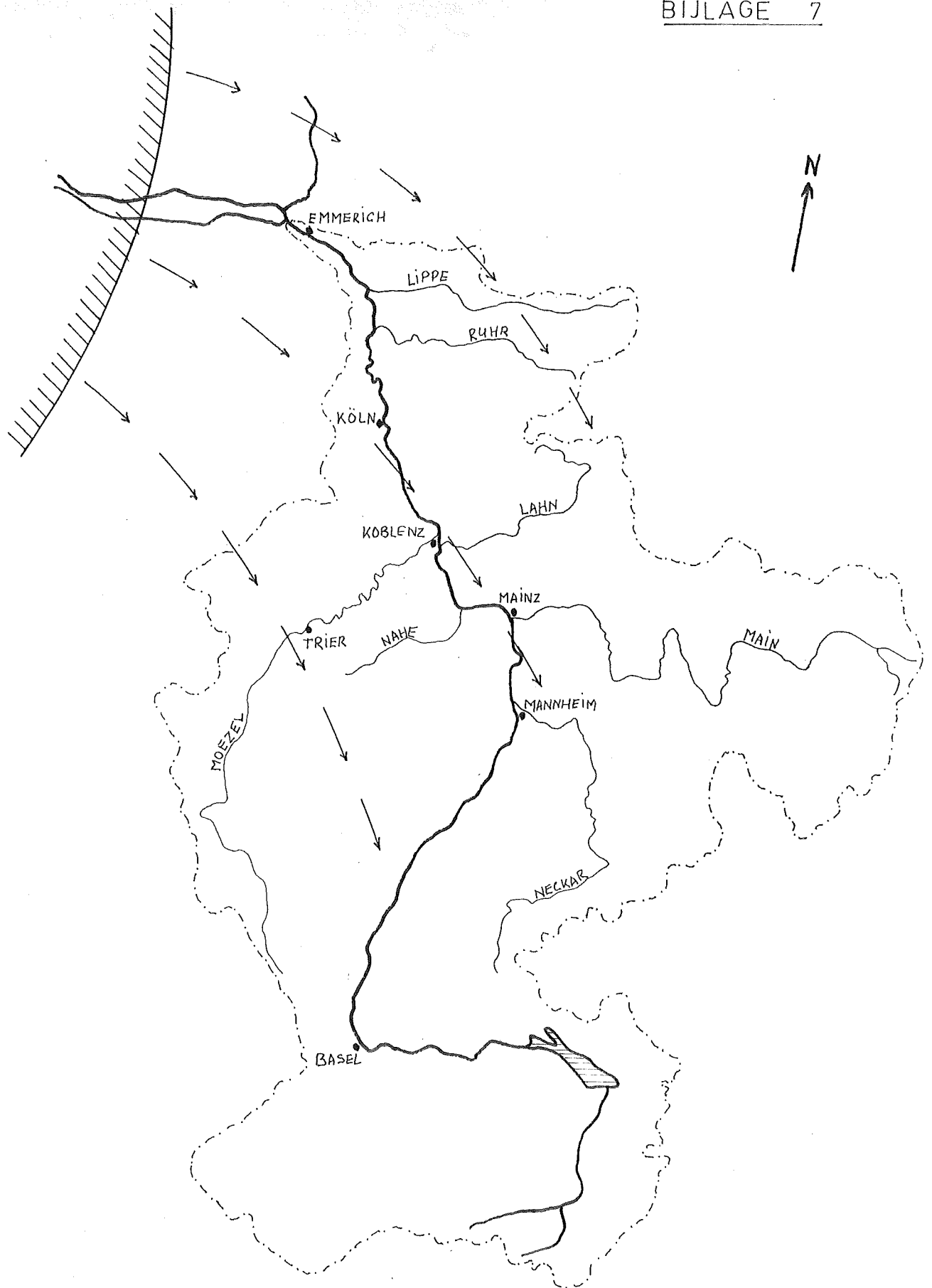
zie voor plaatnamen bijlage 8

Topafvoeren te Keulen (Weinsprach, 1966; jaarboeken)

datum	afvoer in m ³ /s	waterstand in cm
26 dec 1819	8800	863
nov 1824	8550	850
dec 1833/jan 1834	8000	819
29 feb 1844	8650	855
31 mrt 1845	10300	934
28 jan 1846	8280	836
8 feb 1850	10150	928
4 feb 1862	8500	849
14 mrt 1876	9020	876
19 nov 1882	10700	952
dec 1882/jan 1883	9400	894
16 jan 1920	11100	958
5 nov 1924	9420	880
dec 1925/jan 1926	11300	969
25 nov 1930	8300	815
25 feb 1937	7070	728
	(Lobith 7680)	
1 dec 1939	7240	740
	(Lobith 8640)	
28 jan 1941	7800	784
21 mrt 1942	8000	794
27 nov 1944	8120	808
15 feb 1945	8100	802
	(Lobith 8360)	
11 feb 1946	7880	832
2 jan 1948	9460	941
24 dec 1952	7620	762
19 jan 1955	9540	880
6 mrt 1956	7350	744
	(Lobith 7610)	
27 feb 1958	8720	831
25 feb 1970	9740	886

BIJLAGE 6 Frequentiekromme voor Keulen
 volgens Gumbelverdeling
 (bron: HILLEN, 1975)







 = zone met dooi en
 neerslag en de baan
 welke de zone volgt.

Gegevens peilschalen Rijn.

peilschaal	afstand tot Konstanz	1896-1920	1931-1940		1936-1945		1941-1950		1946-1955		1961-1970	
		MHW	MW	MHW	MW	MHW	MW	MHW	MW	MHW	MW	MHW
Basel	167,0	345										
Rheinweiler	186,2		318	579	298	536	436	669	212	648	189	554
Kehl	293,5	474										
Maxau	362,3	668	452	682	446	683	408	636	429	675	471	692
Mannheim	424,9	673	356	633	352	648	289	592	298	623	324	594
Worms	443,4	381	270	528	269	537	218	488	220	522	237	492
Mainz	498,3	356	319	530	321	546	277	513	281	533	312	535
Bingen	528,4	415	223	416	227	435	190	407	193	428	224	429
Bacharach	543,0	533										
Kaub	546,2	523	253	539	256	542	211	506	215	536	251	538
St. Goar	556,4		355	622	355	649	303	618	307	644	350	640
Boppard	570,5		278	553	277	571	223	541	227	571	269	565
Koblenz	591,5	581	261	564	264	596	222	584	227	616	270	618
Andernach	613,8	682	318	668	319	704	264	684	266	715	312	708
Linz	629,9	678	305	678	309	718	251	702	256	735	305	724
Bonn	654,7	605	250	582	253	611	200	592	203	619	251	625
Köln	688,0	647	252	610	256	641	202	624	206	657	256	652
Düsseldorf	744,2	607	193	542	194	566	333	744	329	767	360	750
Ruhrort	780,8	614	118	516	108	528	430	892	419	911	446	866
Wesel	814,0	584	105	508	101	522	421	894	403	909	441	860
Rees	837,4	757	384	769	391	757	298	729	280	738	316	721
Emmerich	851,9	597	228	580	225	589	348	755	336	771	371	757

Opm.; Afstanden in km.

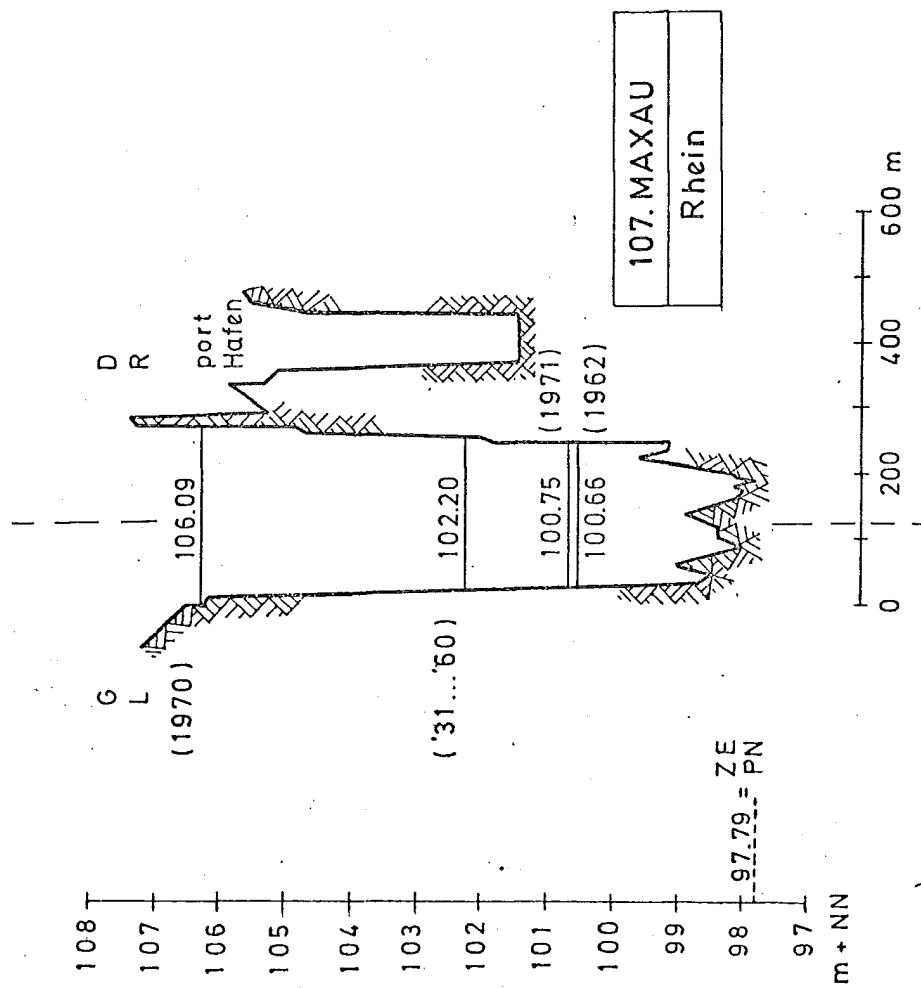
Waterstanden in cm t.o.v. het nulpunt van de plaatselijke peilschaal.

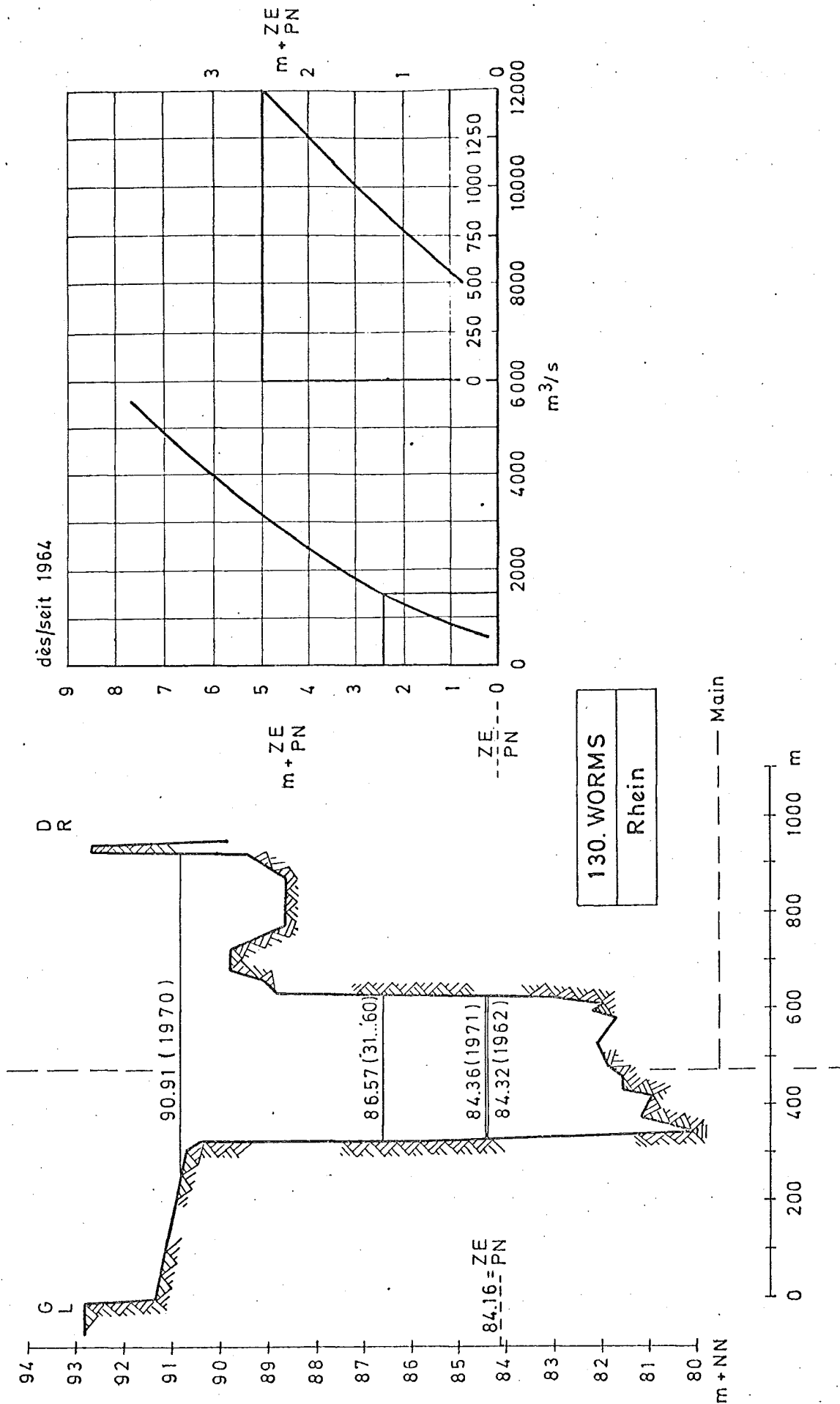
rivier	peilschaal	afstand tot monding	1896-1920	1931-1940		1936-1945		1941-1950		1946-1955		1961-1970	
			MHW	MW	MHW	MW	MHW	MW	MHW	MW	MHW	MW	MHW
Neckar	Heidelberg	26,0	427					520 (SP)	550	520 (SP)	550	520 (SP)	550
Main	Frankfurt	35,1	367	249	382			249	400	245	381	187	368
	Wertheim	15,7	414										
Nahe	Kreuznach	16,5	543										
	Grolsheim	7,4		54	246	58	254	153	354	158	365	166	390
Lahn	Leun	112,3		131	450								
	Runkel	72,2				138	449						
	Kalkofen	31,5						212	532			233	643
	Nassau	21,0	436										
Moezel	Trier	193,0	479	101	471	98	484	177	600	182	620	356	850
	Kochern	51,6	570	135	559	133	579	205	676	210	710	274	697
Ruhr	Wetter	81,7										226 (1966-1970)	568
	Hattingen	57,3				140	465	229	545	210	504		
	Mülheim	14,3	391										
Lippe	Haltern	53,8		231	519	218	497	218	538	209	529	236	565
	Krudenburg	15,2	431										

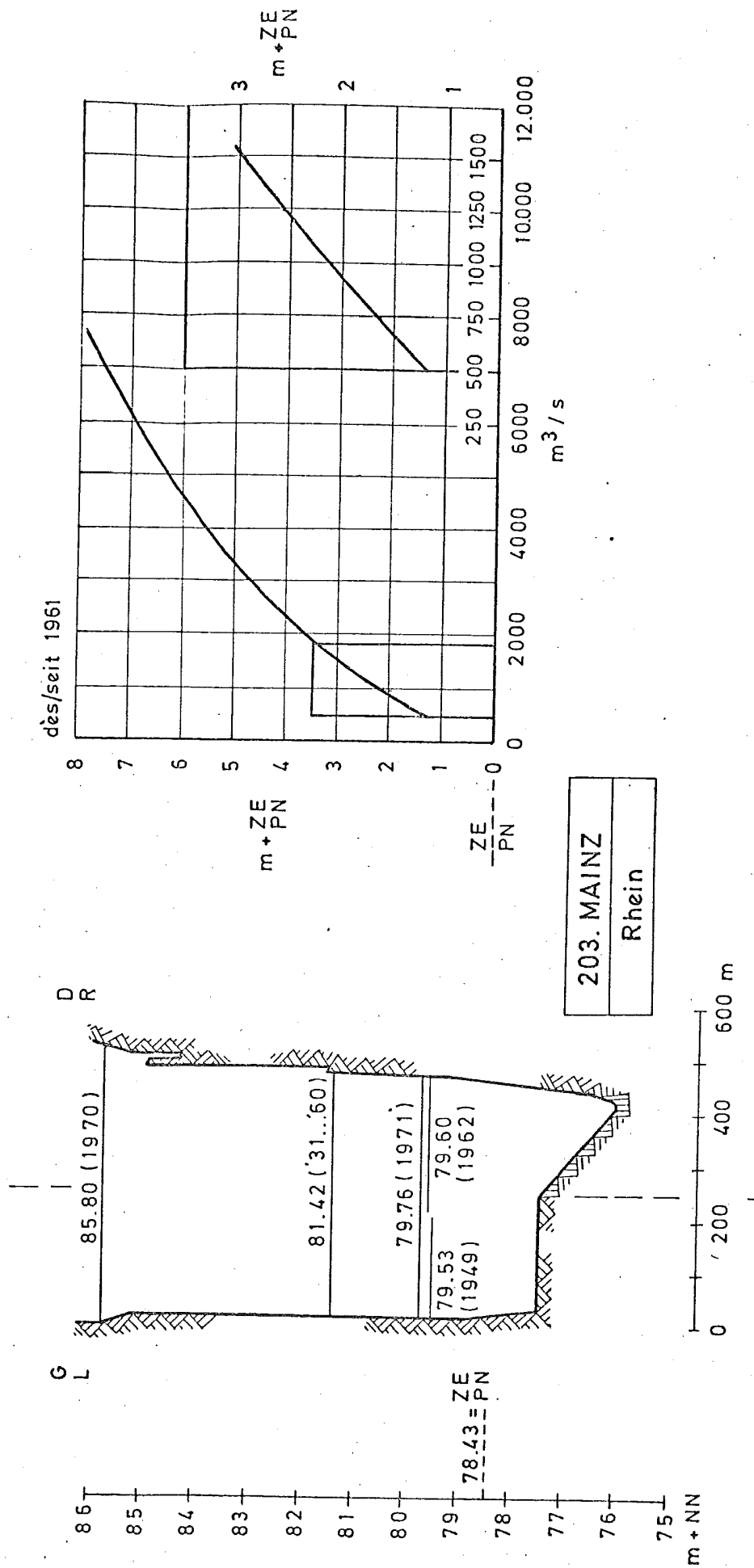
Opm.: Afstanden in km.

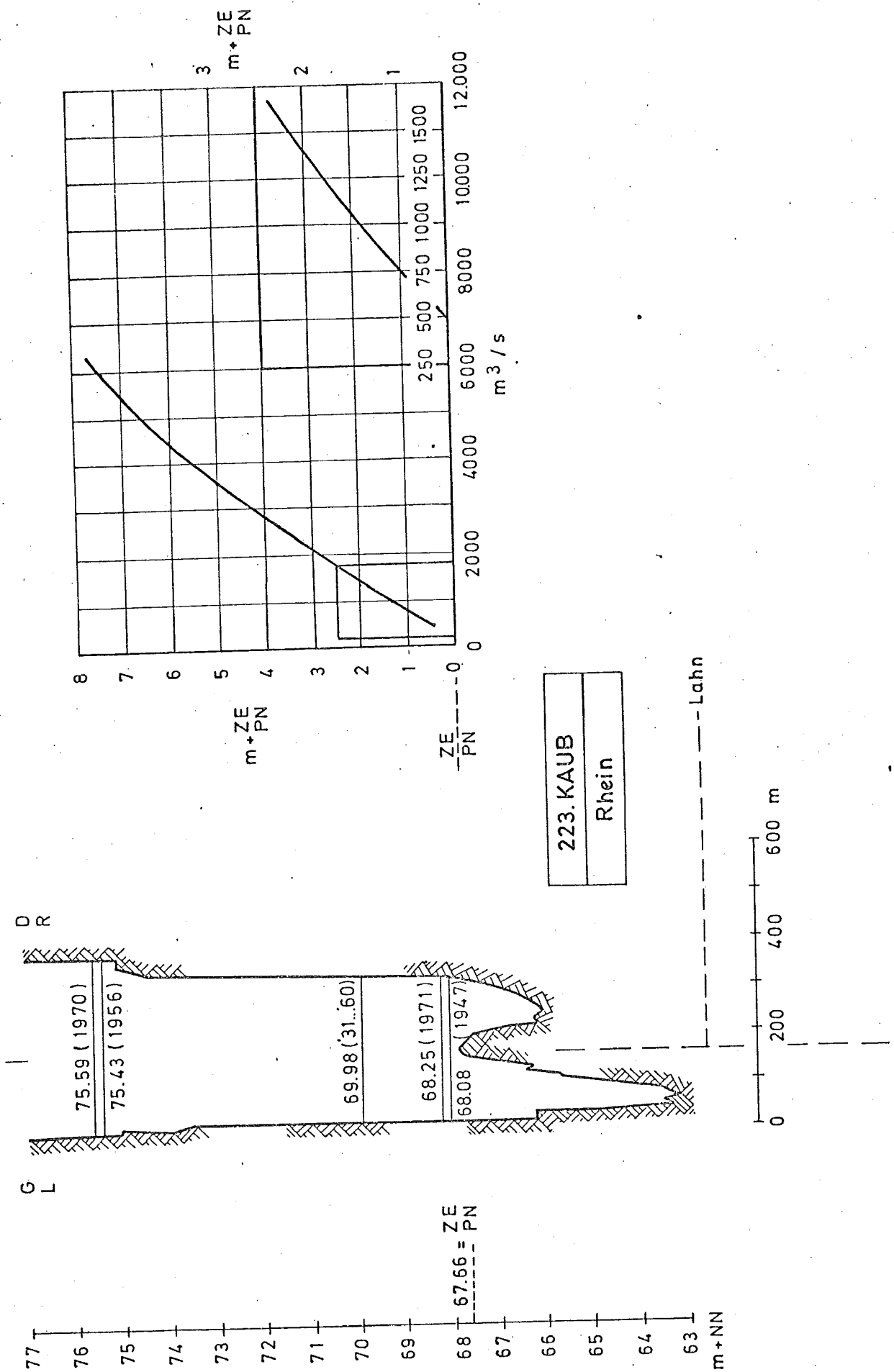
Waterstanden in cm t.o.v. het nulpunt van de plaatselijke peilschaal.

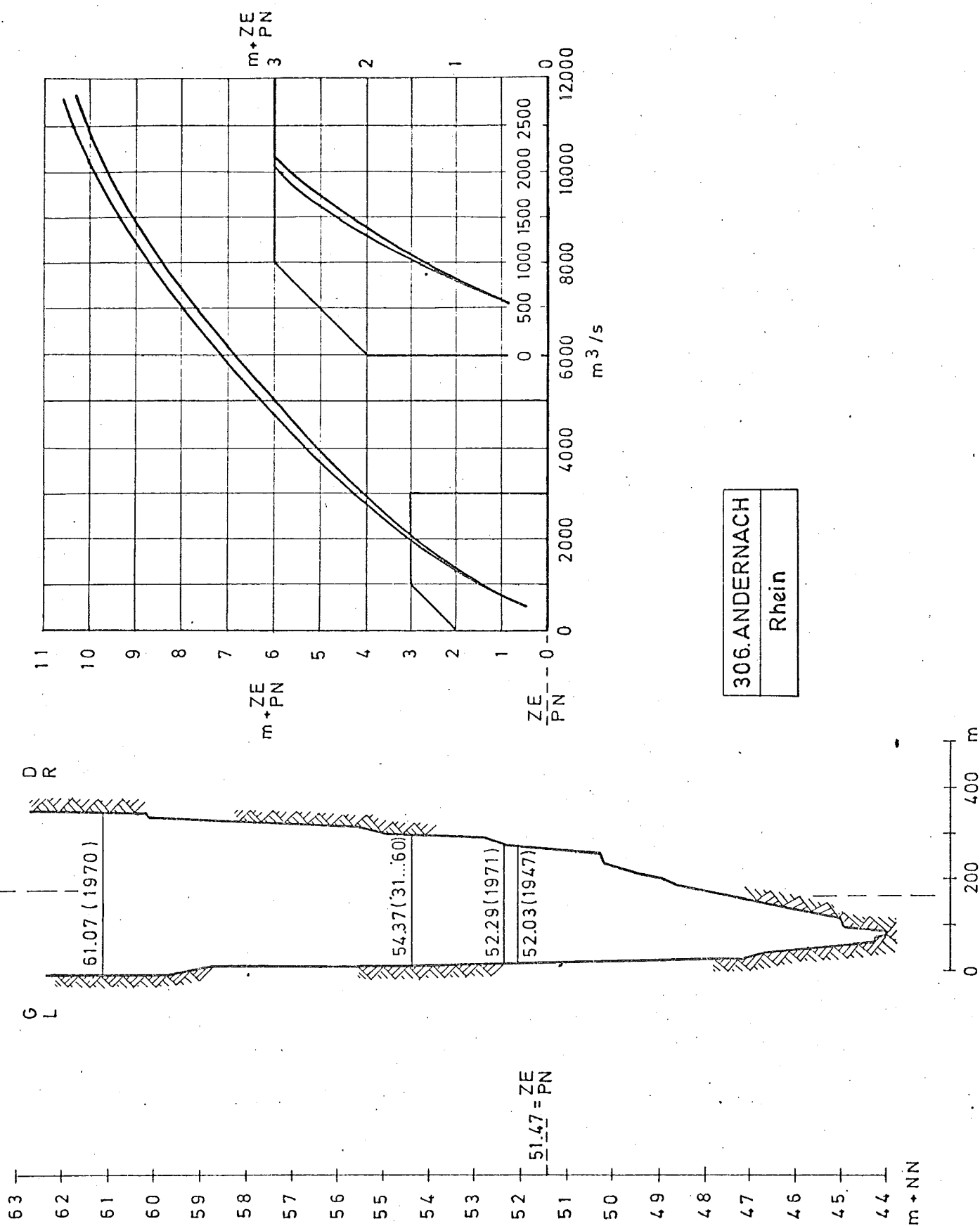
SP=stuwpeil.

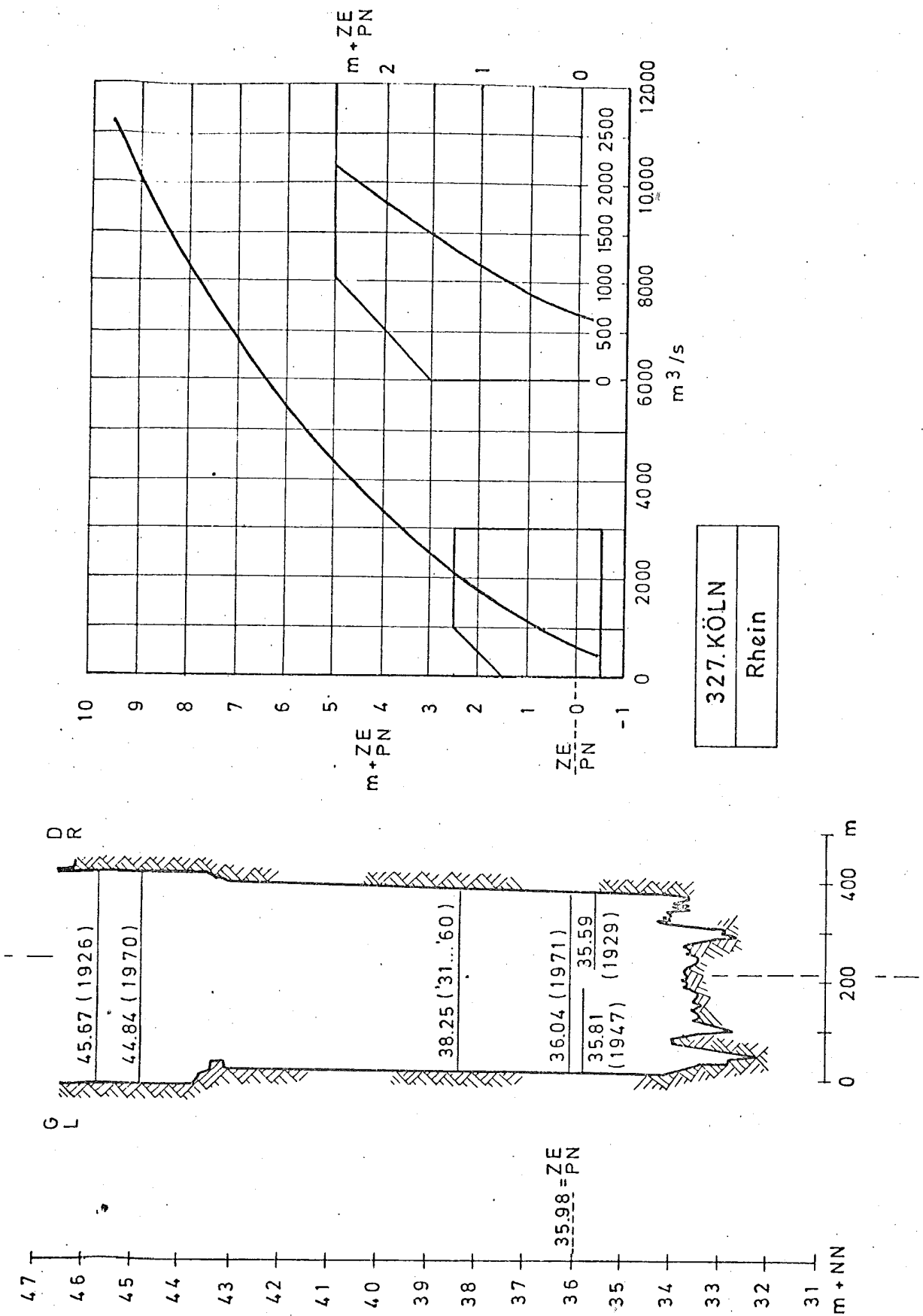


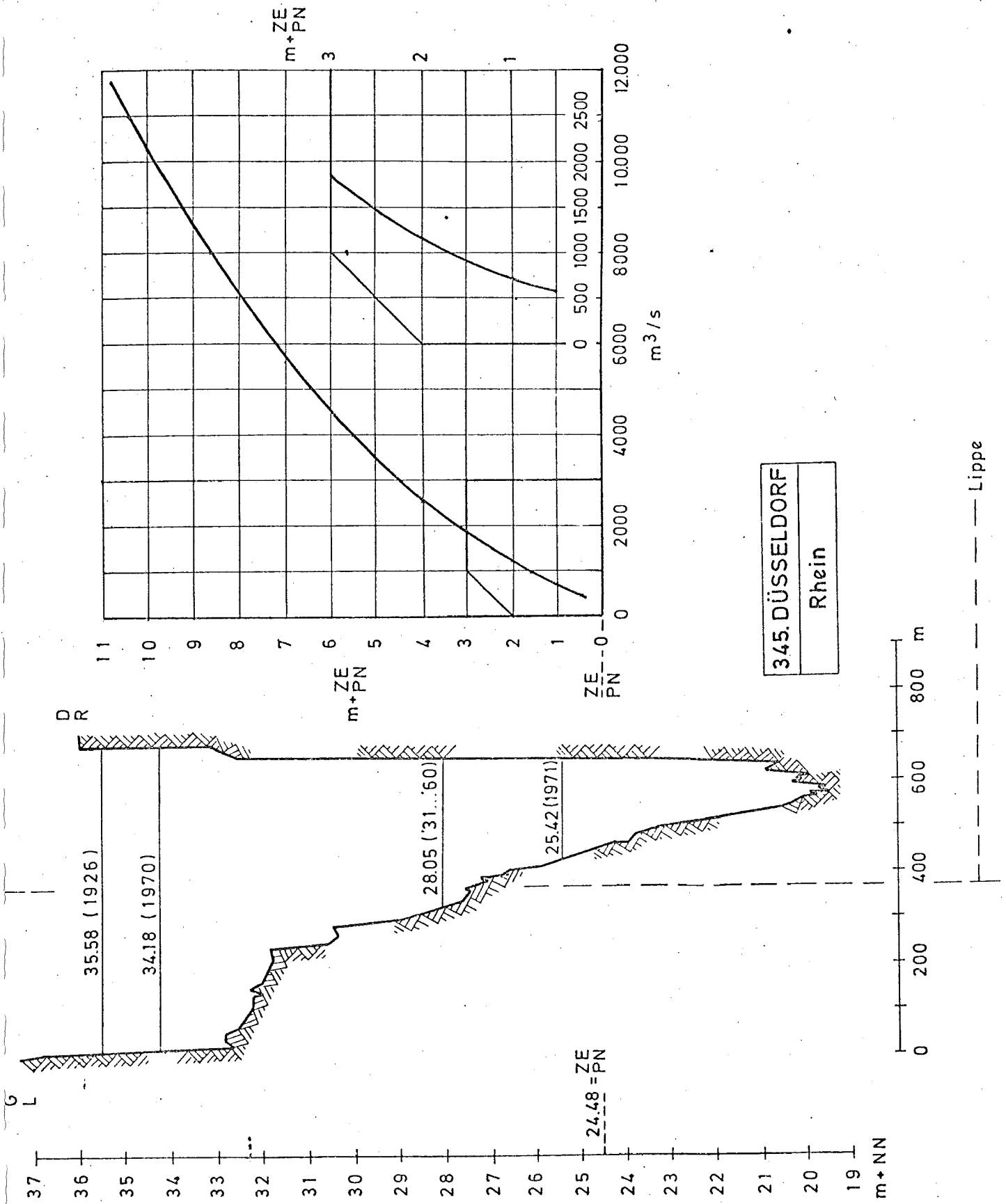




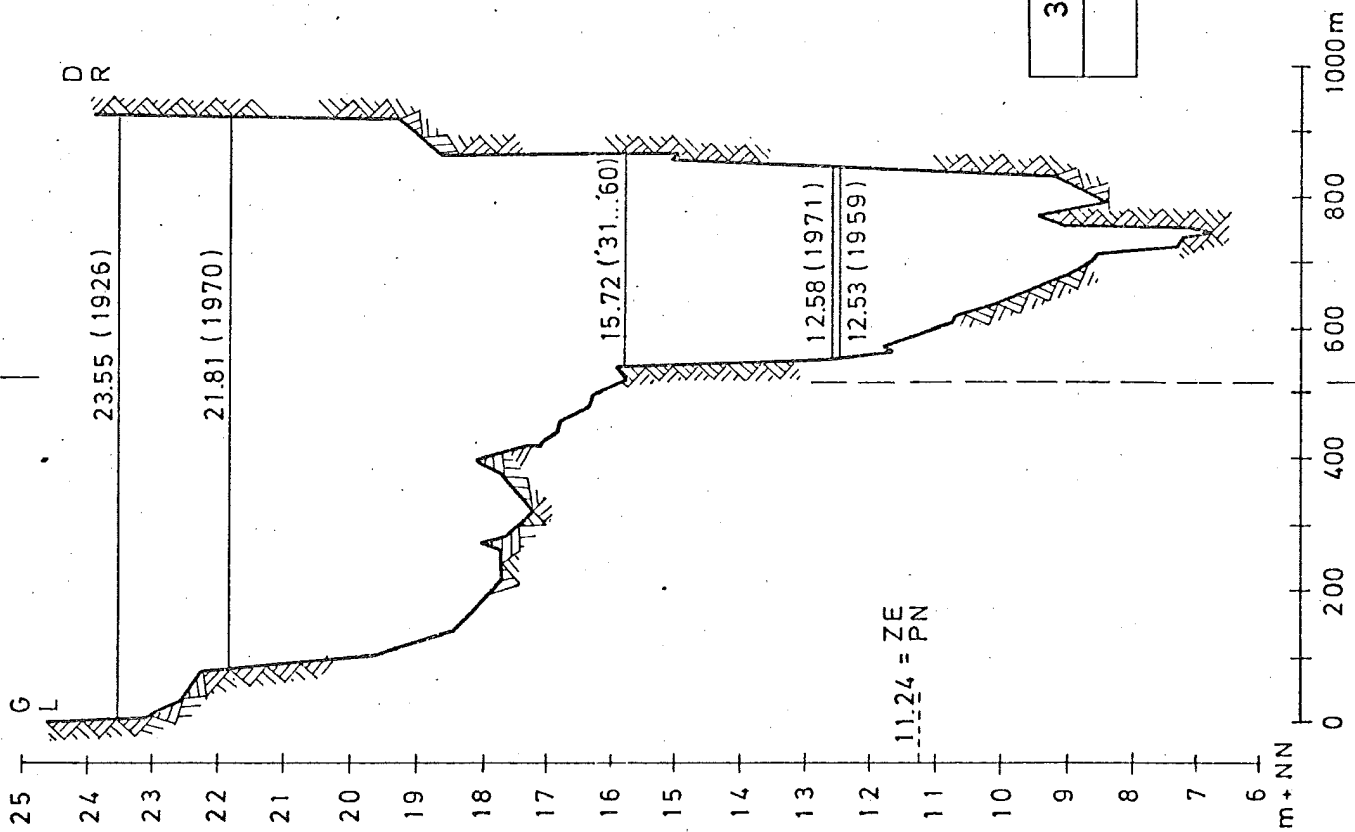




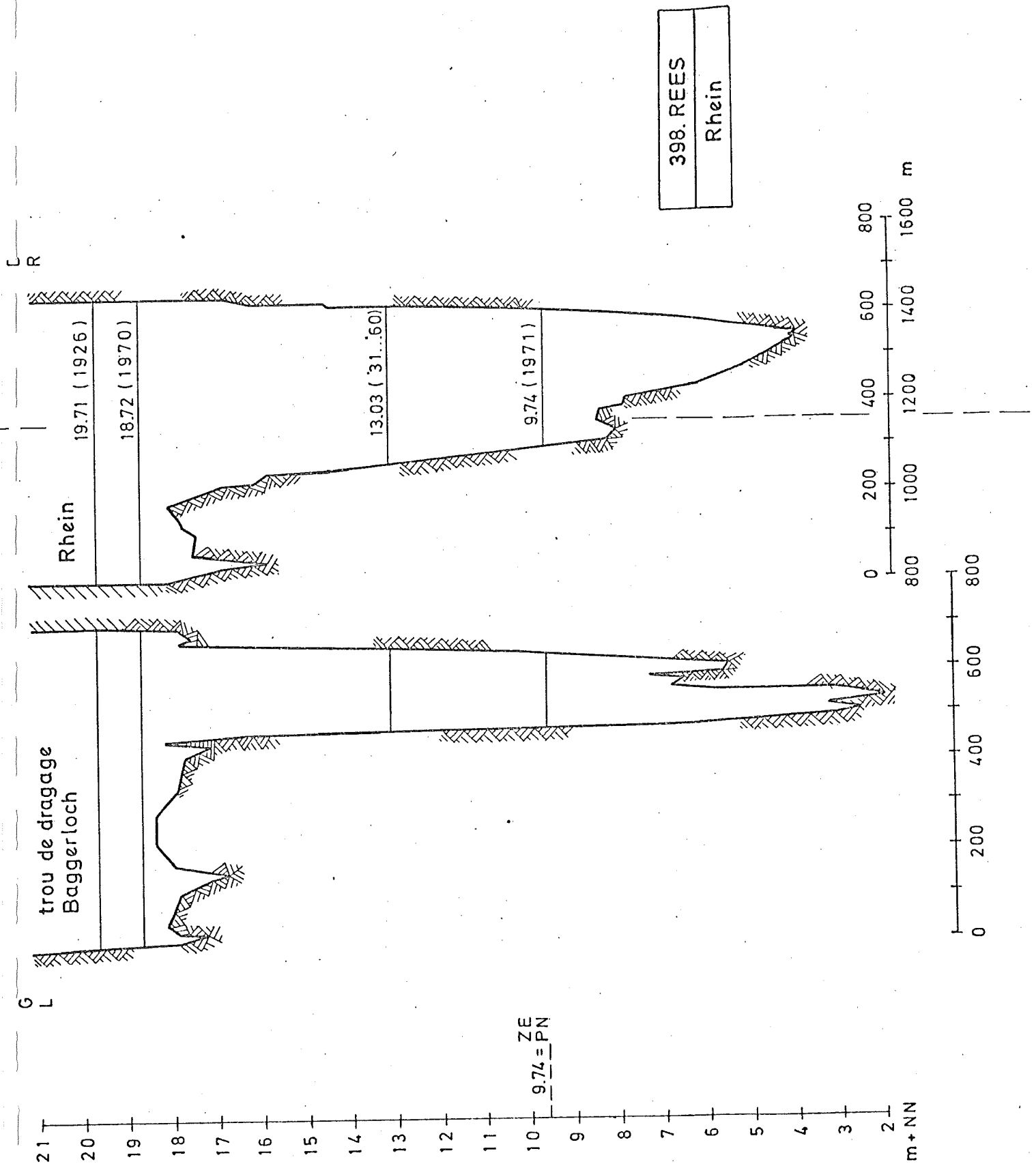


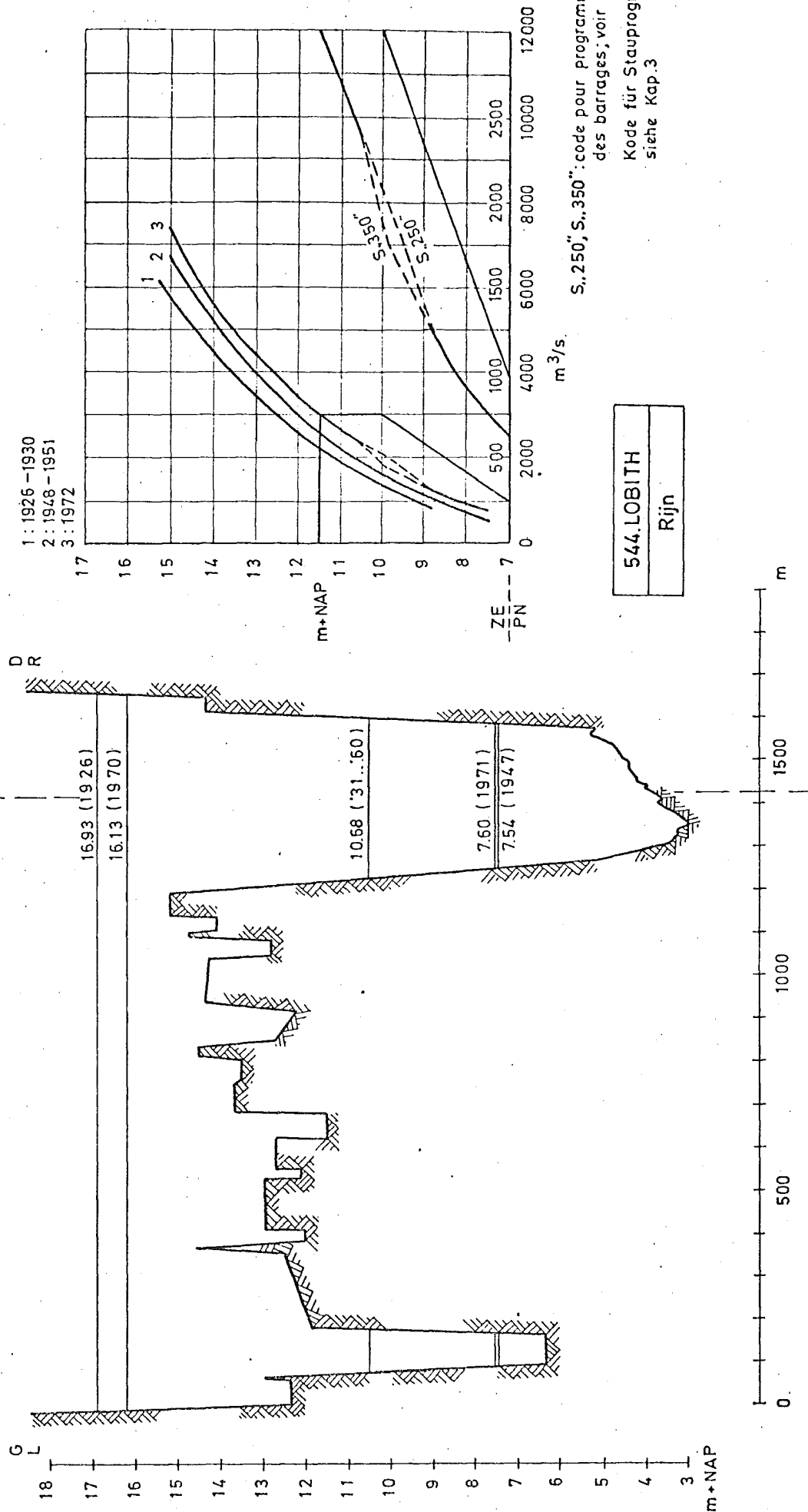


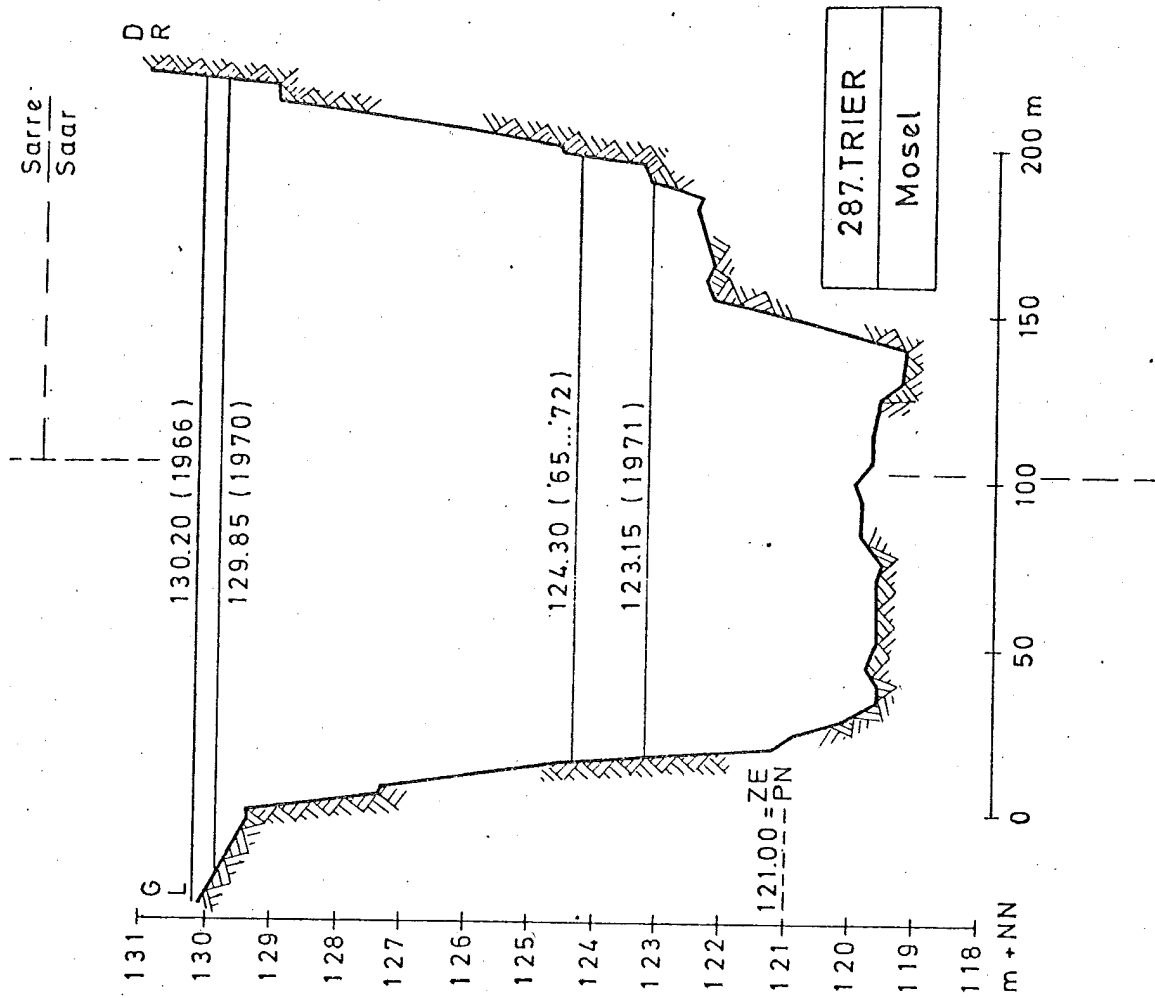
Lippe

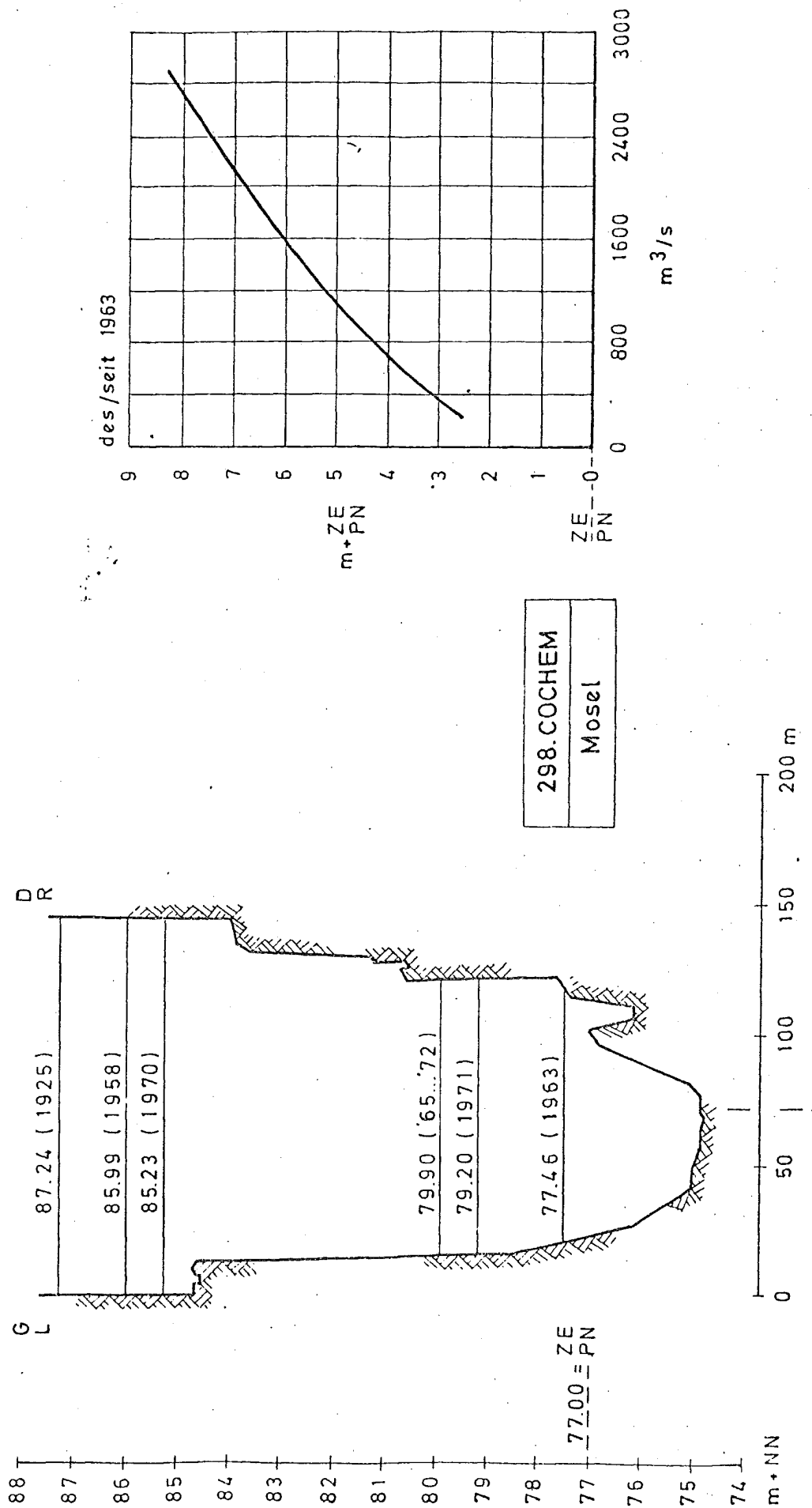


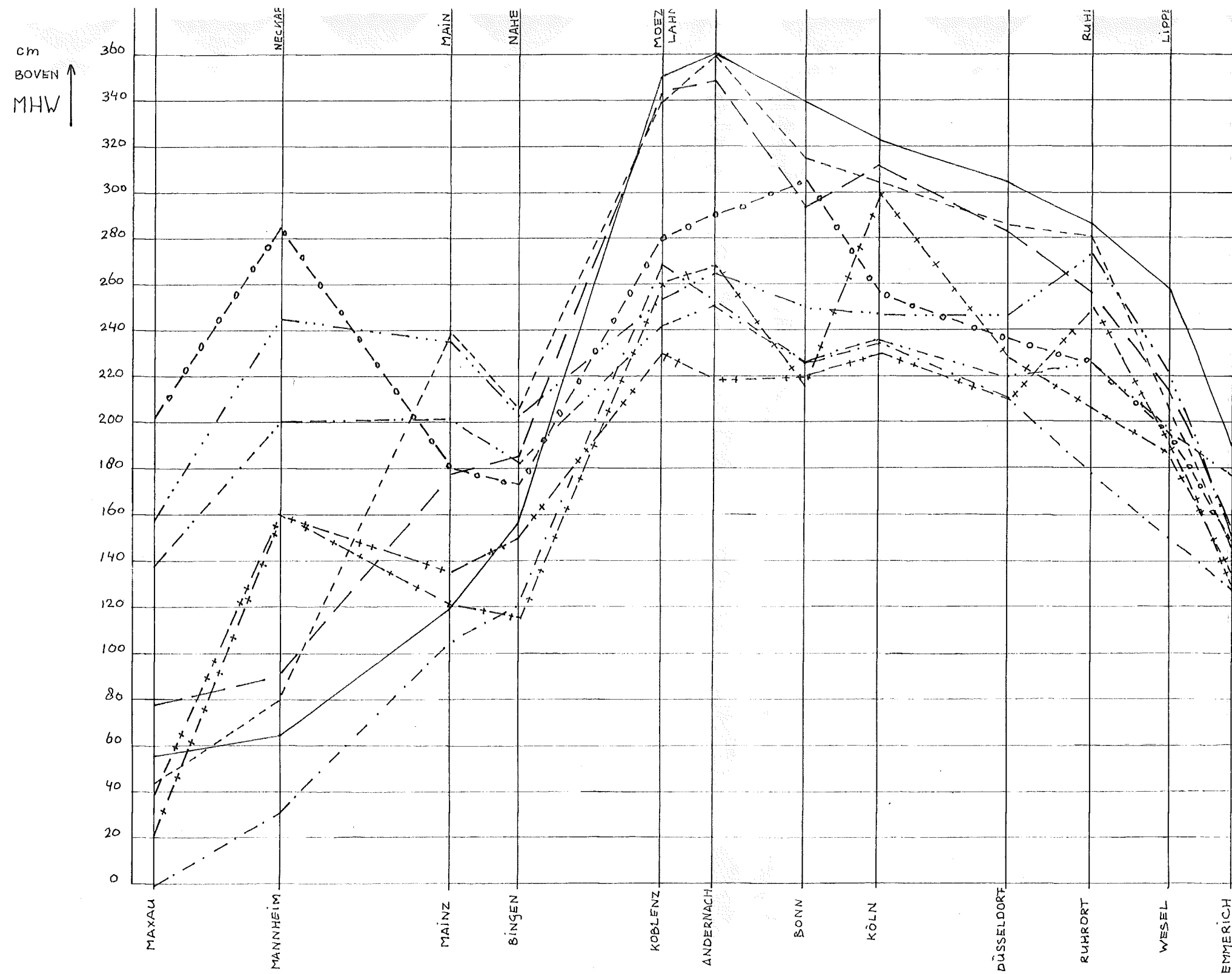
BIJLAGE 19 Dwarsprofiel RIJN t.p.v. REES









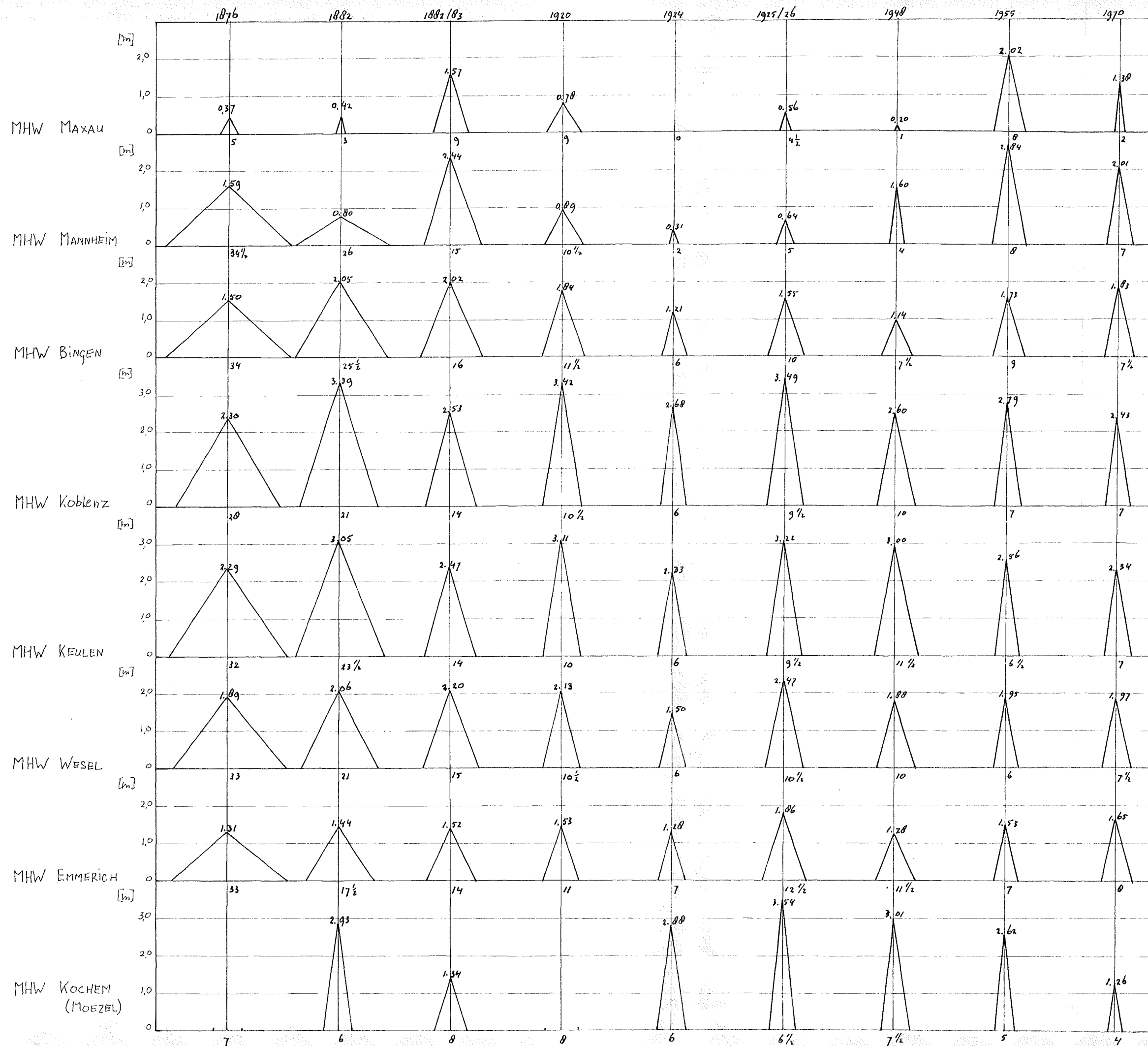


BIJLAGE 26

Afwijking van hoog-
waters groter dan
9000 m³/s te Keulen
t.o.v. MHW

Toelichting: Voor negen hoogwaters is ter plaatse van de belangrijkste peilschalen aangegeven met hoeveel cm de waterstand het MHW overschreed. De berekende waarden zijn onderling verbonden door rechten.

Elke peilschaal kent een eigen MHW. De nullijn correspondeert dus met verschillende waarden op de diverse peilschalen.



Toelichting :

Ter plaatse van belangrijke peilschalen is verticaal aangegeven met hoeveel m. de hoogwatertop het MHW overschreed en horizontaal is in dagen uitgezet hoe lang de waterstanden boven het MHW bleven. Het ingesloten driehoekige oppervlak heeft geen fysische betekenis.

Herhalingstijden van hoogwaters volgens D. Wiener

(bron: Hess, 1959)

peilschaal	hoogwater afvoer in m ³ /s bij een bepaalde				
	1925/1926	100 jaar	200 jaar	500 jaar	1000 jaar
Keulen	11500	12400	13480	14600	15700
Dusseldorf	11100	12000	13100	14200	15200
Ruhrort	12280	12500	13400	14700	15700
Wesel	12100	12400	13200	14400	15250
Rees	11700	12000	12800	14000	14800
Emmerich	12300	12300	13300	14500	15500

Gegevens t.b.v. sommatie van rivierafvoeren.

peilschaal	afvoer m^3/s	datum	frequentie	bron
Basel	6000		10^{-3}	Tzschucke, 1973
	4300	16-6-1910		Der Rhein, 1951
Maxau	8500		10^{-3}	tzschucke, 1973
	4300	9944		Der Rhein, 1951
Mannheim	6000	29-12-1882		Der Rheinstrom, 1889
Mainz	7300	jan 1883		Der Rheinstrom, 1889
Bingen	6800	16-1-1920		Der Rhein, 1951
Koblenz	11100	1-1-1926		Der Rhein, 1951
Ruhrort	12000	2-1-1926		Der Rhein, 1951
Wesel	12900	3-1-1926		Der Rhein, 1951

zijrivier	afvoer m^3/s	datum	bron
Neckar	4800	nov 1824	Der Rheinstrom, 1889
	2800	nov 1824	La Houille Blanche, 1959
Main	2500	-	Der Rhein, 1951
Nahe	1980	16-1-1918	Der Rhein, 1951
Lahn	1150	5-2-1909	Der Rhein, 1951
Moezel	4100	1-1-1926	Der Rhein, 1951
		frequentie 10^{-3}	R. Frecaut, 1973
Ruhr	2200	1890	F. Hess, 1959
Lippe	920	2-1-1926	Der Rhein, 1951

Afvoercombinaties t.g.v. sommaties van de Rijn
en haar zijrivieren.

peilschaal of zijrivier	combinatie 1 afvoer totale afvoer	combinatie 2 afvoer totale afvoer	combinatie 3 afvoer totale afvoer	combinatie 4 afvoer totale afvoer	combinatie 5 afvoer totale afvoer
Maxau	8500	8500	4300	4300	
Neckar	4800	2800	4800	2800	
Mannheim	13300	11300	9100	7100	
Main	2500	2500	2500	2500	
Mainz	15800	13800	11600	9600	
Nahe	1980	1980	1980	1980	
Bingen	17780	15780	13580	11580	6800
Lahn	1150	1150	1150	1150	1150
Moemel	4100	4100	4100	4100	4100
Koblenz	23030	21030	18830	16830	12050
Ruhr	2200	2200	2200	2200	2200
Ruhrort	25230	23230	21030	19030	14250
Lippe	920	920	920	920	920
Wesel	26150	24150	21950	19950	15170

N.B. afvoer in m³/s

Resultaten aannemelijkheidstoets

(bron: Van Urk, 1976a)

reeks	1911-1960	1901-1975	1776-1975
verdeling	alle hoogste afvoeren jaar- vervangen groter maxima door 2 ^e dan top 1926 4000m ³ /s	alle hoogste afvoeren jaar- vervangen groter maxima door 2 ^e dan top 1926 4000m ³ /s	alle afvoeren jaar- groter maxima dan 4000m ³ /s
normale verdeling (MM)	1119 1234	1191 1290	1513 1749
log-normale verd. (MM)	1089 1151	1186 1237	1468 1886
log-normale verd. (MA)	1089 1169	1193 1250	1476 1890
Pearson 111 verd. (MM)	1132 1234	1218 1297	1517 1905
log-Pearson 111 (MM)	1133 1241	1216 1300	1510 1925
Gumbel verdeling (MM)	1074 1107	1173 1201	1357 1924
Gumbel verdeling (KK)	1090 1135	1184 1220	1374 1922

MM=momentenmethode

MA=maximale aannemelijkheidsmethode

KK=kleinste kwadratenmethode

zie voor toelichting blad 2

Toelichting:

een frequentieverdeling kan worden voorgesteld m.b.v.:

$$y=f(x,a,b,c,\dots)$$

waarin x een stochastische grootheid en a,b,c enz. parameters voorstellen.

De kans dat x een bepaalde waarde Q_1 aanneemt is :

$$y_1=f(Q_1,a,b,c,\dots)=f_1$$

De kans dat in een steekproef van N stuks x alle waarden van $Q_1, Q_2, \dots, Q_N$ bezit, bedraagt :

$$L=y_1 \cdot y_2 \cdot \dots \cdot y_N = \prod_{i=1}^N y_i$$

In de tabel is nu uitgezet de waarde van $\sqrt[N]{L \cdot 10^7}$.

Er moet nu gelden: hoe groter L des te beter voldoet de aangenomen verdelingsfunctie.

Overzicht afvoeren in m^3/s voor een overschrijdingskans van 3.10^{-4} per jaar (ontleend aan Van Urk, 1976a).

reeks	1911-1960		1901-1975		1776-1975	
	alle hoogste afvoeren jaar- vervangen maxima door 2 ^e dan	top 1926 4000m ³ /s	alle hoogste afvoeren jaar- vervangen groter maxima door 2 ^e dan	top 1926 4000m ³ /s	alle afvoeren groter dan 4000m ³ /s	
verdeling						
exponentiële ver.	18000		16500		15000	
normale verd.	14100	13300	13300	12700	11900	11300
(MM)						
log-normale verd.	19100	17400	17800	16550	14500	13000
(MM)						
log-normale verd.	21000	19600	19300	18300	15400	12500
(MA)						
Pearson-III verd.	15700	13600	15400	13350	13300	14200
(MM)						
log-Pearson-III verd.	14800	12800	14300	12650	11100	14800
(MM)						
Gumbelverd.	19400	18200	18300	17100	15800	14600
(MM)						
Gumbelverd.	20100	18700	18800	17600	16000	14800
(KK)						

Afvoeren in m^3/s .

Opm. De exponentiële verdeling is berekend met alle toppen en visueel aangepast.

Zie voor MM, MA en KK bijlage 32, blad 1.

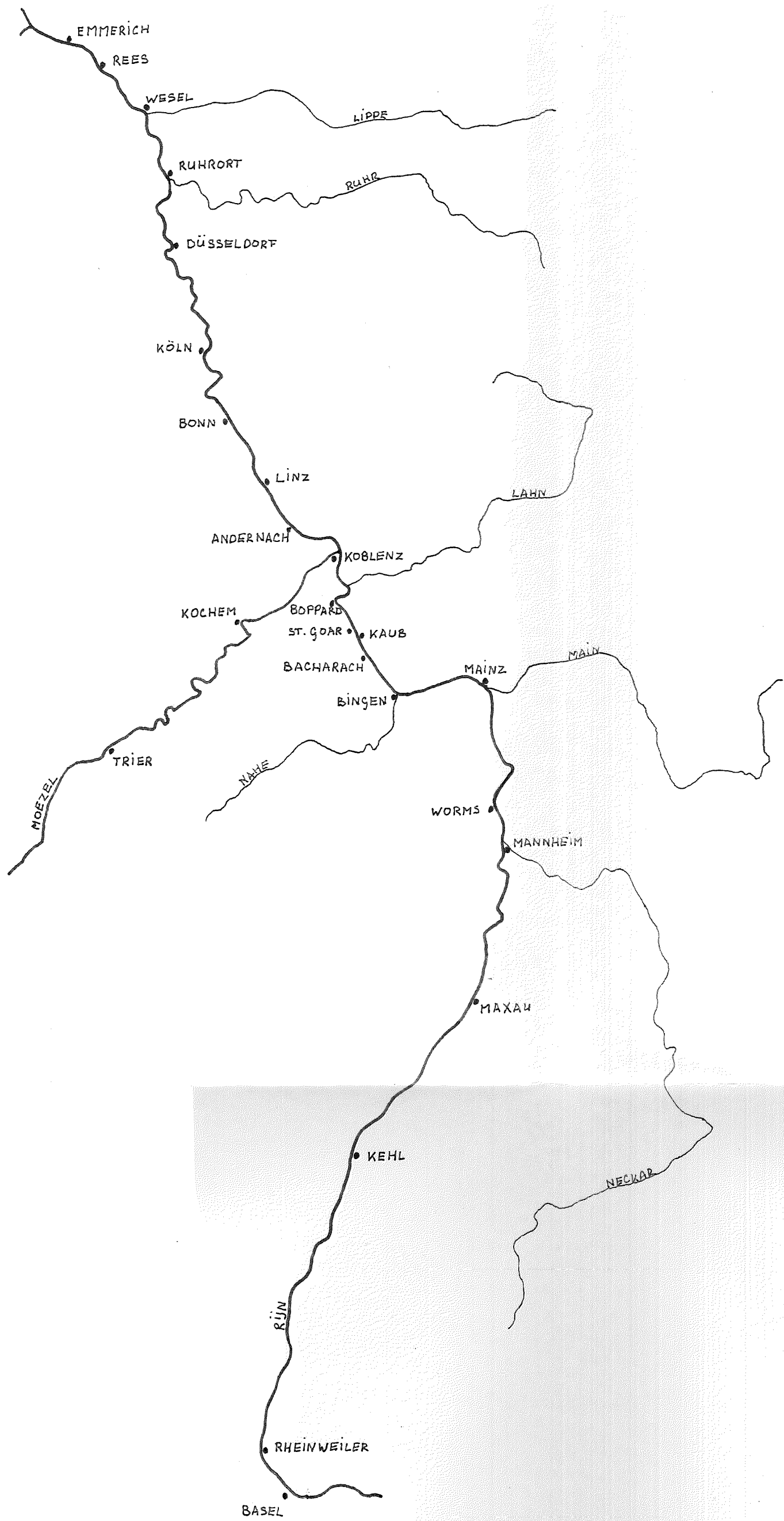
Overzicht maatgevende afvoeren

bepaling maatgevende afvoer volgens	afvoer m ³ /s	herhalings- tijd jaren	opmerkingen
meteorologie	40000	-	
verhoging van de af- voer van een historisch hoogwater	13600 13100 14700	300 180 500	peilschaal Wese " " " "
sommatie afvoer Rijn en zijrivieren	26150 24150 21950 19950 15170	- - - - -	peilschaal Wese " " " " " " " "
splitsing topafvoeren in beginafvoer en verhog- ging	18500	3333	
extrapolatie Minister opgetreden van Verkeer hoogwaters en water- staat(1956)	18000 17200 16200 14600	3333 2000 1000 500	extrapolatie alle afvoertop- pen van 1911- 1960, exponen- tiële verdeling
Hess	14300 14400	500 500	extrapolatie waterstanden extrapolatie afvoeren
Hillen	19000 16700 13200	3333 3333 3333	fict.freq.lijn Gumbel log-Pearson 111 log-Pearson 111 alle toppen

extrapolatie Dir. Waterh.	14750	3333	reeks 1976-1975
opgetreden en waterb.			alle toppen
hoogwaters (Van Urk,			combinatie van 3
1976a)			verdelingen
	17100	3333	reeks 1901-1975
			groter dan 4000m^3 /
			combinatie van 3
			verdelingen
	16250	3333	reeks 1901-1975
	14850	1000	groter dan 4000m^3 /
			Pearson 111
	18600	3333	reeks 1901-1975
	16300	1000	groter dan 4000m^3 /
			log-Pearson 111
	16500	3333	reeks 1901-1975
	14950	1000	groter dan 4000m^3 /
			Gumbel
Dir. Waterh.	18000	3333	reeks 1901-1975
en Waterb.	16150	1000	groter dan 5000m^3 /
(Van Urk,			exp. verdeling
1976b)			
Duitse	15000	1000	1925/26 + 20%
instanties	16000	3333	1925/26 + 20%

Fysisch mogelijke afvoeren

schatting volgens	afvoer m ³ /s	herhalings- tijd in jaren	configuratie rivier
Hillen (1975)	17000	700 à 800	bandijkverhoging met 1m en inpoldering zomerpolders (uitvoering hoogwaterbe- strijdingsplan)
	14000	170	huidige situatie (geen uitvoering hoogwater- bestrijdingsplan)
D. Wiener (Bess, 1959)	14300	500	bandijkverhoging met 0,60m en inpoldering (geen bodem- daling)
Bundesanstalt für Wasserbau (1973)	15000	1000	huidige situatie (1925/26 + 1m) inclusief inpoldering Grieth en Griethausen



Waterstanden tijdens topafvoeren. (waterstanden in cm t.o.v. het nulpunt van de plaatselijke peilschaal)

peilschaal	dec 1819	nov 1824	dec 1833 jan 1834	feb 1844	mrt 1845	jan 1846	feb 1850	feb 1862	mrt 1876	nov 1882
	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws
Basel		5 540			30 297				14 390	28 377
Rheinweiler										
Kehl		5 661			31 502				15 538	29 511
Maxau		6 613			31 630				16 705	30 710
Mannheim		6 901 16 796			29 862				18 832	30 753
Worms										
Mainz		7 485 16 531			31 573				11/12 492	28 595
Bingen					31 620				13 565	28 620
Bacharach					31 837	geen	geen			
Kaub						gegevens	gegevens			
St.Goar										
Boppard										
Koblenz	834	16 790	774	811	30 919			787	13 811	28 920
Andernach	942	16 897	863	931	30 1036			887	13 900	28 1040
Linz	1025		845	939	30 1051			915	13 934	28 1064
Bonn		16/17 819		863	30 923			806	13/14 876	28 920
Köln	863	16 850	819	855	31 934			849	14 876	28 952
Düsseldorf	811	17 806	779	808	31 853			804	14 816	29 893
Ruhrort	837	17 853	819	829	1 871			832	15 864	29 896
Wesel	761	18 777	727	735	2 811			756	15 773	30 790
Rees	722		714	706	2 766			714	15 750	30 758
Emmerich	691	18 717	704	698	2 745			706	15 728	1 741

	mrt 1876	nov 1882	dec 1882 jan 1883	dec 1919 jan 1920	nov 1924	dec 1925 jan 1926	nov 1930	feb 1937	dec 1939	jan 1941	mrt 1942	nov 1944
	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws
	14 390	28 377	28 560	13 338 24 370	1 223	28 235						
								23 438	1 423	26 355	20 385	
	15 538	29 511	29 670		2 420							
	16 705	30 710	0/31 825	15 746 27 797	3 667	31 724	24 698	24 636	2 617	27 635	21 610	26/27 830
	18 832	30 753	29 917	16 562 29 838	4 704	1 737		24 637	2 631	27 725	20 695	28 840
							24 411	24 543	2 539	27 616	20 606	28 688
11/12	492	28 595	1/5 593	16 533 30 480	5 460	2 475	25 480	25 594	2 601	28 641	21 656	29 653
13	565	28 620	1/5 617	16 599 30 559	5 536	3 570		25 479	2 484	28 529	21 542	29 534
			31 804	31 740	5 695	31 741	25 660	25 611	3 610	28 681	22 699	29 682
							25 763	25 718	2 702	28 800	21 813	29 798
							25 740	23 650	2 642	28 710	21 729	29 708
13	811	28 920	31 824	16 923 31 817	5 853	1 930	25 769	25 680	29 666	28 755	21 746	27 735
13	900	28 1040	31 946	16 1030 31 923	5 965	1 1041	25 884	25 794	29 784	28 868	21 867	27 848
13	934	28 1064	31 966				25 911	25 816		28 900	21 896	27/28 868
13/14	876	28 920	31 856	16 898 31 802	5 830	1 910			29 807	28 745	21 754	27 736
14	876	28 952	1/2 894	16 958 1 862	5 880	1/2 969	25 815	25/26 728	1 740	28 784	21 794	27/28 808
14	816	29 893	2 853	16 889 1 806	6 818	2 910	25/26 750	26 654	1 665	28 702	21 715	28 690
15	864	29 896	2 887	17 869 1 811	6 792	2 900		26 635	2 672	29 664	22 684	28 653
15	773	30 790	3 804	17/18 797 2 758	7 734	3 831	26 703	27 625	2 665	29 639	22 665	29 643
15	750	30 758	3/4 768				27 712	27 650	2 886	29 866	22 896	29 873
15	728	1 741	4 749	18 750 2 729	7 725	3 783	27 719	27/28 666	3 696	30 672	23 693	30 682

dec 1939	jan 1941	mrt 1942	nov 1944	feb 1945	feb 1946	jan 1948	dec 1952	jan 1955	mrt 1956	feb 1958	feb 1970
dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws
1 423	26 355	20 385			8 309	29 427	22 466 2/12 584	15 694	4 380	24 552	23 648
2 617	27 635	21 610	26/27 830	15 720	8 553	31 703	23 666 31/11 690	17 838	5 689	27 741 11/12 690	25 830 12 717
2 631	27 725	20 695	28 840	14 726	10 550	30 808	23 634 2/12 660	17 876	5 720	26 734 12 680	26 795 11 709
2 539	27 616	20 606	28 688	14 606	10 456	31 688	23 556 2/12 575	17/18 746	5 635	26 641 13 594	24 675 11 607
2 601	28 641	21 656	29 653	16 619	11 591	31 668	23/24 584 2/12 573	18/19 694	6 650	26/27 637 13 596	27 737 11 612
2 484	28 529	21 542	29 534	15 496	11 440	31 549	23 479 2/12 474	19 580	6 530	26/27 530 13 487	27 612 11 501
3 610	28 681	22 699	29 682	15 638	11 557	31 714	23 602 2/12 580	19 750	6 777	26/27 675 13 607	27 793 11 623
2 702	28 800	21 813	29 798	18 794	11 685	31 834	23/24 711 2/12 698	19 866	6 793	26/27 803 13 719	27 902 11 738
2 642	28 710	21 729	29 708	16 670	11 648	1 751	23/24 644 2/12 627	19 793	6 699	26/27 720 13 649	26/27 814 11 662
29 666	28 755	21 746	27 735	15 731	11 690	1 856	23 710	19 863	6 702	27 795 12 737	24 861 12 712
29 784	28 868	21 867	27 848	15 838	11 790	1 972	23 820	19 975	6 810	27 905 12 842	25 960 12 807
	28 900	21 896	27/28 868	15 860	11 827	1 1011	23 846	19 1004	6 829	27 934 12 864	25 990 12 826
29 807	28 745	21 754	27 736	15 735	11 721	1 829	23/24 720	19 835	6 702	27 790 12 720	24/25 850 12 704
1 740	28 784	21 794	27/28 808	15 802	11 832	2 941	24 762	19 880	6/7 744	27/28 831 13 754	25 886 12 739
1 665	28 702	21 715	28 690	16 680	11 691	2 794	24 867	20 980	7 854	28 938 13 858	26 970 12/13 821
2 672	29 664	22 684	28 653	16 649	10 712	3 734	24 1018	20 1118	7 990	28 1083 14 977	26 1091 13 929
2 665	29 639	22 665	29 643	16 646	11 724	3 710	24 1001	20 1089	7 986	28 1059 14 977	26 1057 13 919
2 886	29 866	22 896	29 873	16 875	11 890	3 894	26 836	20/21 891	8 814	1 878 14 809	26/27 898 13 779
3 696	30 672	23 693	30 682	17 689	12 707	3/4 717	26/27 850	21 908	8 846	1 898 14 841	26 922 13 815

Waterstanden zijrivieren.

(waterstanden in cm t.o.v. het nulpunt van de plaatselijke peilschaal)

[illegible]

[illegible]

feb 1945	feb 1946	jan 1948	dec 1952	jan 1955	mrt 1956	feb 1958	feb 1970
at ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws	dat ws
			22 782		4 935	25 794	23 940
	10/11 480	2 522 15 466	24 355	19 340	6 418	28 370	27 539
3 245	5 339	29 317	21 450 1/12 416	17 353	4 330	26 338 9 387	23 400 10 373
	10 688	29 490					
			22 538	18 578	3 735	27 606 14 433	24 752 10 467
4 523	5 624	31 785	22 734 2/12 676	17 840	6 531	26 734 11 809	24 868 11 808
4 630	6 716	1 880	22 838 2/12 768	18 938	6 587	27 846 11 899	24 823 12 710 23 614 10 513
3 462	9 580	29 475	26 431	17 435	5 517	27 530 14 396	
3 462	10 762	28 535	23 485	18 497	5 517	26 552	23 614 10 513

(waterstanden in cm t.o.v. het nulpunt van de plaatselijke peilschaal)

	dec 1819	nov 1824	dec 1833 jan 1834	feb 1844	mrt 1845	feb 1862	mrt 1876
peilschaal	MHW 1896/20 cm % duur	MHW 1896/20 cm % duur	MHW 1896/20 cm % duur	MHW 1896/20 cm % duur	MHW 1896/20 cm % duur	MHW 1896/20 cm % duur	MHW 1896/20 cm % duur
Basel		205 59			-48 -14		45 13
Rheinweiler		187 39					
Kehl		187 39			28 6		64 14
Maxau		-55 -8			-38 -6		37 6 5
Mannheim		228 34 123 18			189 28		159 24 34 ⁵
Worms							34 ⁵
Mainz		129 36 175 49			217 61		136 38 34
Bingen					205 49		150 36 34
Bacharach					304 57		
Kaub.							31
St.Goar							
Boppard							
Koblenz	253 44	209 36	193 33	230 40	338 58	206 35	230 40 28
Andernach	260 38	215 32	181 27	249 37	354 52	205 30	218 32
Linz	347 51		167 26	261 38	373 55	237 35	256 38
Bonn		214 35		258 43	318 53	201 33	221 37 33
Keulen	216 33	203 31	172 27	208 32	287 44	202 31	229 35 32
Düsseldorf	204 34	199 33	172 28	201 33	246 41	197 32	209 34 32 ⁵
Ruhrort	223 36	239 39	205 33	215 35	257 42	218 36	250 41 33 ⁵
Wesel	277 30	193 33	143 24	151 26	237 39	172 29	189 32 33
Rees	-35 -5		-43 -6	-51 -7	9 1	-43 -6	-7 -1
Emmerich	94 16	120 20	107 18	101 17	148 25	109 18	131 22 33
Trier		289 48	-24 -5	325 54	212 44		7
Moezel							
Kochem		330 58	-2 0	259 57	233 41		7
Moezel							
Hattingen							
Ruhr							
Haltern							
Lippe							
					Frankfurt(Main) 361 98		(Main) 29
							34

elijke peilschaal)

mrt 1876

MHW 1896/20
cm % duur

45 13

64 14

37 6 5

159 24 34⁵

34⁵

136 38 34

150 36 34

31

230 40 28

218 32

256 38

221 37 33

229 35 32

209 34 32⁵

250 41 33⁵

189 32 33

7 -1

131 22 33

7

7

(Main)

29

34

nov 1882

MHW 1896/20
cm % duur

32 9

37 8

42 6 3

80 12 26

27

239 67 30

205 49 25⁵

22⁵

339 58 21

358 52

386 57

315 52 23⁵

305 47 23⁵

285 47 23⁵

282 46 26

206 35 21

1 0

144 24 17⁵

221 46 7

293 51 6

Wertheim(Main)

310 75 10⁹

dec 1882

jan 1883

MHW 1896/20
cm % duur

215 62

196 41

157 24 9

244 36 15

16

237 67 15⁵

202 49 16

281 54 15

253 44 14

264 39

288 42

251 41 14

247 38 14

246 41 14⁵

273 44 15

220 38 15

11 1

152 25 14

109 23 8

134 24 8

Wertheim(Main)

220 53

dec 1919

jan 1920

MHW 1896/20
cm % duur

-7 -2
25 7

78 12 9
129 19 4⁵
89 13 10⁵
165 25 5⁵
105 5⁵

177 50 11

124 35 8⁵

184 44 11⁵

144 35 10

217 41 9

342 59 10⁵

236 41 9

348 51 11

241 35 11

293 48 10

197 33 9

311 48 10

215 33 9

282 46 10⁵

199 33 9

255 42 10⁵

197 32 9⁵

213 36 10⁵

174 30 10⁵

153 26 11

132 22 12

8 5

198 8 5

5

nov 1924

MHW 1896/20
cm % duur

-122 -35

-54 -8

-1 0

31 4 2

2

104 29 5

121 29 6

172 33 5⁵

268 47 6

283 41 6

225 37 6

233 36 6

211 35 6

178 29 5⁵

150 26 6

128 21 7

259 54 6

288 51 6

dec 1925

jan 1926

MHW 1896/20
cm % duur

-110 -32

56 8 4⁵

64 10 5

4⁵

119 33 8

155 37 10

218 42 9

349 60 9⁵

359 53 9⁵

305 50 9⁵

322 50 9⁵

303 50 9⁵

286 47 9

247 42 10⁵

186 31 12⁵

284 59 6

354 62 6⁵

177 45 5

7⁵

nov 1930

MHW 1931/40
cm % duur

16 2

16 2

4 1 0⁵

15 3 2⁵

-117 -22

-50 -9

121 22 6

141 23 6⁵

157 28 7

205 36 5

216 18 5⁵

233 34 7⁵

205 34 6

208 38 7⁵

119 23 8⁵

197 39 6⁵

-57 -7

139 24 7

186 39 ?

211 38 ?

23 4

feb 1937

MHW 1931/40
cm % duur

-141 -24

-46 -7

4 1 0⁵

15 3 2⁵

64 12 6

63 15 6

72 13 5

96 15 8

97 18 8

116 21 6⁵

126 19 7⁵

138 20 7⁵

118 19 7⁵

102 19 10

119 23 8⁵

117 23 8⁵

-119 -15 -

86 15 10

47 10 2

38 7 1

9 2

dec 1939

MHW 1931/40
cm % duur

-156 -27

-65 -19

-2 0

11 2 1⁵

71 13 7

68 16 9⁵

71 13 5

80 13 10⁵

89 16 10⁵

102 18 6

116 17 7

125 21 10⁵

130 21 7⁵

123 23 10⁵

156 30 8⁵

157 31 8⁵

183 24 9⁵

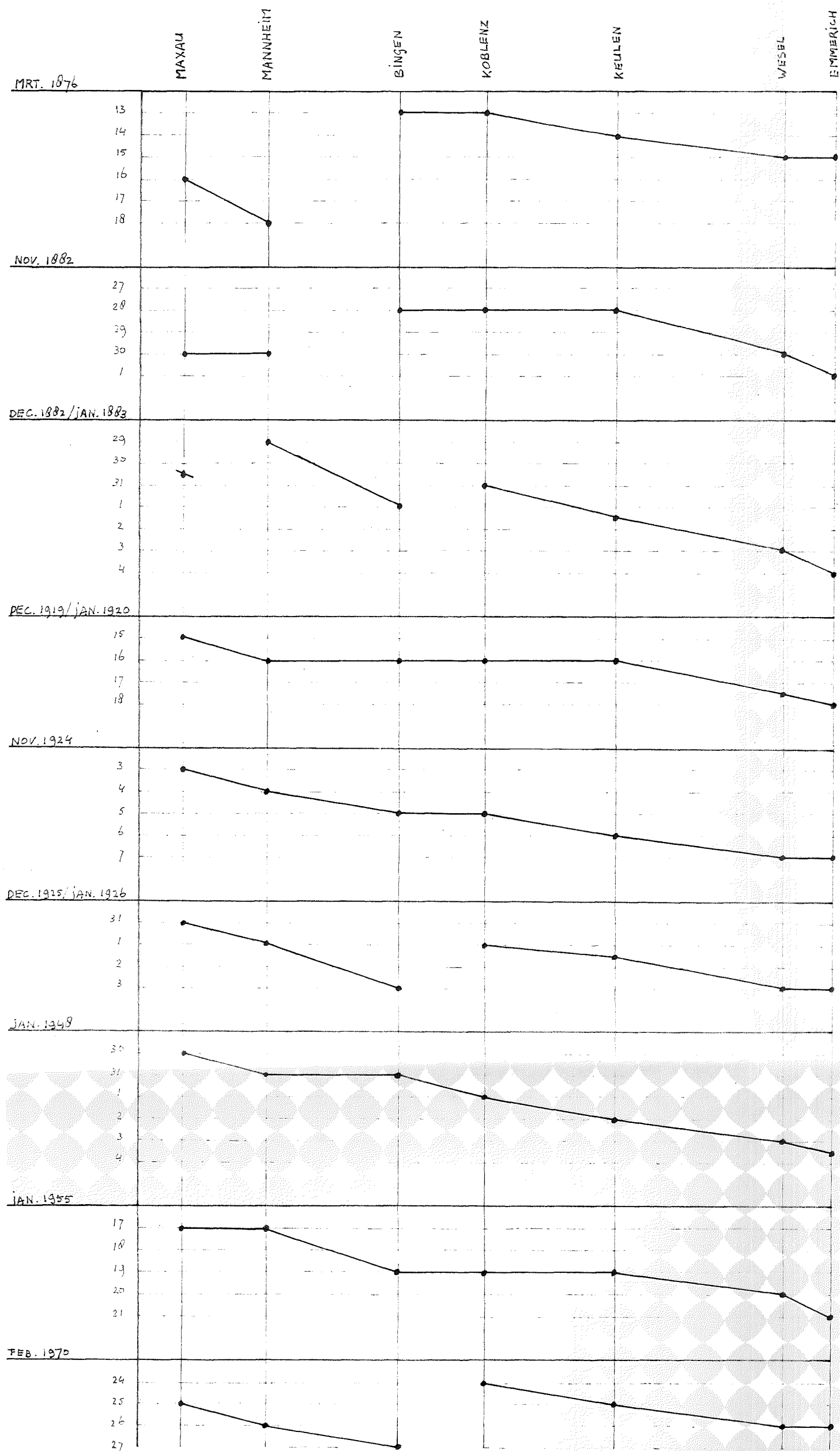
116 20 11

36 8 1

44 8 1

29 6 8⁵

0	feb 1937			dec 1939			jan 1941			mrt 1942			nov 1944			feb 1945			feb 1946			jan 1948			dec 1		
40	MHW 1931/40			MHW 1931/40			MHW 1936/45			MHW 1936/45			MHW 1936/45			MHW 1936/45			MHW 1936/45			MHW 1936/45			MHW 194		
uur	cm	%	duur	cm	%	duur	cm	%	duur	cm	%	duur	cm	%	duur	cm	%	duur	cm	%	duur	cm	%	duur	cm	%	duur
	-141	-24		-156	-27		-219	-41		-151	-28	-							-227	-42	-	-109	-20	-	-203	-30	-85
	-46	-7		-65	-19		-48	-7		-72	-11	-	147	22	7	37	5	2	-130	-19	-	20	3	1	30	5	
	4	1	0 ⁵	-2	0		77	12	3	47	7	3 ⁵	192	30	9	78	12	4	-98	-15	-	160	25	4	42	7	54
	15	3	2 ⁵	11	2	1 ⁵	79	15	3	69	13	5	151	28	9	69	13	4	-81	-15	-	151	28	4	68	14	68
	64	12	6	71	13	7	95	17	4 ⁵	110	20	8	107	20	9	73	13	6 ⁵	45	8	5	122	22	5 ⁵	71	14	87
	63	15	6	68	16	9 ⁵	94	22	5 ⁵	107	25	6 ⁵	99	23	9 ⁵	61	14	6 ⁵	5	1	2 ⁵	114	26	7 ⁵	72	18	60
																											67
6	72	13	5	71	13	5	139	26	4 ⁵	147	27	7 ⁵	140	26	8	96	18	6 ⁵	15	3	2	172	32	9 ⁵	96	19	74
6 ⁵	96	15	8	80	13	10 ⁵	151	23	5 ⁵	164	25	8 ⁵	149	23	8 ⁵	145	22	9 ⁵	36	7	7	185	29	9 ⁵	93	15	80
7	97	18	8	89	16	10 ⁵	139	24	5 ⁵	158	28	8 ⁵	137	24	8	99	17	6	77	12	4	180	32	10	103	19	86
5	116	21	6 ⁵	102	18	6	159	27	7	150	25	6 ⁵	139	23	8	135	23	12 ⁵	94	16	7 ⁵	260	44	10	126	22	
5 ⁵	126	19	7 ⁵	116	17	7	164	23	7	163	23	7 ⁵	144	20	8	134	19	12	86	12	7	268	38	9	136	20	
7 ⁵	138	20	7 ⁵				182	25	7	178	25	8	150	21	8	142	20	12 ⁵	109	15	7 ⁵	293	41	9 ⁵	144	21	
				125	21	10 ⁵	134	22	7	143	23	8	125	20	7	124	20	12	110	18	8	218	36	9 ⁵	128	22	
6	118	19	7 ⁵	130	21	7 ⁵	143	22	7	153	24	8	167	26	8 ⁵	161	25	13 ⁵	181	28	9	300	47	11 ⁵	138	22	
7 ⁵	102	19	10	123	23	10 ⁵	136	24	6 ⁵	149	26	1 ⁵	124	22	7	114	20	12	125	22	9	228	40	10	123	17	
	119	23	8 ⁵	156	30	8 ⁵	136	26	5	156	30	7	125	24	7 ⁵	121	23	12	184	35	8	206	39	9 ⁵	126	14	
6 ⁵	117	23	8 ⁵	157	31	8 ⁵	117	22	6 ⁵	143	27	7 ⁵	121	23	8	124	24	11 ⁵	202	39	8 ⁵	188	36	10	107	12	
	-119	-15	-	183	24	9 ⁵	109	14	7	141	19	8	116	15	8 ⁵	118	16	12	133	18	7 ⁵	137	18	10 ⁵	107	15	
7	86	15	10	116	20	11	83	14	7	104	18	8 ⁵	93	16	10 ⁵	100	17	14	118	20	8 ⁵	128	22	11 ⁵	95	13	
?	47	10	2	36	8	1	138	28	7	-41	-8	-	86	18	5	39	8	3 ⁵	140	29	3 ⁵	301	62	7 ⁵	134	22	76
?	38	7	1	44	8	1	124	21	7	-41	-7	-	87	15	4 ⁵	51	9	4	137	24	3 ⁵	301	52	6	162	24	92
							215	-46	0 ⁵	-139	-30	-	-107	-23	-	-159	-34	-	115	25	?	10	2	0 ⁵	-114	-21	1
	9	2		29	6	8 ⁵	-47	-9	-	20	4	2 ⁵	-7	-1	-	-37	-7	-	165	33	12 ⁵	38	8	2	-52	-10	



Toelichting :

Met punten is aangegeven op welke datum ter plaatse van een bepaalde peilschaal de topstand is opgetreden. Indien sprake is van een zich voortplantende hoogwatergolf, zijn de punten verbonden door rechten. Bij golven die naiten t.o.v. elkaar, treedt een onderbreking op in de getrokken lijn. Horizontale gedeelten worden verklaard, doordat het hoogwater wel op dezelfde dag, maar niet op hetzelfde uur optrad.