

Reconstructie van het hoogwater in de Rijn van 1374 en de gevolgen voor de huidige situatie 18.000 m³/s: waan of werkelijkheid



W.E. van Doornik BSc.
april 2013

UNIVERSITEIT TWENTE.

MILIEU ■ RUIMTE ■ WATER



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Foto op titelpagina: Keulen tijdens het hoogwater van 2011 (BlackKisuX, 2011)
Opmerking: dit rapport is ontworpen om dubbelzijdig en in kleur te worden afgedrukt

Reconstructie van het hoogwater in de Rijn van 1374 en de gevolgen voor de huidige situatie

18.000 m³/s: waan of werkelijkheid

Afstudeerscriptie

Onderdeel van het behalen van de graad

MASTER OF SCIENCE

in

Civil Engineering and Management, Water Engineering & Management

Faculteit Construerende Technische Wetenschappen

Universiteit Twente, Enschede

26 april 2013

W.E. van Doornik BSc.

Water Engineering & Management

Universiteit Twente

w.e.vandoornik@alumnus.utwente.nl

Afstudeercommissie

Dr. Ir. D.C.M. Augustijn

D.C.M.Augustijn@utwente.nl

Universiteit Twente

Drs. F. Hoefsloot

F.Hoefsloot@cso.nl

CSO Adviesbureau

Dr. R.M.J. Schielen

Ralph.Schielen@rws.nl

Rijkswaterstaat & Universiteit Twente

Ir. T.A. Sprong

t.a.sprong@gmail.com

UNIVERSITEIT TWENTE.



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Samenvatting

Nederland is voor een groot gedeelte gelegen onder zeeniveau. Hierdoor ligt een watersnoodramp continu op de loer. Dit brengt met zich mee dat degelijk watermanagement van groot belang is voor Nederland. Dit is in het verleden al meerdere malen gebleken tijdens extreme perioden. Een belangrijk aspect van degelijk watermanagement is het gebruiken van juiste en realistische normen voor de waterkeringen. In Nederland worden voor deze normen maatgevende afvoeren opgesteld waartegen de waterkeringen bestand moeten zijn. De huidige maatgevende afvoer in Nederland is 16.000 m³/s. De commissie Veerman stelt echter dat deze norm verhoogd dient te worden naar 18.000 m³/s. Deze norm is onderhevig aan twijfels. De voornaamste twijfel is of een afvoer van 18.000 m³/s werkelijk voor kan komen met een herhalingsjijd van 1250 jaar.

Keulen is in 1374 getroffen door een zeer extreem hoogwater. Bij dit hoogwater was er sprake van dat de stadsmuren van Keulen geheel onder water stonden. Dit blijkt ook uit een watermarkering die gemaakt is in Keulen. Deze watermarkering geeft een waterdiepte van 13.30 meter aan. De stadsmuren overstroomden al vanaf een waterdiepte van ongeveer 12 meter. Aangenomen wordt dat als een afvoer van 18.000 m³/s werkelijk kan voorkomen, deze tijdens dit hoogwater mogelijk opgetreden is. Dit is direct de aanleiding van dit onderzoek. Ten eerste wordt er in dit onderzoek gefocust op welke afvoer er bij dit hoogwater nabij Keulen heeft gehoord, ten tweede welke afvoer er bij Lobith in 1374 is opgetreden en hoe een soortgelijk hoogwater in de tegenwoordige situatie zou verlopen. Dit onderzoek heeft als doel om de hoogwatergebeurtenis van 1374 te modelleren in Waqua om vervolgens de gevolgen van dit hoogwater in 1374 en de huidige situatie te analyseren. Hiermee wordt geprobeerd in te schatten of er ooit al een afvoer van 18.000 m³/s is opgetreden.

Voor het eerste onderdeel van het onderzoeksdoel is een aanzet gemaakt door Herget en Meurs (2009). Deze auteurs hebben een plaatselijke analyse gedaan van ditzelfde hoogwater bij Keulen. Hierbij is geen gebruik gemaakt van hydraulische modellen maar is er gebruikgemaakt van formules. Op deze wijze wordt één specifieke locatie langs de Rijn beschouwd. Dat onderzoek heeft geleid tot een geschatte afvoer die tussen 18.800 m³/s en 29.000 m³/s lag, waarbij de meest waarschijnlijke afvoer 23.800 m³/s was. In dit onderzoek is wel gewerkt met een (tweedimensionaal) hydraulisch model van de Niederrhein, dat loopt van Andernach tot Lobith. Door te werken met een hydraulisch model worden ook de invloeden van bovenstrooms en benedenstrooms meegenomen in de berekeningen van de afvoer ten tijde van het hoogwater. Hiermee wordt de hele omgeving van Keulen en langs de Niederrhein meegenomen in het bepalen van de afvoer. Hiervoor is eerst een reconstructie gemaakt van de loop van de Rijn in 1374. Dit is gedaan aan de hand van literatuuronderzoek. Vervolgens is de historische bodemhoogte gereconstrueerd. Hierin is onderscheid gemaakt tussen de verandering van de bodemhoogte in het zomerbed, het buitendijkse en binnendijkse gebied. De verandering van het zomerbed is gebaseerd op de verandering van de waterspiegel sinds 1908. Deze verandering is onderzocht door het CHR (1993). Omdat de sedimentatie voornamelijk vlak bij de rivier plaatsvindt is ervoor gekozen de sedimentatie enkel in het buitendijkse gebied mee te nemen. Aangenomen is dat er 60 centimeter verhoging is opgetreden sinds 1374 als gevolg van de sedimentatie. Deze aanname is gebaseerd op Brunotte et al. (1994). Voor de binnendijkse gebieden is aangenomen dat er geen significante veranderingen zijn opgetreden. Op basis van een kaart van de omgeving Keulen uit 1662 (Schwartz, 2005) is een inschatting gemaakt van het landgebruik en de percentages waarin deze voorkwamen. Deze

verdeling is vervolgens aangehouden voor het hele gebied langs Niederrhein. Het landgebruik is vervolgens gebruikt om ruwheden toe te kennen met behulp van de aanwezige ruwheden in Waqua.

Op basis van deze reconstructie is een basismodel ontworpen. Daarna zijn er variaties op al deze aannames ontworpen (wat betreft ruwheid, dijken en laterale toestromingen), waarmee verschillende scenario's van de historische situatie zijn gegenereerd.

Met behulp van deze verschillende scenario's zijn een aantal afvoeren bij Keulen berekend. Hiermee is de bandbreedte waarin de afvoer van 1374 heeft gelegen bepaald. Deze afvoer bleek tussen de 18.520 m³/s en 21.203 m³/s te liggen. De meest waarschijnlijke afvoer van het hoogwater in 1374 in Keulen is 19.497 m³/s. Uit deze resultaten bleek dat de ruwheidscenario's minder invloed hebben dan verwacht op grond van eerdere onderzoeken. Het bleek dat de invloed van dijken significant is op de afvoer. Deze verkregen resultaten verschillen met de resultaten die Herget en Meurs (2009) hebben gevonden. De meest waarschijnlijke verklaring voor deze verschillen zijn de keuzes die gemaakt zijn voor de verandering van de bodemhoogte en de dijsituatie.

Deze afvoer bij Keulen heeft in 1374 geleid tot een hoogwater en overstromingen langs de gehele Niederrhein. Dit leidt tot de vraag welke afvoer dit hoogwater bij Lobith heeft opgeleverd. Om dit te kunnen simuleren is er gebruikgemaakt van een afvoergolf die op het model gezet is. Omdat onbekend is wat de vorm van de hoogwatergolf is geweest, is er gebruikgemaakt van de standaardgolf die nu gebruikt wordt als invoer voor het deltamodel (Schielen, 2013). Deze is opgeschaald tot de hoogte van de gevonden afvoer bij Keulen in 1374 voor de bepaling van de bandbreedte. Er is voor gekozen om de afvoer behorende bij het basismodel, de laagste afvoer en de hoogste afvoer plus laterale toestromingen te gebruiken. Doordat er in het model na Wesel een versmalling aanwezig is in het model, waarbij de modelgrenzen op kleine afstand van de banddijken liggen, is ervoor gekozen om de afvoer bij Wesel te gebruiken om een inschatting te maken voor de afvoer bij Lobith in 1374. De afvoer bij Wesel blijkt tussen 17.882 m³/s en 22.080 m³/s gelegen te hebben. Hieruit blijkt dat het afhankelijk is van de scenariokeuze of er een afvoer hoger dan 18.000 m³/s Nederland aandoet in de onderzoeksresultaten. Belangrijk hierin is dat het onbekend is hoeveel water er door bijvoorbeeld de Oude IJssel is afgevoerd.

Om vervolgens de invloed van een soortgelijk hoogwater in de huidige situatie (situatie 2020) te kunnen inschatten, is het model zoals nu aanwezig aangepast aan de geplande dijkverhogingen tot 2020 evenals de geplande maatregelen (of al gerealiseerde maatregelen die nog niet in het model waren opgenomen) in het model opgenomen. Naast dijkversterkingen worden dijkverleggingen uitgevoerd en retentiegebieden aangelegd. Deze aanpassingen zijn gedimensioneerd gebaseerd op het Hochwasserschutzkonzept Nordrhein-Westfalen (MUNLV-NRW, 2006) en het Umweltbericht Nordrhein-Westfalen (MUNLV-NRW, 2009).

De gevolgen zijn vergelijkbaar met de afvoer bij Lobith in 1374 berekend met behulp van een opgeschaalde afvoergolf. Uit de resultaten blijkt dat er mogelijk afvoeren hoger dan 18.000 m³/s optreden bij Keulen en Wesel. De gesimuleerde afvoeren in de situatie 2020 zijn gepresenteerd in tabel 1.

Tabel 1: Afvoeren bij Keulen en Wesel in de huidige situatie (situatie 2020)

	Laagste afvoer Keulen 1374 [m ³ /s]	Hoogste afvoer + lateralen Keulen 1374 [m ³ /s]
Keulen (2020)	18.381	20.897
Wesel (2020)	16.672	20.719

De afvoeren bij Keulen variëren van 18.381 m³/s tot 20.897 m³/s. Bij Keulen wordt de grens van 18.000 m³/s in alle scenario's overschreden. Voor Wesel geldt dat deze grens niet wordt overschreden in het minst extreme scenario.

Deze extreme afvoeren resulteren eveneens in extreme overstromingen. Uit de analyse blijkt dat Keulen voor een gedeelte overstroomt, waarbij waterdieptes van enkele meters optreden. Binnen een week zijn er in de omgeving van Keulen grote gebieden overstroomd langs de Rijn. Dit geldt voor zowel het meest en het minst extreme scenario. Ook op het traject Wesel-Lobith treden in het meest extreme scenario grootschalige overstromingen op. Na een week start een reeks van dijken die overstromen op dit traject. Onder andere Wesel krijgt te maken met overstromingen, deze treden op vanaf een afvoer van 17.330 m³/s. Ook Rees, Emmerich en Lobith krijgen te maken met overstromende dijken. De bijbehorende afvoeren in het meest extreme scenario zijn 17.482 m³/s, 17.365 m³/s en 17.200 m³/s. De dijken blijken dan ook niet bestand tegen 18.000 m³/s. Ook is er sprake van overstromingen in de binnendijkse gebieden tussen steden in. Deze gebieden krijgen te maken met overstromingen met een waterdiepte van gemiddeld circa 5 meter. Dit geldt voor binnendijkse gebieden aan beide zijden van de Rijn. Het contrast tussen de gevolgen van het hiervoor beschreven meest extreme scenario en het minst extreme scenario zijn groot. In het minst extreme scenario is er alleen sprake van overstromingen in Emmerich. De overstromingen die hier plaatsvinden resulteren in waterdieptes die variëren van één tot twee meter.

Het is waarschijnlijk dat een afvoer van 18.000 m³/s in de afgelopen 1250 is voorgekomen. Of deze afvoer ook Lobith heeft bereikt is onzeker. In de huidige situatie zal de afvoer bij Keulen groter moeten zijn dan 18.000 m³/s om bij Lobith een afvoer van 18.000 m³/s te genereren. Dit komt omdat in het tussengebied de dijken overstromen.

Summary

As a major part of the Netherlands is below sea level the risk of flooding is always present. This explains the major role of water management in The Netherlands. The importance of proper water management was made very clear during previous periods of extreme weather. An important aspect of proper water management is the use of appropriate safety levels for dikes. In order to determine these safety levels design discharges are used. For The Netherlands a design discharge of 16.000 m³/s is used. The commission Veerman suggests that this design discharge should be increased to 18.000 m³/s. However, there are doubts with regard to this safety level. Thereby the main concern is, whether or not, this design discharge of 18.000 m³/s can actually occur.

Earlier research pointed out that in 1374 an extreme flood occurred in the city of Cologne. During this flood even the city walls were flooded as stated by a water mark on a building in Cologne which is above the city walls. These city walls were inundated by a water level of 12 meter, while the water level was 13.30 meter during this event. Due to this water level it is presumed that it is possible that the discharge corresponding to this event was even larger than the future design discharge in The Netherlands (18.000 m³/s). This presumption is the motive for this research. First, it is important to determine how large the discharge of this event really was. Secondly, it is interesting what the consequences were of that flood at Lobith. In other words, what discharge did reach Lobith in 1374 and lastly what would be the consequences if a similar event would occur today. The aim of this research is to model the flood of 1374 with Waqua and to analyze the consequences of this flood in 1374 as well as in the present situation.

A first attempt was made recently by Herget and Meurs (2009). These authors made a very local analysis of this event at Cologne. The result of this research was that the actual discharge of the event was estimated between 18.800 m³/s and 29.000 m³/s, with a most probable discharge of 23.800 m³/s. The present study uses a (two-dimensional) hydraulic model of the Niederrhein which reaches from Andernach to Lobith. By using a hydraulic model it is possible to take into account the effects of the situation more up- and downstream, as these effects could affect the simulated discharge. In this hydraulic model the surroundings of the Rhine are incorporated.

First, a reconstruction of the Rhine is made for the situation 1374, including the former river path of the Rhine. The reconstruction was based on literature research. The next step in reconstruction was to determine the historical elevation. In order to do this as realistic as possible, a difference was made between the river bed, flood plain area between and behind the dikes. The elevation change of the river bed was based on the change of water level since 1908, which was researched by the CHR (1993). As sedimentation mostly occurred on the banks close to the river, it is assumed to only take into account the sedimentation that takes place at the area outside of the dikes. Thereby it was assumed that 60 centimeter of sedimentation occurred since 1374. Based on an earlier study of Brunotte et al. (1994) it was assumed that no significant change in elevation occurred in the area behind the dikes. The land use around the historical Rhine is based on an early map of Cologne from 1662 (Schwartz, 2005). Based on this landuse a corresponding roughness was chosen in Waqua. This roughness pattern is interpolated throughout the entire Rhine model. Using all this historical information a hydraulic model is derived.

Besides the assumptions regarding to the roughness, also the assumptions were made regarding the height of dikes in their current position and lateral inflow. After designing a base model different scenarios were composed using different assumptions for roughness, dikes and lateral inflow. By using these different scenarios, multiple discharges at Cologne were calculated. Using these different discharges the range of the actual discharge at Cologne of 1374 is calculated. These discharges are calculated using uniform discharges. The range for the discharge was found between 18.520 m³/s and 21.203 m³/s. The most probable discharge was estimated to be 19.497 m³/s. These results pointed out that the roughness is less significant than assumed while the influence of the dikes was larger.

These results differ from earlier results of Herget and Meurs (2009). The most obvious explanation therefore is that different assumptions were made in these studies regarding the elevation and dikes.

The flood at Cologne in 1374 did cause severe issues along the whole Niederrhein. This results in the question what discharge did occur at Lobith in 1374. In order to be able to simulate these discharges it is necessary to simulate a surge. As the shape of the wave is unknown a scaled up version of the so-called standard wave is used. This wave is regularly used as input for the delta model (Schielen, 2013). In order to determine the range of the actual discharge at Lobith, several discharges are used. Thereby is chosen to use the lowest and highest discharge including lateral inflow. Due to the fact that downstream of Wesel a bottleneck is present, in the model is chosen to use the discharge at Wesel as representative for the discharge at Lobith. The results showed that the discharge at Wesel was in the range between 17.882 m³/s and 22.080 m³/s during this event in 1374. These results state that, whether or not, the 18.000 m³/s is reached in this research depends on which scenario is used. Thereby an important note is that it is unknown how large the discharge of for instance the Oude IJssel is.

The next step in this research was to determine the consequences of a comparable event in the present situation, situation 2020. In order to be able to do this, the model is modified with the planned measures that should be carried out and with measures that were not incorporated into the model. These measures include dike reinforcements, dike replacements and retention measures. These measures are designed according to Hochwasserschutzkonzept Nordrhein-Westfalen (MUNLV-NRW, 2006) and Umweltbericht Nordrhein-Westfalen (MUNLV-NRW, 2009).

The consequences are comparable with the discharge at Lobith in 1374. The results state that discharges higher than 18.000 m³/s are possible at Cologne and Wesel. The simulated discharge for the situation 2020 is presented in tabel 2.

Tabel 2: Discharges at Cologne and Wesel at the present situation (situation 2020)

	Lowest discharge Cologne 1374 [m³/s]	Highest discharge including lateral inflow Cologne 1374 [m³/s]
Cologne (2020)	18.381	20.897
Wesel (2020)	16.672	20.719

The discharges at Cologne are between 18.381 and 20.897 m³/s. At Cologne the discharge exceeds 18.000 m³/s for all scenarios. However, at Wesel the discharge does not exceed 18.000 m³/s in the least extreme scenario.

Such extreme discharges also results in extreme flooding. The analysis shows that Cologne partly floods, with water depths of several meters. Within a week major parts of the surroundings of Cologne and areas along the Rhine are flooded. This is the case in the most and the least extreme scenario. On the route Wesel-Lobith also severe floods occur with the most extreme scenario. On this route the dikes are flooding from day seven. This is the start of a chain of flooding dikes. Wesel, Rees, Emmerich and the surrounding of Lobith are confronted with floods. The corresponding discharges are 17.330 m³/s, 17.482 m³/s, 17.365 m³/s and 17.200 m³/s. Also the areas between these places are flooded. These areas are faced with water depths of about five meter. This is the case for both sides of the Rhine. There is a large difference between the floods in the most and least extreme scenario. In the least extreme scenario only Emmerich is flooded. These floods result in water depths in the range between one and two meters.

Based on the present research it can be stated that a discharge of 18.000 m³/s at Lobith is far more realistic as many think. This conclusion is even strengthened when the predicted effects of global warming are taken into account.

It is probable that a discharge of 18.000 m³/s has occurred in the past 1250 years. Whether this discharge did reach Lobith is uncertain. In order to reach a discharge at Lobith of 18.000 m³/s in the present situation the discharge at Cologne needs to be higher than 18.000 m³/s. This is due to flooding in the area between Andernach and Lobith.

Voorwoord

Voor u ligt het rapport wat tot stand is gekomen tijdens mijn afstudeerperiode. De periode was de afsluiting van mijn studie en studententijd, die ik beide met veel plezier heb doorlopen. Het resultaat van deze afsluitende periode was nooit ditzelfde rapport geworden zonder de hulp van vele personen. Deze personen wil ik dan ook bedanken.

Als eerste bedank ik Ralph Schielen voor het zoeken naar een geschikt adviesbureau waar ik mijn afstuderen kon verrichten en voor de kritische vragen en opmerkingen die je bij de tussenproducten gaf. Ze hebben me soms tot wanhoop gedreven, maar ook hebben ze bijgedragen aan de verbetering van dit onderzoek en rapport. Denie Augustijn, bedankt voor de kritische houding naar mijn werk, ook dit heeft het onderzoek goed gedaan. Daarnaast wil ik je bedanken voor het bewaken van de afbakening van dit onderzoek. Het bleek dat we tijdens overleggen over dit onderzoek nooit uitgepraat raakten en dat er vragen bleven ontstaan. Hier heb je echter ook altijd mijn eigen belang in laten meewegen. Frans Hoefsloot, bedankt voor de dagelijkse begeleiding vanuit CSO. Ondanks dat je soms erg druk was, kon ik altijd je kamer inlopen voor vragen. De antwoorden die je vervolgens op deze vragen gaf, waren erg nuttig en hebben het onderzoek ook goed gedaan. Bedankt Ton Sprong voor de gegeven input over onderzoeksaspecten waar ik geen kennis over had, maar waar jij in de loop der jaren wel kennis over hebt vergaard en deze met mij hebt gedeeld.

Ook zonder Koen Volleberg en Daniël van Putten was dit onderzoek niet tot dit stadium gekomen. Ik wil jullie bedanken voor de hulp die jullie hebben gegeven met het oplossen van problemen met Waqua. Op sommige momenten wist ik echt niet hoe ik bepaalde problemen op kon lossen, maar dankzij jullie hulp is dit toch iedere keer gelukt. Ook bedank ik mijn kamergenoten Vincent Udo, Jorn Ogink, Remko Hoendervoogd en Jasper Schuur voor de fijne tijd waar jullie aan hebben bijgedragen. De gesprekken en ontspannende momenten hebben zeer zeker bijgedragen aan het goede gevoel waarmee ik terugkijk op mijn afstudeerperiode bij CSO.

Verder wil ik al mijn (studie)vrienden bedanken voor het aanhoren van alle verhalen over mijn onderzoek en voor de leuke momenten waardoor de tijd voorbij gevlogen is. Als laatste maar zeker niet als minste wil ik mijn ouders en zus bedanken. Pap, mam ik wil jullie bedanken voor alle liefde, steun en stimulansen die jullie mij gegeven hebben. Zonder jullie was ik nooit zo ver gekomen. Wilma, helaas moeten we je inmiddels missen in ons leven, ook jij hebt hieraan bijgedragen. Ook zonder jou was ik nooit tot dit punt gekomen, je hebt altijd in me geloofd, me gesteund en me de relativiteit van mijn “problemen” in laten zien.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	18
1.1	Aanleiding	18
1.2	Doelstelling en onderzoeksvragen	19
1.3	Onderzoeksmethode	20
1.4	Leeswijzer	20
2	Systeembeschrijving	21
3	Modelbeschrijving	24
3.1	Baseline	24
3.2	Waqua	24
3.3	Rekenrooster	25
3.4	Gebruikt referentieniveau	25
3.5	De modellering van het systeem	26
4	Historische hoogwaters in de Rijn	29
5	Reconstructie van de historische Rijnloop	32
5.1	Werkwijze bij de bepaling van de historische loop	32
5.2	De historische loop	32
5.3	Modellering historische loop	35
5.4	Modellering historische bodemhoogte	36
6	Ruwheden van de historische Rijn	39
6.1	Bepaling en modellering van de historische ruwheden	39
7	Scenario's	41
7.1	Scenario's historische ruwheden	41
7.2	Scenario's historische dijkligging	44
7.3	Scenario's laterale instroompunten	45
7.4	Gesimuleerde scenario's	46
8	Afvoer van de Rijn nabij Keulen in 1374	47
8.1	Werkwijze en aannames	47
8.2	Resultaten	47
9	Afvoer bij Lobith in 1374	49
9.1	Werkwijze, randvoorwaarden en aannames	49
9.2	Afvoerresultaten	50
10	De Niederrhein in 2020	52

10.1	Vernieuwde maatgevende afvoeren	52
10.2	Maatregelen tot 2020 langs de Niederrhein	53
11	De gevolgen van het hoogwater 1374 in de huidige situatie	54
11.1	Werkwijze en aannames	54
11.2	Afvoerresultaten.....	55
11.3	Overstromingsresultaten	57
11.3.1	Overstromingen in de omgeving van Keulen	57
11.3.2	Overstromingen op het traject Wesel-Lobith	61
12	Discussie	63
12.1	Aannames en keuzes	63
12.2	Vergelijking van dit onderzoek met dat van Herget en Meurs (2009).....	65
12.3	Vergelijking van dit onderzoek en de Niederrhein studie	67
13	Conclusies en aanbevelingen.....	69
13.1	Conclusies	69
13.2	Aanbevelingen.....	71
14	Referenties.....	72
	Bijlage A.....	76
	Bijlage B	78
	Bijlage C.....	79
14.1.1	Keulen.....	79
14.1.2	Dormagen	80
14.1.3	Düsseldorf.....	83
14.1.4	Duisburg	85
14.1.5	Dinslaken/Rheinberg	87
14.1.6	Wesel	89
14.1.7	Xanten	89
14.1.8	Rees	90
14.1.9	Lobith.....	91
	Bijlage D.....	93
	Bijlage E	94
	Bijlage F	99
	Bijlage G.....	105

Lijst van figuren

Figuur 1: Stroomgebied van de Rijn	21
Figuur 2: Looptijd tot aan Lobith	22
Figuur 3: Staggered rekenrooster	25
Figuur 4: Modelgrenzen en het onderliggende bodemhoogtemodel.....	27
Figuur 5: De QH-relatie bij de Pannerdensche kop	28
Figuur 6: De vermoedelijke ligging van de Rijn in 1374 ten opzichte van de huidige loop.....	34
Figuur 7: Voorbeelden dwarsdoorsneden historische Rijn	35
Figuur 8: Het aanmaken en aansluiten van rivierassen en normaallijnen	36
Figuur 9: Het buitendijkse gebied binnen de modelgrenzen	37
Figuur 10: Waterspiegeldaling vanaf 1908 van Koblenz tot Emmerich	38
Figuur 11: Benodigde bodemverhoging voor de zomerbedreconstructie.....	38
Figuur 12: Landgebruik bij Keulen in 1662	39
Figuur 13: Uitsnede random ruwheidsscenario	42
Figuur 14: Op hoogte gebaseerd ruwheidsscenario	42
Figuur 15: De doorsnijding van dijken.....	44
Figuur 16: Gebruikte afvoergolven voor de simulaties huidige situatie	49
Figuur 17: Verplaatsing van de afvoergolf door de Rijn in het basismodel met rechts een uitsnede van de piekafvoeren.....	51
Figuur 18: Verplaatsing van de afvoergolf door de Rijn in het scenario met de hoogste afvoer plus lateralen met rechts een uitsnede van de piekafvoeren	51
Figuur 19: Gebruikte afvoergolven voor de simulaties huidige situatie	54
Figuur 20: Afvoer bij Keulen in de situatie 2020	55
Figuur 21: Afvoer bij Wesel in de situatie 2020	55
Figuur 22: Verplaatsing van de afvoergolf in de huidige situatie met rechts een uitsnede van de piekafvoeren.....	56
Figuur 23: Voorgang van de afvoergolf in de huidige situatie in het geval met de hoogste afvoer plus lateralen uit 1374 met rechts een uitsnede van de piekafvoeren	56
Figuur 24: Waterdiepte in Keulen in het meest extreme geval (linker figuur) en het minst extreme geval (rechterfiguur).....	58
Figuur 25: Keulen tijdens een piekafvoer vergelijkbaar met de hoogste afvoer 1374	59
Figuur 26: Keulen tijdens een piekafvoer vergelijkbaar met de laagste afvoer 1374	60
Figuur 27: Overstromingen in de situatie 2020 op het traject Wesel-Lobith tijdens het extreemste scenario	61
Figuur 28: Dwarsprofielen zoals gebruikt in het onderzoek van Herget & Meurs (2009) en dit onderzoek.....	65
Figuur 29: Waterlaag = waterdiepte + waterhoogte	77
Figuur 30: Vermoedelijke loop van de Rijn tussen Dormagen en Urdenbach	80
Figuur 31: Mogelijke loop van de Rijn tussen Dormagen en Urdenbach in 1374.....	81
Figuur 32: Rivierloop van Monheim tot Düsseldorf	82
Figuur 33: De Rijn nabij Neuß.....	83
Figuur 34: Rijnloop tussen Düsseldorf en Kaiserswerth.....	84
Figuur 35: Rijnloop bij Mündelheim rond het jaar 1300	85

Figuur 36: De Rijn bij Duisburg van de eerste tot de 20e eeuw	86
Figuur 37: De Rijn bij Duisburg	86
Figuur 38: Vermoedelijke loop van de Rijn nabij Rheinberg	87
Figuur 39: Vermoedelijke loop van de Rijn bij Rheinberg	88
Figuur 40: De vermoedelijke Rijnloop nabij Wesel in 1374	89
Figuur 41: De loop van de Rijn nabij Rees	90
Figuur 42: De Rijnloop nabij Emmerich door de tijd heen	91
Figuur 43: De geschatte loop van de Rijn van 1400 tot nu	92
Figuur 44: Bepaling relatieve hoogte ten behoeve van de ruwheidsscenario's	93
Figuur 45: Dijkversterkingen langs de Rijn tot 2020.....	94
Figuur 46: Retentiegebied Worringer Bruch	95
Figuur 47: Retentiegebied Ilvericher Bruch.....	96
Figuur 48: Dijkverlegging Mündelheim	97
Figuur 49: Dijkverlegging Lohrward.....	98
Figuur 50: Schaalbalk figuren	99
Figuur 51: Tijdlijn van de overstromingen in omgeving Keulen met het meest extreme scenario in de situatie 2020.....	101
Figuur 52: Tijdlijn van de overstromingen in omgeving Keulen met het minst extreme scenario in de situatie 2020.....	104
Figuur 53: Overstromingen in de situatie 2020 op het traject Wesel-Lobith tijdens het extreemste scenario	105
Figuur 54: Overstromingen in de situatie 2020 op het traject Wesel-Lobith tijdens het minst extreme scenario	106

Lijst van tabellen

Tabel 1: Afvoeren bij Keulen en Wesel in de huidige situatie (situatie 2020)	6
Tabel 2: Discharges at Cologne and Wesel at the present situation (situation 2020)	9
Tabel 3: Belangrijke zijrivieren van de Rijn.....	22
Tabel 4: De maatgevende afvoeren van de Niederrhein tot 2003.....	23
Tabel 5: Tijdlijn van historische hoogwaters bij Keulen.....	29
Tabel 6: Percentages van verschillende soorten landgebruik bij Keulen in 1662.....	40
Tabel 7: Random scenario	41
Tabel 8: Scenario's gebaseerd op relatieve hoogte	43
Tabel 9: Dijkscenario's.....	44
Tabel 10: Scenario's laterale punten	45
Tabel 11: Resultaten bij Keulen.....	47
Tabel 12: Piekafvoer bij Wesel en Lobith in de situatie 1374	50
Tabel 13: Maatgevende afvoeren van de Rijn, geplande toestand 2020.....	52
Tabel 14: Resultaten in de huidige situatie	55
Tabel 15: Vergelijking van de bandbreedte van afvoeren in 1374 en in de huidige situatie	57
Tabel 16 : Afvoeren, in m ³ /s, waarbij de dijken overstromen	62

1 Inleiding

In 1374 heeft een historisch hoogwater plaatsgehad nabij Keulen. Dit hoogwater is waarschijnlijk een van de hoogste afvoeren van de Rijn ooit, zo blijkt uit gegevens. In Nederland wordt tegenwoordig rekening gehouden met een maatgevende afvoer van 18.000 m³/s bij Lobith voor de rivieren. Op de ontwikkeling van deze maatgevende afvoer wordt later in deze paragraaf ingegaan. Het is onbekend of een afvoer van meer dan 18.000 m³/s ooit al heeft plaatsgevonden. Om dit te onderzoeken wordt dit hoogwater verder onderzocht, om erachter te komen of deze grens van 18.000 m³/s in het verleden al is overschreden. Deze inleiding beschrijft de aanleiding en achtergrond van het onderzoek gevolgd door de doelstelling, onderzoeksvragen en –methode. Tot slot volgt de leeswijzer.

1.1 Aanleiding

Een groot gedeelte van Nederland is gelegen onder zeeniveau. Dit brengt een groot belang voor degelijk watermanagement met zich mee. Dit belang werd duidelijk in 1953 tijdens de grote watersnoodramp. Deze ramp voedde de twijfels die er waren betreffende de veiligheid van de dijken die ons land beschermen tegen het water en welke normen er gehanteerd moesten worden voor de rivierdijken. De toenmalige minister van Verkeer en Waterstaat (mr. J. Algera; minister van 1952 tot 1958) wist ook niet welke norm er gehanteerd moest worden bij het vaststellen van de hoogte van de rivierdijken. Daarom nam hij in 1956 flink wat slagen om de arm. Als uitgegaan werd van een Rijnafvoer van 18.000 m³/s was het in ieder geval veilig genoeg. De minister stelde wel dat dit uitgangspunt mogelijk te hoog gegrepen was vanuit de financiën geredeneerd. Daarnaast was het de vraag of de consequenties vooraf volledig waren te overzien en dat daarom enige soepelheid en praktisch inzicht gehanteerd diende te worden bij de toepassing van deze norm. Met deze kanttekeningen in het achterhoofd werd de ontwerpafvoer van 18.000 m³/s vastgesteld. Deze ontwerpafvoer werd vastgesteld voor een herhalingstijd van eens in de 3000 jaar (Van Heezik, 2006).

De waterkerende werken in Nederland waren echter niet berekend op deze ontwerpafvoer, dijkverzwaringen waren nodig. De dijkverzwaringen stuitten echter op de nodige tegenstand vanuit de samenleving. Er ontstonden twee partijen, de dijkverzwaarders en de behouders van landschappelijke, natuurlijke en cultuurhistorische waarden die tegen opoffering van land voor dijken waren. Dit is de reden dat er in de loop der tijd verschillende commissies in het leven zijn geroepen om te onderzoeken of de normen juist waren opgesteld en dus deze dijkverzwaringen echt noodzakelijk waren. Voorbeelden hiervan zijn de commissies Becht in 1975 en de commissie Boertien in 1992. Dit resulteerde in 1993 tot een aanpassing van de ontwerpafvoer naar 15.000 m³/s (Van Heezik, 2006; Silva, 2001; 2002). Daarna volgden de hoogwaters van 1993 en 1995, waarbij wederom aan het licht kwam dat er nog voldoende verbetering mogelijk was aan de waterveiligheid in Nederland. Er werd definitief afgestapt van de traditionele benadering van de hoogwaterbescherming. Dijkverhoging werd niet langer als eerste mogelijkheid gezien om structurele bescherming te bieden tegen het water. Naar aanleiding van deze hoogwaters werd de ontwerpafvoer echter wel verhoogd naar 16.000 m³/s (Van Heezik, 2006).

Om de veiligheid en duurzaamheid van Nederland op de lange termijn te kunnen waarborgen werd vervolgens in 2007 de Deltacommissie onder leiding van Prof. Dr. C.P. Veerman opgericht. Deze commissie kreeg als taak om een advies uit te brengen hoe Nederland waterveilig blijft met het oog op de klimaatveranderingen en hoe Nederland een aantrekkelijke plaats is en blijft om te leven. De conclusie van deze commissie luidde dat de ontwerpafvoer bijgesteld dient te worden naar 18.000

m³/s voor het jaar 2100. In dit advies is ook rekening gehouden met de klimaatverandering. Geadviseerd wordt bij de uitvoering van maatregelen efficiënt gebruik te maken van water, energie en andere grondstoffen, zodat de kwaliteit van de leefomgeving niet achteruitgaat maar vooruitgaat (Deltacommissie 2008, 2008). Deze waarde voor de ontwerpafvoer heeft echter, net als in het verleden, de nodige scepsis en twijfels opgeroepen. De sceptici twijfelen of deze 18.000 m³/s überhaupt op kan treden en als deze al optreedt of deze dan Lobith zal bereiken, gezien de dijkhoogten in Duitsland. De dijken in Duitsland worden met een ander veiligheidsniveau ontworpen waardoor de ontwerpafvoer lager is dan in Nederland, echter wordt er in Duitsland wel een hogere waakhoogte (een meter) gehanteerd dan in Nederland (een halve meter). Daarnaast wordt in Duitsland een dijkversterkingsprogramma uitgevoerd. Dit programma moet in 2020 gereed zijn.

De getrokken conclusies en verkregen kennis zijn belangrijk in relatie tot het waterbeleid in Nederland. Vooral de vraag of een afvoer van 18.000 m³/s bij Lobith eens in 1250 jaar kan voorkomen of al is voorgekomen zal centraal staan.

Zoals ook genoemd in het begin van dit hoofdstuk is het hoogwater van 1374 een van de hoogste uit het afgelopen millennium is geweest. In deze periode is er ook sprake van hoogwater op de Schelde, IJssel en de Maas. Dit heeft geleid tot overstromingen in Nederland en België (Buisman, 1996). Daarom wordt onderzocht of het aannemelijk is dat de afvoer in dat jaar groter was dan 18.000 m³/s en of dit resulteerde in een afvoer van 18.000 m³/s bij Lobith. Wanneer uit het onderzoek blijkt dat dit het geval is geweest, kan dit worden gezien als verdere onderbouwing voor de conclusies van de commissie Veerman. De conclusie dat Nederland zich moet voorbereiden op een afvoer van 18.000 m³/s blijkt dan realistischer dan velen denken.

1.2 Doelstelling en onderzoeksvragen

Het onderzoeksdoel is als volgt gedefinieerd:

Het modelleren in Waqua van de hoogwatergebeurtenis van 1374 die zorgde voor veel wateroverlast in Keulen en het onderzoeken van de (mogelijke) overstromingen van dit hoogwater in de huidige situatie in Noordrijn-Westfalen (Duitsland) en bij Lobith (Nederland).

De drie hoofdvragen die dit onderzoek kenmerken zijn de volgende:

1. Wat was de afvoer van de Rijn bij Keulen tijdens het hoogwater in 1374 en wat is de onzekerheid hierin?
2. Welke afvoer is er opgetreden in Lobith als gevolg van het hoogwater bij Keulen in 1374?
3. Hoe verloopt een vergelijkbare afvoer van Keulen naar Nederland onder de huidige omstandigheden en treden er overstromingen op in Noordrijn-Westfalen en Nederland?

De eerste onderzoeksvraag zal dienen om te bepalen wat de afvoer bij Keulen was in 1374 en of deze de grens van 18.000 m³/s heeft overschreden. De tweede onderzoeksvraag duidt op de gevolgen van dit hoogwater in de huidige situatie. Centraal staat of de afvoergrens van 18.000 m³/s bij Lobith overschreden kan worden en treden er overstromingen op als gevolg van dit hoogwater. Bij de laatste onderzoeksvraag staat centraal of er al ooit een afvoer van 18.000 m³/s bij Lobith is geweest. Dit ook met het oog op de herhalingstijd van 1/1250 jaar die aan deze maatgevende afvoer is gekoppeld.

1.3 Onderzoeksmethode

Dit onderzoek is een historisch onderzoek gecombineerd met een modelstudie. Door middel van historisch onderzoek is de historische situatie uit 1374 van de Rijn achterhaald en vervolgens zijn de in de tijd opgetreden wijzigingen (bodemhoogtes, dijken, ruwheden, bebouwing en laterale punten) zo goed mogelijk veranderd in het huidige model (dat loopt van Andernach tot Lobith). Dit model wordt gesimuleerd met het tweedimensionale rekenprogramma Waqua.

Bij de simulaties zijn verschillende scenario's doorgerekend wat betreft de dijken, ruwheden en laterale punten in het model. Op basis van dit model zijn de historische afvoeren bij Keulen en Lobith gesimuleerd. Hiermee zijn de eerste en derde onderzoeksvraag beantwoord.

Vervolgens is de historische afvoer uit 1374 gebruikt als randvoorwaarde aan de bovenrand van het model dat de huidige situatie beschrijft. De huidige situatie wordt aangenomen als de situatie in 2020. Op basis van de uitkomsten van deze simulatie is de tweede onderzoeksvraag beantwoord. Uiteindelijk zullen op basis van deze simulaties conclusies worden getrokken over de haalbaarheid van een piekafvoer van 18.000 m³/s bij Lobith en over overstromingen in Noordrijn-Westfalen als gevolg van deze piekafvoer en de onzekerheid in deze resultaten.

1.4 Leeswijzer

Dit onderzoeksrapport is als volgt opgebouwd. In hoofdstuk 2 is het Rijnsysteem beschreven. Hierin wordt algemene informatie over de Rijn en zijn stroomgebied gegeven en er wordt kort ingegaan op de manier waarop in Duitsland in het verleden werd omgegaan met hoogwaterbescherming. Hoofdstuk 3 beschrijft de achtergronden van de gebruikte softwarepakketten (Baseline en Waqua), waarmee het model is gemaakt en de berekeningen zijn uitgevoerd en beschrijft de gebruikte schematisatie van het gebied. Hoofdstuk 4 schetst een bredere context van de meest extreme (bekende) hoogwaters bij Keulen in de geschiedenis. Vervolgens wordt in hoofdstuk 5 de gehele reconstructie van de historische Rijn uit de doeken gedaan. Dit hoofdstuk zal ingaan op zowel de reconstructie van de loop van de Rijn evenals op de modellering van deze loop en de reconstructie van het historische bodemmodel. Na deze reconstructie wordt er in hoofdstuk 6 ingegaan op de reconstructie van de historische ruwheden, die gerelateerd zijn aan het landgebruik in de middeleeuwen. Omdat onbekend is hoe de situatie in 1374 exact was, wordt er gewerkt met scenario's. Deze worden in hoofdstuk 7 beschreven. Hoofdstuk 8 en 9 beschrijven vervolgens de afvoer die dit hoogwater in Keulen respectievelijk Lobith in 1374 hebben veroorzaakt. Hierbij wordt ook ingegaan op de bandbreedte van onzekerheid die bij deze afvoer behoort. Vervolgens wordt de stap naar de toekomst gemaakt. In hoofdstuk 10 wordt beschreven hoe de Rijn wordt voorbereid op hogere afvoeren in de toekomst. De gevolgen van deze maatregelen op de afvoer bij een hoogwater gelijk aan dat van 1374 worden beschreven in hoofdstuk 11. Vervolgens wordt er in hoofdstuk 12 stilgestaan bij discussiepunten die zijn ontstaan bij dit onderzoek aangaande de resultaten. Tot slot staan in hoofdstuk 13 de conclusies en aanbevelingen genoemd.

2 Systeembeschrijving

De Rijn is een van de grootste rivieren in Europa (Frechen et al., 2010). Het stroomgebied beslaat een oppervlakte van ongeveer 185.000 km² en strekt zich uit over een lengte van ongeveer 1250 km van de Alpen tot de Noordzee (CHR/KHR, 1993).

De Rijn kan worden onderverdeeld in vijf secties (figuur 1). De Rijn heet vanaf de bron tot aan de Bodensee de Alpenrijn (Alpenrhein). Vanaf de Bodensee tot aan Basel wordt de rivier de Hoogrijn (Hochrhein) genoemd, om vervolgens van Basel tot Mainz door te gaan onder de naam Bovenrijn (Oberrhein). Van Mainz tot aan Bonn heeft de rivier de naam Middenrijn (Mittelrhein). Tussen Bonn en de Nederlandse grens wordt de rivier de Nederrijn (Niederrhein) genoemd. Deze riviersectie zal centraal staan in dit onderzoek. Tot slot heet de Rijn in Nederland de Bovenrijn tot de Rijn zich splitst in het Pannerdensch Kanaal (die zich ook weer splitst in de Nederrijn en de IJssel) en de Waal (Lorenz, 1997; De Molenaar, 2012). Deze naamgeving kan verwarring opleveren, omdat er meerdere secties dezelfde naam dragen.



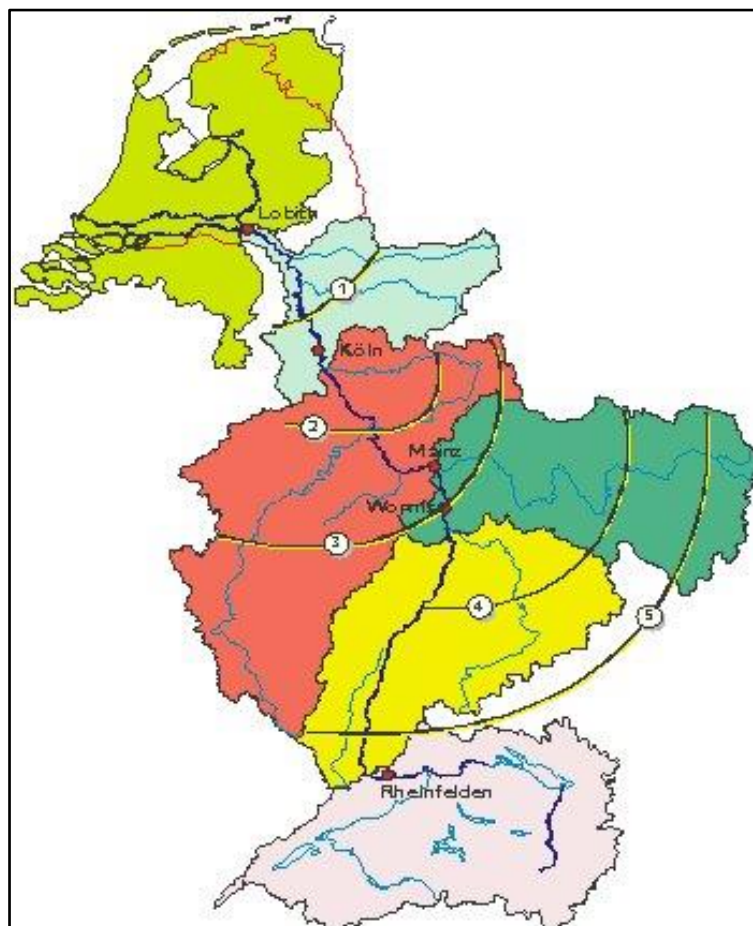
Figuur 1: Stroomgebied van de Rijn (Ullrich, 2011)

De alpenrivieren worden gedomineerd door smeltwater, met een duidelijk maximum van de afvoer in de zomer. Dit wordt bepaald door de hoeveelheid water die in de winter opgeslagen wordt in de vorm van sneeuw en ijs. Dit water komt pas tot afstroming na het smelten in het voorjaar en zomer.

Naast het smeltwater in de Alpen wordt de rivier ook gevoed met regenwater uit het stroomgebied via de zijrivieren. De belangrijkste zijrivieren van de Rijn worden met enkele kengetallen weergegeven in tabel 3. Dit water komt in enkele dagen van de bron tot bij Lobith. Dit is weergegeven in figuur 2. De cirkelbogen in deze figuur geven de looptijd in dagen aan tot Lobith. De kleuren geven de verschillende deelstroomgebieden aan.

Tabel 3: Belangrijke zijrivieren van de Rijn (Eberle et al., 2004); A: oppervlakte stroomgebied tot meetstation; MQ: Gemiddelde afvoer in referentieperiode; MHQ: Gemiddelde jaarmaxima in referentieperiode; HQ: Maximale afvoer in referentieperiode

Rivier	Station	A [km ²]	MQ [m ³ /s]	MHQ [m ³ /s]	HQ [m ³ /s]	Referentie periode
Neckar	Rockenau	12710	135	1180	2690	1951-1999
Main	Frankfurt	24764	190	941	2010	1966-1998
Nahe	Grolsheim	4013	31.2	457	1000	1973-1998
Lahn	Kalkofen	5304	46.6	385	840	1936-1998
Mosel	Cochem	27088	312	2080	4170	1931-1998
Sieg	Menden	2825	52.0	562	1050	1965-1998
Ruhr	Hattingen	4118	69.4	563	907	1968-1998
Lippe	Schermbeck	1783	44.5	243	361	1965-1998



Figuur 2: Looptijd tot aan Lobith (Kwadijk, 2007)

Logischerwijs is het niet de bedoeling dat het gebied rond de Rijn overstroomt. Daarom zijn er waterkeringen langs de Rijn aanwezig. Voor deze studie zijn vooral de waterkeringen langs de Rijn in Noordrijn-Westfalen van belang.

In Regierungsbezirk Köln gold tot 2003 het in 1963 uitgewerkte "Rahmenplan für den Hochwasserschutz" als basis voor de dimensionering van de waterkeringen. Hierin werd het waterpeil voor de waterkering vastgesteld op één meter boven het hoogwaterpeil van 1925/1926. Dit komt in Keulen overeen met een afvoer van 13.300 m³/s (Schneider, 1996). In het Regierungsbezirk Düsseldorf gold tot 2003 de maatgevende afvoer zoals vastgesteld in 1977. De maatgevende afvoeren bij de belangrijkste meetstations (in stroomafwaartse richting) langs de Niederrhein zijn weergegeven in tabel 4.

Tabel 4: De maatgevende afvoeren van de Niederrhein tot 2003

Meetstation	Afvoer [m ³ /s]
Köln en Düsseldorf	13.300
Ruhrort	14.400
Wesel	14.600
Rees	14.200
Emmerich	14.100

Gebaseerd op statistische analyses werd ervan uitgegaan dat deze afvoeren overeenkwamen met een herhalingsfrequentie van 1/1000 jaar. Echter, met de hoogwaters van 1993 en 1995 komen deze afvoeren nog maar overeen met een herhalingsfrequentie van 1/300 jaar (Lammersen, 2004). De recente ontwikkelingen omtrent de maatgevende afvoeren staan beschreven in hoofdstuk 10.

3 Modelbeschrijving

Zoals beschreven in paragraaf 1.3 wordt voor de beantwoording van de onderzoeksvragen gebruikgemaakt van de softwarepakketten Baseline en Waqua. Dit hoofdstuk behandelt verdere informatie over de gebruikte pakketten en de modellering van het systeem.

3.1 Baseline

Het model dat gebruikt wordt in dit onderzoek is een aangepaste versie van het huidige Rijnmodel. De modelgeometrie van dit model is opgeslagen in de ArcGis FileGeoDatabase Baseline. Baseline is een geografische database. Dit houdt in dat Baseline gebruikmaakt van GIS-data (GIS staat voor Geografisch Informatie Systeem). Deze data worden volgens een voorgeschreven wijze opgeslagen en hebben een relatie met een rivier. Deze data bestaan bijvoorbeeld uit de hoogtes van het zomer- en winterbed maar kan ook informatie bevatten over kunstwerken, dijken en ruwheden.

Behalve een GIS-database is Baseline ook een ArcGis-extensie met functionaliteit voor het beheren en aanpassen van Baselinedata. Aanpassingen in deze data worden gemaakt met standaard ArcGis-functies. ArcGis is een bewerkingsprogramma voor GIS-data. Door informatie aan te passen met behulp van deze functies worden de Baselinedata aangepast. Baseline biedt vervolgens de instrumenten om deze (bewerkte) geografische gegevens te converteren naar invoerbestanden voor het simulatieprogramma Waqua (CSO & HKV Lijn in Water, 2011). Waqua wordt besproken in paragraaf 3.2.

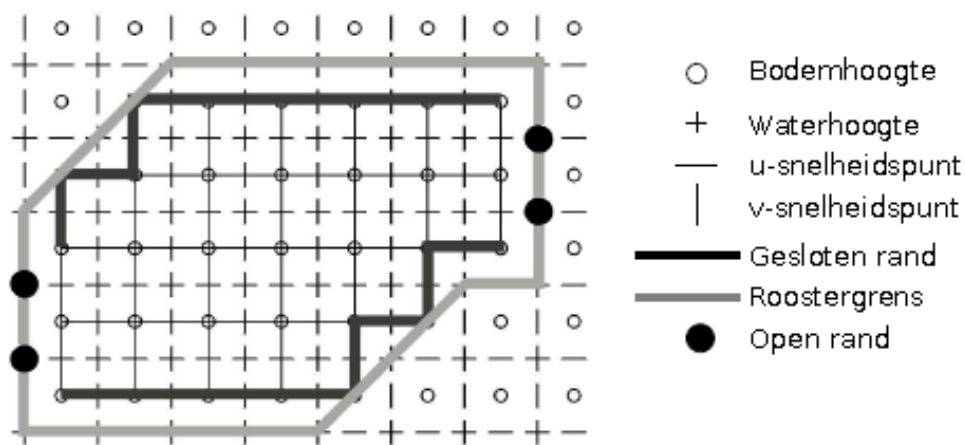
Baseline genereert dus enkel de invoerbestanden met een geografische component van het model en niet een compleet model dat direct gereed is om gesimuleerd te worden. Voordat het model gesimuleerd kan worden, moeten onder andere de initiële voorwaarden, de randvoorwaarden en het bestand dat de verschillende invoer samenbrengt nog worden gemaakt. Dit gebeurt buiten Baseline om (CSO & HKV Lijn in Water, 2011).

3.2 Waqua

Voor dit onderzoek zal het gebruikte model worden gesimuleerd in Waqua. Dit softwarepakket kan gebruikt worden voor simulaties van waterbeweging en waterkwaliteit in twee dimensies (Simona, 2010) en wordt veel gebruikt in Nederland (onder andere door Rijkswaterstaat). Doordat er veel met Waqua gewerkt wordt, was er een model beschikbaar van de Niederrhein. Hierdoor lag het voor de hand om Waqua te gebruiken in dit onderzoek. In dit onderzoek wordt enkel de waterbewegingcomponent van Waqua gebruikt. Waqua maakt gebruik van de ondiepwatervergelijkingen (deze vergelijkingen zijn beschreven in Bijlage A. Ondiep water wordt gedefinieerd als water waar de horizontale dimensie (waterbreedte en golflengte) veel groter is dan de verticale dimensie (de water diepte) (Simona, 2010).

3.3 Rekenrooster

Bij de berekeningen wordt gebruikgemaakt van een rechthoekig rooster. De horizontale component wordt weergegeven als m , de verticale als n . Daarnaast wordt er gebruikgemaakt van het zogenaemde "staggered" principe. Dit principe houdt in dat het gemodelleerde systeem kan worden gezien als een groot aantal verbonden, kolomvormige watervolumes. Vier eigenschappen worden altijd berekend voor elk volume water. Dit zijn de waterstand, -diepte en de beide richtingscomponenten van de snelheid. Voor de berekening geldt dan ook dat er vier grids worden gebruikt, een voor elke eigenschap. Deze grids zijn identiek aan elkaar wat betreft vorm en afmetingen. Het verschil is dat deze grids ten opzichte van elkaar verschoven ("staggered") zijn. Hierdoor worden de snelheden (en mogelijke impulsen) aan de randen van de rekencellen bepaald, terwijl de waterhoogte en -diepte in het midden, of op de hoekpunten van een rekencel worden bepaald.



Figuur 3: Staggered rekenrooster (Van Putten, 2011)

3.4 Gebruikt referentieniveau

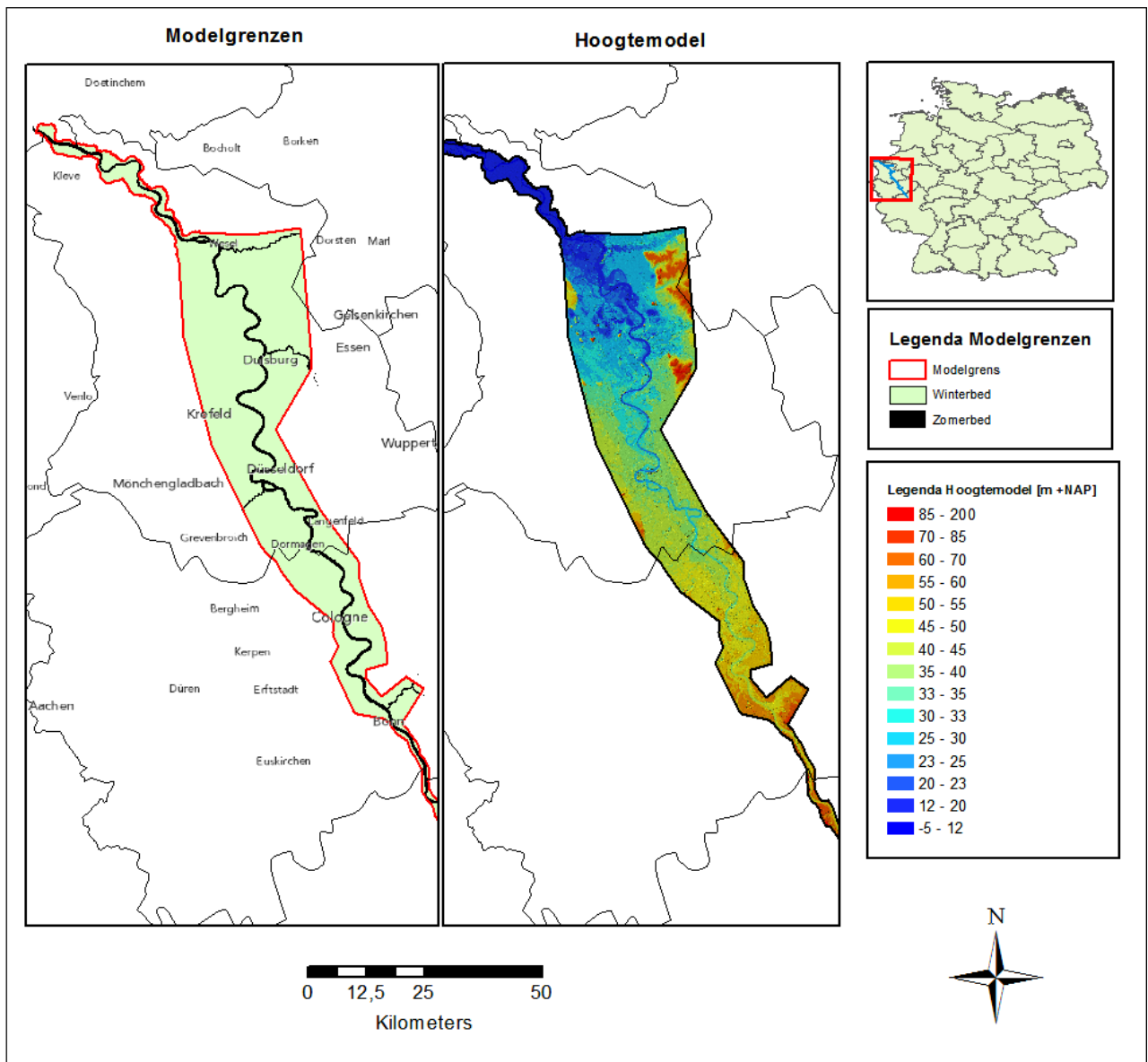
Hoogtemetingen worden gedaan ten opzichte van een referentieniveau. Dit referentievlak kan in alle landen verschillend zijn. In Duitsland wordt het referentieniveau aangeduid met het Normalnull (NN). In Nederland wordt het referentieniveau aangeduid met Normaal Amsterdams Peil (NAP). Dit referentieniveau is ongeveer gelijk aan gemiddeld zeeniveau (Rijkswaterstaat, 2012). In dit onderzoek zijn, ondanks dat het studiegebied gelegen is in Duitsland, alle hoogtemetingen gedaan ten opzichte van NAP. Deze keuze maakt voor de gebruikte getallen geen enkel verschil. Sinds 1879 is het NN gelijkgesteld aan het NAP (Waalewijn, 1987).

3.5 De modellering van het systeem

Voor dit onderzoek is een model gebruikt dat de Duitse Niederrhein beschrijft, van Andernach tot Lobith. Dit is ongeveer 180 kilometer hemelsbreed gemeten. Zoals eerder beschreven was dit model beschikbaar bij de start van dit onderzoek. Dit model is eigendom van LANUV en is vaker gebruikt in projecten. Projecten waarin dit model is gebruikt, zijn onder andere het GRADE-project van Deltares in samenwerking met Rijkswaterstaat en het KNMI. Het HYSTAT-project van HKV heeft ook gebruikgemaakt van dit model (Beckers, 2012). HKV heeft dit model, met toestemming van LANUV ter beschikking gesteld voor dit onderzoek. GRADE is een project dat zich heeft gericht op de ontwikkeling van een nieuw instrument om de maatgevende afvoeren voor de Rijn en Maas te bepalen (De Wit & Buishand, 2008). HYSTAT is een project dat zich heeft gericht op de gevolgen van overstroming reducerende maatregelen langs de Niederrhein (Barneveld, 2012).

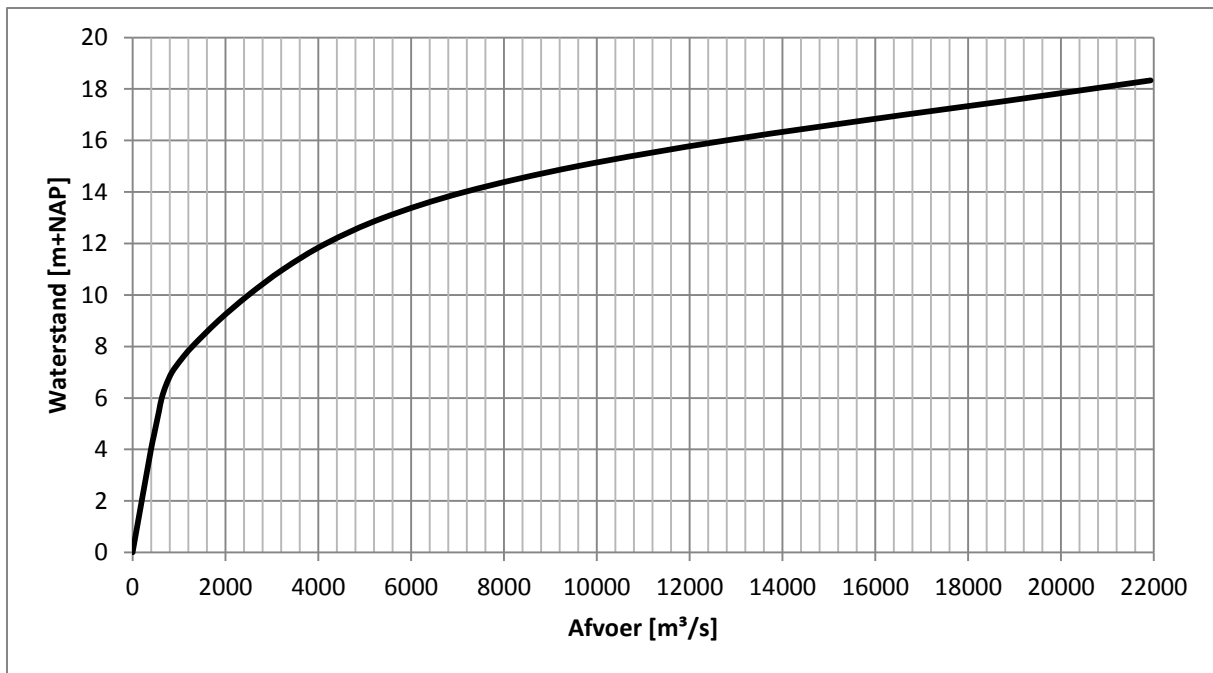
Het model beschrijft niet alleen het buitendijkse maar ook (een gedeelte van) het binnendijkse gebied. Van Andernach tot Wesel lopen deze binnendijkse gebieden tot de hoge gronden. Bij Wesel is er een vernauwing in het model. Bij Wesel zijn aan beide oevers stuwwallen gelegen. Vanaf Wesel tot aan Lobith is er een strook van circa 500 meter binnendijks gebied meegenomen in het model. Deze beperkingen van het model waren in het verleden voor de uitkomsten van de projecten waarin dit model gebruikt is geen belemmering, omdat er voornamelijk werd ingezet op overstromingen in Noordrijn-Westfalen (HYSTAT) en maatgevende afvoeren die op zouden kunnen treden (ongeacht of deze Nederland met het huidige hydraulische systeem kunnen bereiken). Voor dit onderzoek echter is deze vernauwing in het model wel een belemmering omdat deze vernauwing grote effecten heeft op de afvoer die Lobith bereikt omdat overstromingen in deze vernauwing niet gesimuleerd worden.

Deze modelgrenzen zijn zichtbaar in figuur 4. Deze modelgrenzen zijn gesloten grenzen, dit houdt in dat er via deze grenzen geen water uit het modelgebied kan stromen. Ook de bodemhoogte wordt in de figuur weergegeven. Zichtbaar is dat de bodemhoogte bij de modelgrenzen inderdaad hoger is dan de andere gronden die meer in het centrum van het model gelegen zijn.



Figuur 4: Modelgrenzen en het onderliggende bodemhoogtemodel

De onder- en bovengrens van het model zijn open randen. Dit houdt in dat het water langs deze randen in en uit het model gebied kan stromen. Aan de bovenrand van het model wordt een afvoer als randvoorwaarde toegekend. Voor de onderrand (bij de Pannerdensche kop) geldt dat er gebruikgemaakt wordt van een QH-relatie als randvoorwaarde, deze relatie wordt weergegeven in figuur 5. Deze QH-relatie is een gekalibreerde relatie voor de huidige versie van dit model. Deze relatie is gevonden met een afvoer bij Emmerich die in 16 dagen oploopt van 500 m³/s naar 18.000 m³/s om vervolgens weer af te nemen in 16 dagen tot 500 m³/s. Deze QH-relatie klopt niet voor de situatie 1374. Er zijn echter ook geen bekende QH-relaties voor die tijd. Er kunnen aanpassingen gemaakt worden aan deze relatie. Een mogelijkheid zou kunnen zijn om de waterstand bij een bepaalde afvoer te verlagen met dezelfde hoeveelheid als het zomerbed. Dit geldt echter enkel voor afvoer in het zomerbed en niet voor het winterbed. Door de kennishiaten in de geometrie en de onzekerheid hierin wordt de huidige QH-relatie gebruikt. De invloed hiervan wordt beschreven in Bijlage B.



Figuur 5: De QH-relatie bij de Pannerdensche kop (LANUV NRW, 2008)

Deze QH-relatie bepaalt in zekere zin hoeveel water het model kan verlaten aan de onderrand van het model (wanneer er geen laterale uitstromen zijn). Hierdoor bepaalt deze voorwaarde ook de opstuwing van water aan de onderrand van het model.

De initiële condities moeten voor elke cel afzonderlijk opgegeven worden. Voor dit model worden als initiële waarden waterstanden gebruikt. In de cellen die het zomerbed beschrijven, worden waterstanden gebruikt die optreden bij een afvoer van 2500 m³/s. Voor de winterbedcellen wordt geen waterstand opgegeven in de initiële situatie.

4 Historische hoogwaters in de Rijn

In dit hoofdstuk worden de historische hoogwaters in de Rijn bij Keulen beschreven. Bij deze beschrijving is onderscheid gemaakt tussen hoogwaters die in de winter en zomer zijn voorgekomen en hoogwaters die het gevolg zijn van ijsdammen (de zogenaamde ijshoogwaters). Bij deze laatste wordt het water tegengehouden door een ijsdam en ontstaat een hoge afvoergolf wanneer deze doorbreekt.

Deze hoogwateranalyse is grotendeels gebaseerd op onderzoek van Krahe et al. (2000). In dit onderzoek zijn de bekende extreme hoogwaters sinds de 14^e eeuw meegenomen. Hoogwaters waarvan het waterpeil onder de 9 meter is gebleven (gemeten bij Keulen) zijn buiten beschouwing gelaten. De data van Krahe et al. (2000) zijn aangevuld met data uit Bräuler (1932), Engel (1996) en Stadtentwässerungsbetriebe Köln, AöR (2012) en zijn weergegeven in tabel 5.

Tabel 5: Tijdslijn van historische hoogwaters bij Keulen; Type: IJ = Ijshoogwater, S = hoogwater als gevolg van smeltwater, R = hoogwater als gevolg van regen; W = Waterpeil. Alle peilen zijn ten opzichte van meetstation Keulen. Het nulpunt van het meetstation was in 1374 ongeveer 36 meter + NAP

Winter hoogwater				Ijshoogwater		Zomer hoogwater		
Jaar	Maand	W [cm]	Type	Jaar	Maand	Jaar	Maand	W [cm]
834	-	-	R					
869	2	-	R					
						886	6	-
904	-	-	R					
987	3	-	-					
1035	2	-	R					
1060	3	-	S/R					
				1086	1			
1129	1	-	S/R					
				1143	2			
1174	12	-	R					
1206	12	-	R					
1246	1	-	R					
1260	3	-	R					
				1306	2			
1321	12	-	R					
						1342	7	1153
1344	2	1230						
1367	3	-	S/R					
1374	2	1330	S/R					
				1396	2			
				1408	2			
1409	2	-	R					
1421	12	-	S/R					-
				1432	2			
				1458	2			
				1465	2			
						1480	7	
				1491	2			
				1496	2	1496	5	1050
1497	1	1150	S/R					

Winter hoogwater				Ijshoogwater		Zomer hoogwater		
Jaar	Maand	W [cm]	Type	Jaar	Maand	Jaar	Maand	W [cm]
1524	1	991	R					
1546	1	-	S/R					
1552	1	1050	R					
				1565	2			
				1571	2			
				1573	1			
1589	12	-	S/R					
				1595	3			
				1618	2			
				1624	1			
1633	1	-	R					
1643	1	-	S/R					
1651	1	1026	S/R					
				1658	2			
				1665	2			
1682	1	1040	S/R					
1698	4	-	R					
				1729	1			
1739	1	-	S/R					
1740	12	1033	S/R	1740	3			
1751	3	973	S/R					
1784	-	1263		1784	2			
				1795	2			
1845	3	1034	IJ/ S/R					
				1850	2			
				1876	3			
1882	11	1052	S/R					
1883	1	992	S/R					
1919	12	1058	S/R					
1920	1	1058	R					
1924	11	980	R					
1926	1	1069	S/R					
1947	12	910	S/R					
1955	1	980	R					
1970	2	986	S/R			1970	-	-
1980	2	931	R					
1983	4	983	R			1983	5	996
1984	2	931	R					
1988	3	995	R					
1993	12	1063	R					
1995	1	1069	S/R					
1998	11	950	R					
2001	3	938	R					
2003	1	971	-					

In de tabel is zichtbaar dat er significant meer hoogwaters in de winter optreden dan in de zomer. Dit is logisch omdat de grond in de zomer minder verzadigd is dan in de winter en daardoor beter in staat is het water te absorberen, waardoor het water minder snel tot afstroming richting de rivieren

komt. Daarnaast verdampt er meer en gebruiken de gewassen meer water in de zomer. In de winter, wanneer er minder water door de grond wordt geabsorbeerd en wordt opgenomen door gewassen, is er een vrijwel directe oppervlakteafvoer naar de rivieren. Dit veroorzaakt hogere afvoeren.

De extreemste hoogwaters die bekend zijn, traden op in 1342, 1374 en 1784. Het hoogwater in 1342 staat bekend als het St. Maria Magdalena hoogwater. De oorzaak van dit hoogwater werd voornamelijk veroorzaakt door een extreem hoge afvoer van de Main als gevolg van een lange periode van regen (Wetter et al., 2011). Een vergelijkbare situatie trad op in 1374. Volgens Krahe (1997) was het de natste winter van het millennium. Van december 1373 tot april 1374 viel er veel regen waardoor in de periode van 11 februari tot 2 april de hoogste waterstand ooit is gemeten bij Keulen. Deze waterstand was 13.30 meter (Sprong et al., 2012; Lorenz, 1997, Krahe et al., 2000). Dit is ongeveer 50 meter boven NAP. Het hoogwater in 1784 was ten tijde van de kleine ijstijd (Brázdil et al., 2010). Deze tijd wordt gekarakteriseerd door lage temperaturen, bevroren ondergronden, ijs gedomineerde waterstromen en sneeuw. Dit werd gevolgd door een plotselinge opwarming gecombineerd met regenval.

Wanneer deze drie hoogwaters worden geanalyseerd, valt het op dat de regen een grote invloed heeft gehad op alle hoogwaters. De hoogwaters verschillen wanneer er gekeken wordt naar de aanwezigheid van ijs ten tijde van het hoogwater. Het is zeer goed denkbaar dat het hoogwater van 1784 beïnvloed is door de aanwezigheid van ijs. Door de mogelijke invloed van ijs is het hoogwater van 1784 uitgesloten om als basis te dienen voor dit onderzoek. Mogelijk is dit hoogwater in feite wel een ijshoogwater. Bij de hoogwaters uit 1342 en 1374 is de invloed van ijs wel uit te sluiten. De waterstand in 1374 is hoger geweest dan in 1342. Daarom is er voor dit onderzoek gekozen te werken met het hoogwater uit 1374 en de onderzoeksvragen hierop te baseren.

5 Reconstructie van de historische Rijnloop

In dit hoofdstuk wordt de reconstructie van de Rijn omstreeks 1374 beschreven. Het is niet met zekerheid te zeggen dat de geschetste situatie recht doet aan de Rijn zoals hij werkelijk was in die periode. De reconstructie die beschreven wordt, is echter de best mogelijke die gemaakt kan worden met de beschikbare middelen en tijd. De beschrijving van de reconstructie in dit hoofdstuk zal enkel de methode en grote verschillen tussen de huidige situatie en de historische situatie bevatten. De uitgebreide en volledige beschrijving van elke wijziging om de Rijn terug te brengen tot de situatie 1374 en de beweegredenen hiervan zijn na te lezen in Bijlage C.

5.1 Werkwijze bij de bepaling van de historische loop

Het algemene principe dat leidend is in de reconstructie is de vaste volgorde waarin gewerkt is. Allereerst is er voor de reconstructie gebruikgemaakt van kaarten die beschikbaar zijn. Deze kaarten stammen veelal uit de 16^e eeuw en zullen ter indicatie gebruikt worden bij de reconstructie. De locatie van de grens van het Romeinse Rijk (ook wel de limes genoemd) is veel gebruikt in de bepaling van de oude loop. Aan de hand hiervan is de loop van de Rijn in de Romeinse tijd te bepalen. Het Romeinse Rijk lag geheel aan de westelijke zijde van de Rijn. Sporen van het Romeinse Rijk duiden op een meer westelijk gelegen Rijn. Dit is ter indicatie gebruikt van de locatie van de Rijn in 1374.

Daarnaast wordt er gebruikgemaakt van het huidige bodemhoogtemodel. Op basis van dit bodemhoogtemodel is aan te geven welke baan een oude meander heeft gevolgd en welke bocht, zeer waarschijnlijk, eerder is afgesneden dan een andere bocht. De exacte leeftijd van een meanderbocht is niet te achterhalen op basis van deze informatie. Ook wordt er gebruikgemaakt van de gemiddelde migratiesnelheid van de Rijn zoals vastgesteld door Hoppe (1970). Deze migratiesnelheid wordt gemiddeld over de Rijn (van Keulen tot de Oude Waal) genomen en bedraagt 6 meter per jaar. Met behulp van deze informatiebronnen wordt de hele reconstructie van de Rijn gemaakt. Wanneer er geen enkele aanwijzing is voor een verschuiving van de Rijn zal de huidige loop aangehouden worden.

5.2 De historische loop

De grootste wijzigingen in de loop van de rivier zijn op de trajecten Dormagen-Düsseldorf en Rees-Emmerich. Deze twee wijzigingen zijn verantwoordelijk voor ruim een kwart van de riviervlenging die volgt uit de reconstructie. De totale verlenging van de rivier is circa 100 kilometer. De huidige rivieras heeft een lengte van 308 kilometer terwijl de gereconstrueerde rivier een lengte heeft van 411 kilometer heeft. Dit is een percentuele toename van 33 procent.

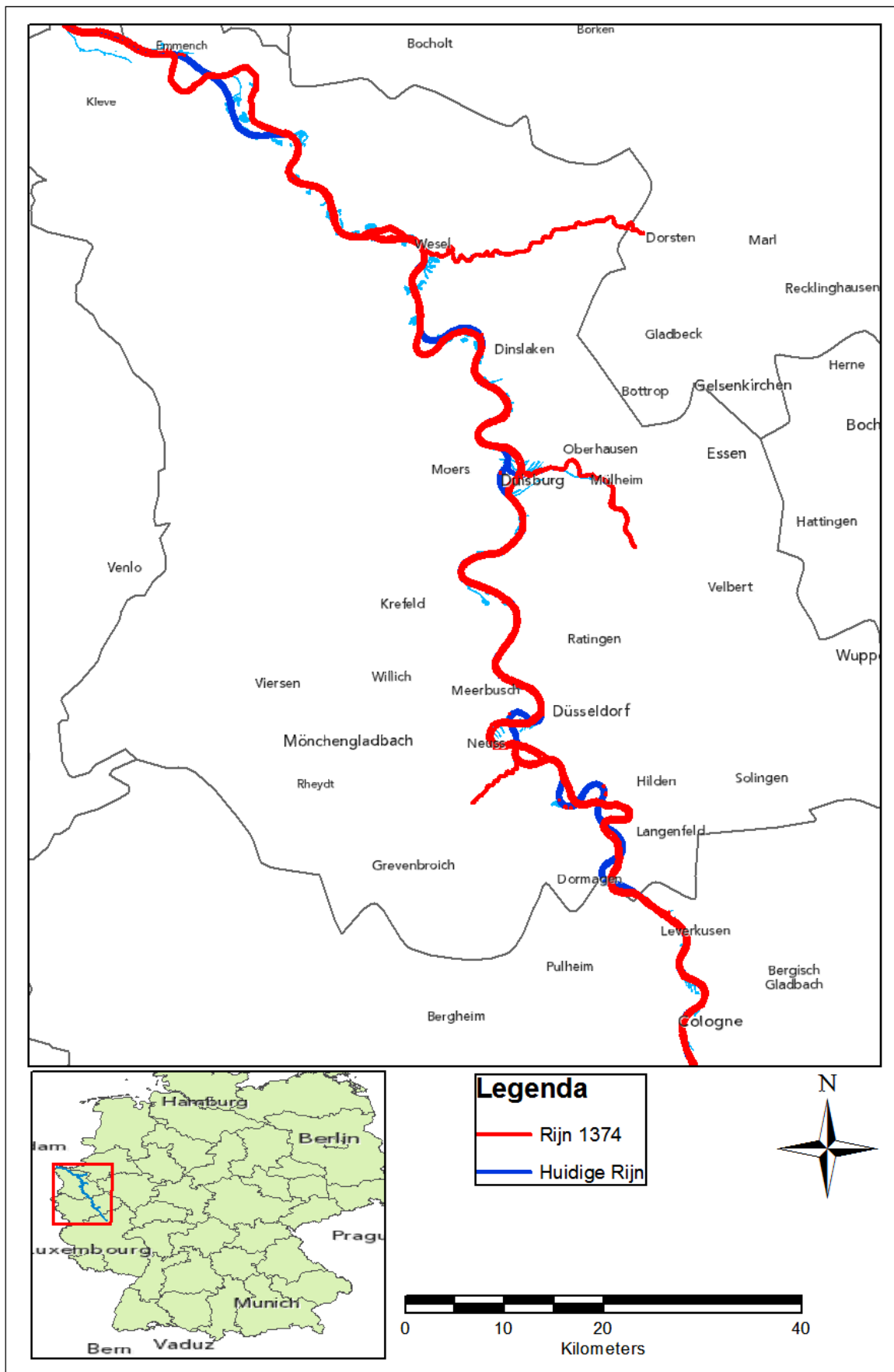
Bij Keulen zijn er in de loop der tijd weinig veranderingen geweest in de loop van de rivier. Geen bewijs waarmee met reële zekerheid de loop in 1374 geschat kan worden, is gevonden. Dit heeft er samen met de bewijzen tegen een veranderde loop toe geleid dat er is aangenomen dat de loop niet is veranderd. Verder stroomafwaarts is bewijs, dat bestaat uit kaarten uit Hoppe (1970), Gerlach (2006) en beschrijvingen van Von Petrikovits (1960), waarmee vastgesteld kan worden dat de Rijn tussen Dormagen en Düsseldorf sterk veranderd is. De Rijn stroomde om Haus Bürgel heen. Dit is zichtbaar op figuur 30 in Bijlage C. Naast deze beschrijving van de loop om Haus Bürgel heen is de loop zoals op de gevonden kaarten aangehouden als de historische situatie.

De veranderingen bij Düsseldorf zijn gebaseerd op het onderzoek van Hoppe (1970). In dit onderzoek is een kaart en een uitvoerige beschrijving gegeven. Deze beschrijving spreekt van een document uit 1254. In dit document wordt beschreven dat er voor de poorten van Neuß (dat een voorstad was van Düsseldorf) een eiland gelegen was. Dit eiland was gelegen tussen de Erft en de Rijn. Op basis hiervan is af te leiden dat de Rijn buiten Neuß om gestroomd heeft. Bij Duisburg is de Rijn in de geschiedenis meerdere malen ingrijpend veranderd (zie ook figuur 36 in Bijlage B). De loop van de Rijn rond 1374 is afgeleid van de grens van het Romeinse Rijk, in het bijzonder de locaties van Romeinse forten. In de beschrijvingen van de geschiedenis van de stad Duisburg is duidelijk terug te lezen dat de stad een flourerende handelsstad is geweest door de mogelijkheid van scheepvaart. Omstreeks 1400 was scheepvaart in Duisburg niet meer mogelijk (Hantsche, 1999). Dit geeft aan dat de Rijn in 1374 zeer waarschijnlijk nog wel bij Duisburg stroomde. Dit duidt erop dat de Rijn in westelijke richting migreerde en migreert bij Duisburg vandaan.

Bij Dinslaken/Rheinberg is er een duidelijke zuidwaartse verandering doorgevoerd. Deze wijziging is gekozen uit twee mogelijkheden. Deze mogelijkheden zijn terug te vinden in figuur 38 en figuur 39 in Bijlage C (Hoppe, 1970; Shala, 2011) en in het bodemhoogtemodel. Er is gekozen voor deze wijziging op basis van de migratiesnelheid van de Rijn en op basis van de bodemhoogte van de beide oude meanderbochten. Bij Wesel is gebruikgemaakt van een schets die stamt uit de 16^e eeuw. Op deze kaart is een westelijkere loop te onderscheiden dan de huidige loop. Deze kaart gecombineerd met het bodemhoogtemodel hebben ertoe geleid dat er voor de situatie van 1374 een kromming aan de huidige rivier is toegevoegd.

Bij Rees is de laatste wijziging van de Rijnloop in het model gemaakt. Twee oude meanders zijn zichtbaar. Beide liggen min of meer op dezelfde locatie, echter verschillen ze van straal. Hierdoor is te stellen dat het sporen zijn van één migrerende bocht. Beschreven wordt dat de grootste bocht (om Grieterbusch) in de 14^e of 15^e eeuw is verlaten. Ten tijde van het hoogwater van 1374 behoorde deze bocht nog tot de Rijn.

Al deze wijzigingen zijn in beeld gebracht in figuur 6. Door de grootte van het modelgebied zijn de kleinere wijzigingen moeilijk zichtbaar in deze figuur.



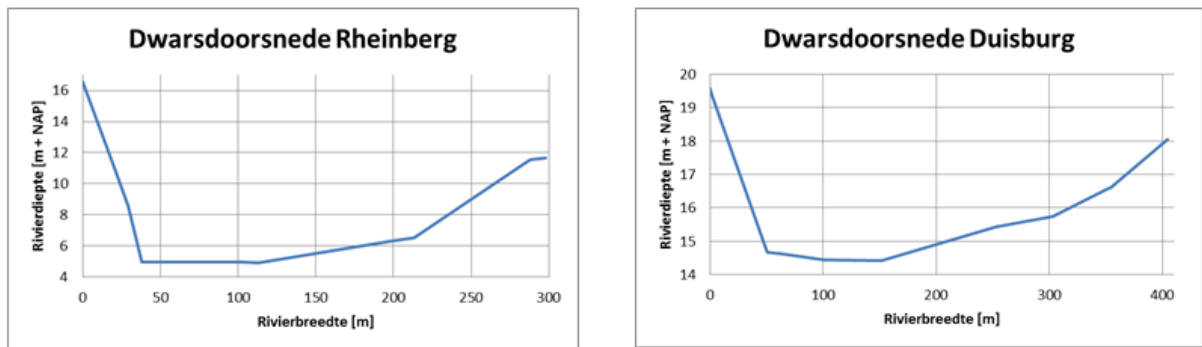
Figuur 6: De vermoedelijke ligging van de Rijn in 1374 ten opzichte van de huidige loop

5.3 Modelling historische loop

Na bepaling van de historische loop van de Rijn is er een aantal stappen doorlopen om deze historische loop te modelleren.

De eerste stap in het modelleringsproces is het intekenen van de rivieras van de historische loop. Deze historische rivieras vertakt zich van de huidige rivieras en sluit uiteindelijk ook weer aan op deze huidige rivieras.

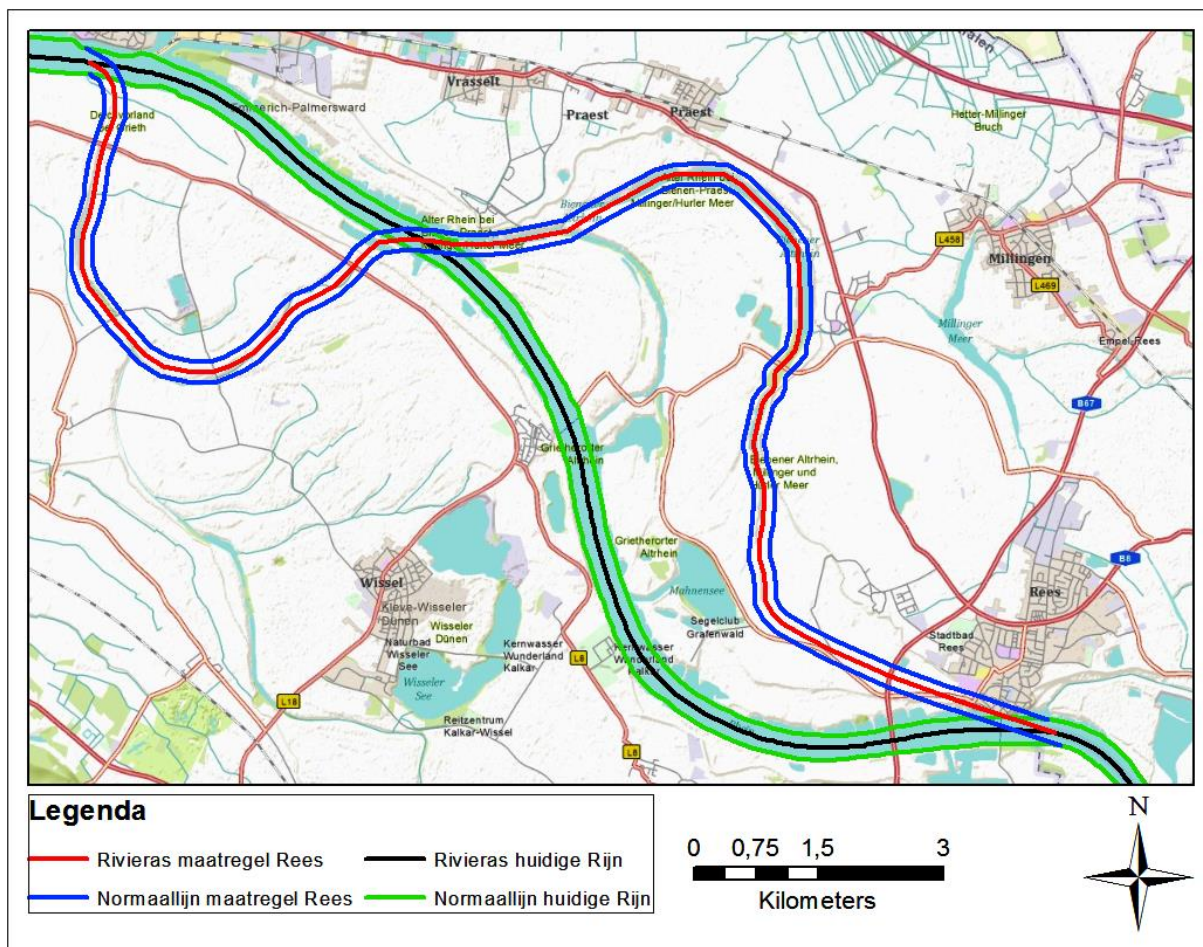
De tweede stap is vervolgens om de hele rivierloop te schematiseren. Hiertoe is de breedte van de historische loop geschat op basis van het bodemmodel en de historische kaarten. Opvallend was dat de breedte (van het zomerbed) in veel gevallen relatief weinig afwijkt van de huidige rivier breedte. De breedtes variëren van 200 tot 400 meter. Verwacht was dat de rivier breder was in 1374 dan in de huidige situatie omdat bekend is dat rivieren toen meer meanderden. Ook is er een oever geconstrueerd. Voor deze oever is een vaste breedte van 25 meter aangenomen.



Figuur 7: Voorbeelden dwarsdoorsneden historische Rijn

Als derde stap is een bodemprofiel toegekend aan de historische rivier. Deze profielen zijn sterk geschematiseerd. Dit is noodzakelijk door het ontbreken van (leesbare) historische dieptemetingen op meerdere locaties langs de Rijn. Voor de schematisatie van de bodemprofielen is gebruikgemaakt van het profiel waarvan ook gebruikgemaakt is door Herget en Meurs (2009) en het huidige profiel. De trajecten zijn geschematiseerd als bakjes. De onveranderde rivierdelen behouden hun huidige dwarsprofiel. Dit dwarsprofiel wordt nog wel gecorrigeerd voor de bodemzakking en incisie. Deze correctie wordt in de volgende paragraaf beschreven.

In figuur 7 zijn twee voorbeelden weergegeven van dwarsdoorsneden van de geschematiseerde historische Rijn. De profielen wijken van elkaar af doordat er per verandering aan de rivierloop afzonderlijk is geanalyseerd hoe het dwarsprofiel het meest accuraat geschematiseerd kan worden op een zo eenvoudig mogelijke wijze. Dit is gedaan op de aansluitingspunten van de rivieras van de historische en de huidige Rijn. Tussen die twee dwarsdoorsneden is de bodemhoogte lineair geïnterpoleerd, zodoende is ook de verandering van de dwarsdoorsnede lineair. Deze interpolatie is gedaan met stappen van 100 meter. Verder zijn op de randen van de historische loop normaallijnen aangebracht die de afbakening aangeven tussen het zomerbed en het winterbed. Deze normaallijnen sluiten aan op de normaallijnen van de huidige situatie daar waar de huidige en historische situatie bij elkaar komen. Dit is visueel gepresenteerd in figuur 8.



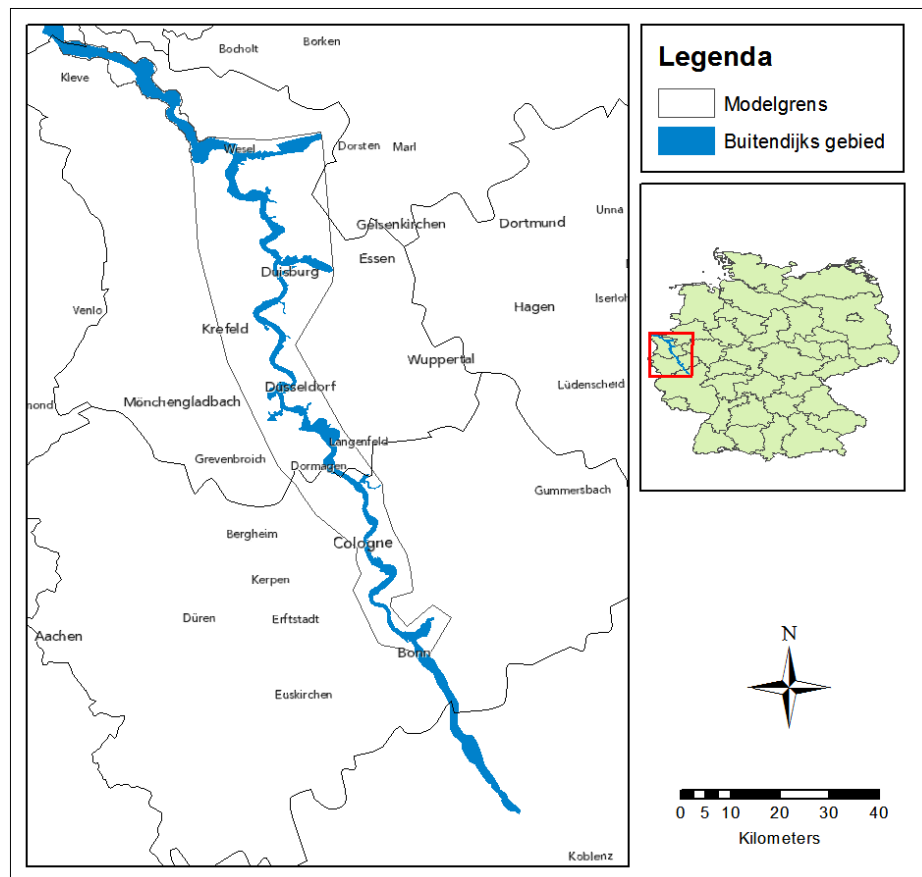
Figuur 8: Het aanmaken en aansluiten van rivierassen en normaallijnen

5.4 Modelling historische bodemhoogte

In de loop der eeuwen is de bodem onderhevig aan veranderingen. Naast de veranderingen door menselijke ingrepen vinden er ook natuurlijke veranderingen plaats. Door deze menselijke ingrepen uit het model te filteren door uitschieters naar boven (bijvoorbeeld zanddepots) en beneden (door mijnwerkzaamheden) glad te trekken met de omliggende bodem worden deze veranderingen ongedaan gemaakt. Dit betreft slechts enkele locaties en deze zijn zeer lokaal. Het overgrote deel van de mijnbouw vond plaats buiten het modelgebied (Ernst Klett Verlag GmbH, 2010). Hierdoor wordt verondersteld dat de bodemverzakking over grote gedeelten van de uiterwaarden in het modelgebied als gevolg van deze mijnactiviteiten te negeren zijn. Dit is slechts een aanname. Over deze aannames valt te discussiëren en is dan ook niet de enige waarheid in dit geval. Hierop wordt dieper ingegaan in hoofdstuk 12.

Voor de natuurlijke verandering van de bodemhoogte van het winterbed wordt verwezen naar een onderzoek van Brunotte et al. uit 1994. Hierin wordt gesteld dat de gemiddelde verhoging van het winterbed als gevolg van sedimentatie gelijk is aan 30 cm in de periode vanaf 1782. Herget en Meurs (2009) stellen dat er over de periode 1374 tot 1782 geen bewijs is voor een significante verhoging van het winterbed. Het lijkt echter aannemelijk dat er in de periode 1374 tot 1782 eveneens sedimentatie is opgetreden. Daarom wordt deze waarde van 30 cm lineair geëxtrapoleerd voor de periode 1374-1782. Dit resulteert in een toename van 58 centimeter voor deze periode. Daarom wordt voor de periode 1374 tot heden een toename van 60 centimeter aangenomen. Deze waarde is

van de huidige winterbedhoogte in het buitendijkse gebied afgetrokken om tot de situatie in 1374 te komen.

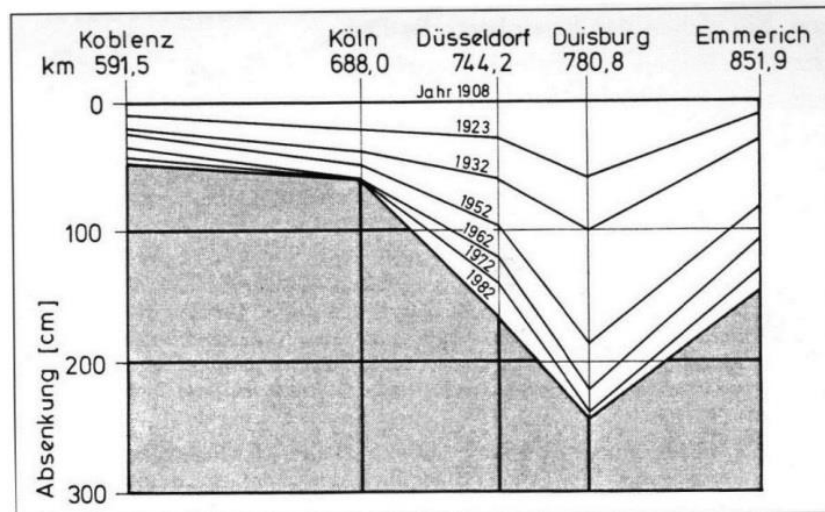


Figuur 9: Het buitendijkse gebied binnen de modelgrenzen

Het buitendijkse gebied wordt aangenomen als de grenzen die het “innen model” van de Rijn beschrijven en zijn weergegeven in figuur 9. Dit model bevat slechts op enkele locaties gebieden achter de bandijken (Barneveld, 2012). Daarom wordt dit buitendijkse gebied gezien als een bruikbare aanname voor de oppervlakte waarop sedimentatie voornamelijk zal hebben plaatsgevonden. Sedimentatie vindt voornamelijk plaats op korte afstand van de rivier.

De mate waarin het zomerbed is gedaald als resultante van de verschillende processen die veranderingen in de bodem veroorzaken is gebaseerd op het rapport *Der Rhein unter der Einwirkung des Menschen* van de CHR uit 1993. In dit rapport is een beschrijving gegeven van de zakking van de waterspiegel tussen Koblenz en Emmerich sinds de normalisatie. Deze zakking is weergegeven in figuur 10. Deze figuur beschrijft de daling van de waterspiegel van 1908 tot 1982. Ondanks dat dit op het moment van schrijven al 32 jaar geleden is, wordt aangenomen dat de huidige verzakking daaraan gelijk is. Ook wordt aangenomen dat er in de periode 1374-1908 geen significante wijzigingen zijn geweest in de bodemhoogte van het zomerbed. De bodemzakking van het zomerbed komt onder andere door baggerwerkzaamheden in het zomerbed, de vergrote sedimentafvoer door de omwoeling van schepsschroeven gecombineerd met een verminderde hoeveelheid sedimentaanvoer. Deze factoren resulteren in een incisie in het zomerbed. Deze incisie is geïnitieerd door de normalisatie van de Rijn. Door de normalisatie is het rivierbed (zomerbed en winterbed) smaller en rechter geworden. Hierdoor is de stroomsnelheid in de Rijn toegenomen, waardoor er

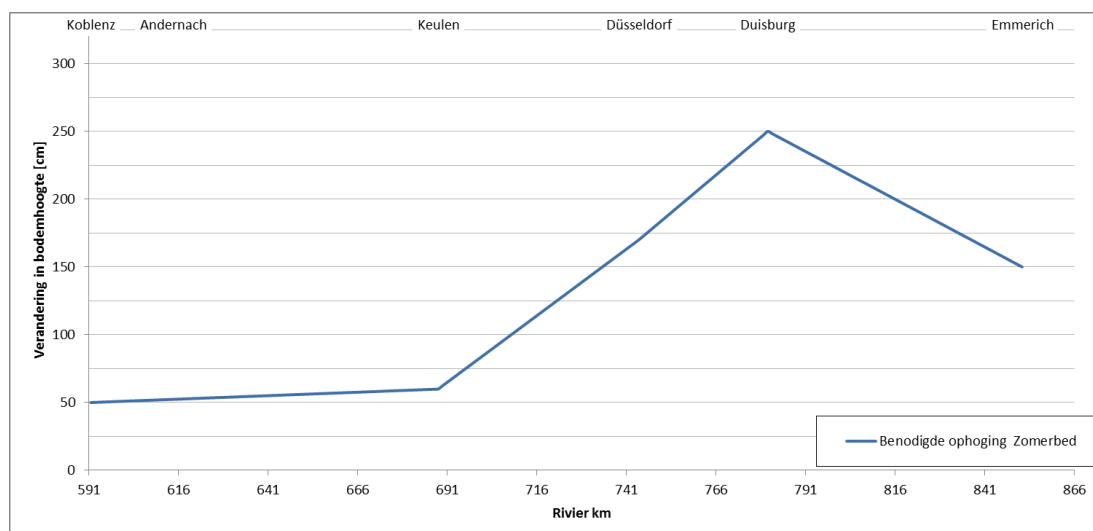
meer incisie plaatsvindt. Deze normalisatie is onder andere in gang gezet om de Rijn beter bevaarbaar te maken en dit wordt zo gehouden. Dit werkt de eerder genoemde baggerwerkzaamheden en de sediment omwoeling door de sloopschroeven verder in de kaart. De normalisatie is begonnen in de 18^e eeuw, daarom is aangenomen dat de incisie ook vanaf die periode significant is gaan meewerken.



Figuur 10: Waterspiegeldaling vanaf 1908 van Koblenz tot Emmerich (CHR/KHR, 1993)

Naast de eerder genoemde processen oefenen de mijnactiviteiten een invloed uit op de bodem en speelt isostasie een rol. Isostasie wordt veroorzaakt door het smelten van de ijskappen (Berendsen, 2000) en veroorzaakt een kanteling van onder andere Nederland (West-Nederland daalt terwijl Oost-Nederland stijgt). Vanzelfsprekend heeft dit effect op de bodemhoogte. De exacte bijdrage van dit verschijnsel aan de bodemverandering in Noordrijn-Westfalen is onbekend.

Om vanuit het huidige model tot de situatie in 1374 te komen moet deze resultante zakking ongedaan worden gemaakt. De benodigde verhoging van het model van de huidige situatie is de inverse van de grafiek uit figuur 10. Deze inverse is weergegeven in figuur 11. Deze verhoging is uniform over de breedte van het zomerbed.



Figuur 11: Benodigde bodemverhoging voor de zomerbedreconstructie

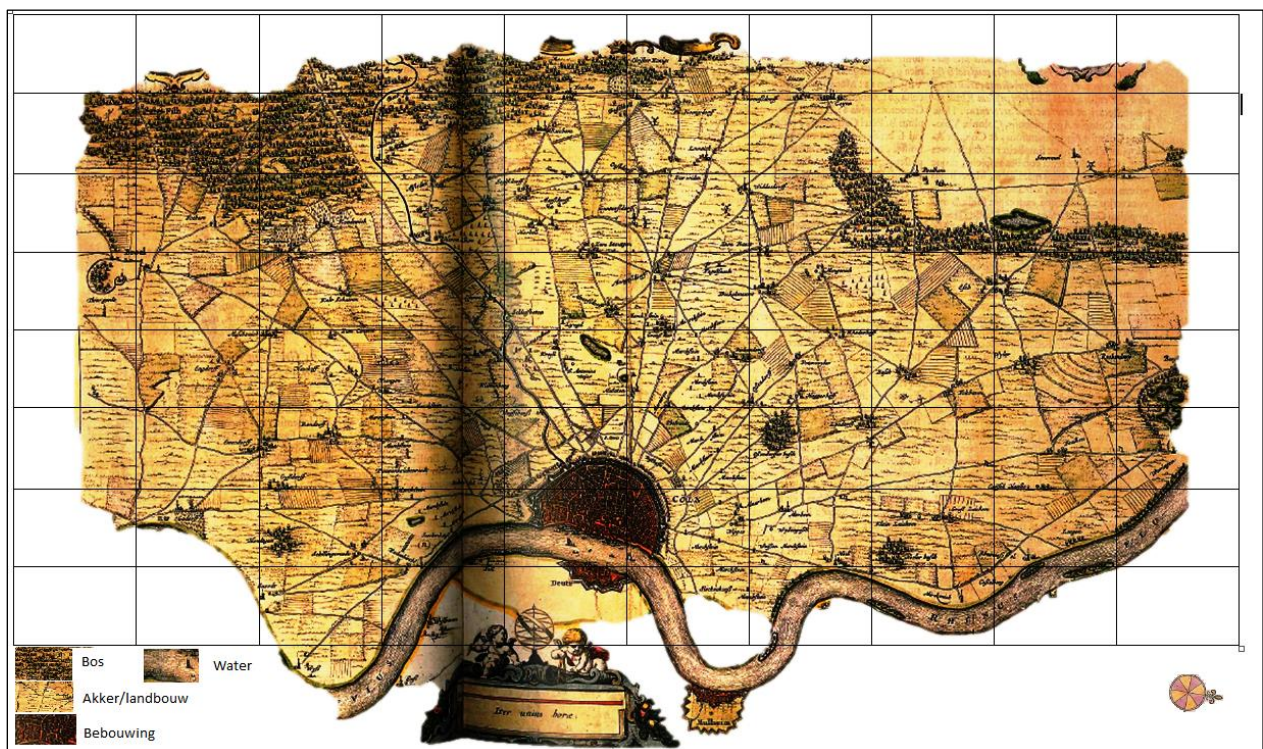
6 Ruwheden van de historische Rijn

De ruwheid van het zomer- en winterbed is van grote invloed op de resultaten van afvoerschattingen en hierdoor ook één van de grootste bronnen van onzekerheid. Dit is onder andere aangetoond door Toonen (2012). Een van de redenen hiervoor is dat de ruwheden een grote impact hebben op de stroomsnelheid en daardoor op de waterstand. Immers met een lagere stroomsnelheid zal het water verder opstuwen.

In dit hoofdstuk wordt allereerst stilgestaan bij de bepaling van de historische ruwheid in 1374 en de verdeling van de verschillende soorten landgebruik in die tijd.

6.1 Bepaling en modellering van de historische ruwheden

Omdat er uit 1374 geen informatie beschikbaar is over de vegetatie, ruwheden en de verdeling hiervan is er een grove inschatting gemaakt op basis van een kaart van Keulen uit 1662 (Schwartz, 2005, pp. 38-39). Deze kaart is achter een raster geplaatst en door de cellen te tellen is het percentage van verschillende landgebruik klassen bepaald (zie tabel 6). Het gebruikte raster is erg grof genomen. Dit is bewust gedaan om schijnnaauwkeurigheid te vermijden. Ondanks dat deze kaart uit 1662 is en niet uit 1374 wordt aangenomen dat deze kaart representatief is voor 1374. Wanneer gekeken wordt naar oude kaarten van Keulen (Mercator, 1571; Jödemann) blijkt dat er tot 1662 weinig veranderd is aan de stad Keulen zelf. Daarom is aangenomen dat de omgeving van Keulen ook niet significant gewijzigd is in die tijd. Ondanks dat deze kaart slechts de omgeving van Keulen weergeeft, wordt deze kaart wegens het gebrek aan verdere informatie als representatief aangenomen.



Figuur 12: Landgebruik bij Keulen in 1662 (Schwartz, 2005)

Omdat de percentages in tabel 6 slechts grove schattingen zijn op basis van één kaart, zijn er voor de verschillende scenario's kleine wijzigingen aangebracht. Deze worden verder gedefinieerd in hoofdstuk 7.1. Daarnaast wordt in tabel 6 aangegeven welk type landgebruik er precies is gekozen voor de bepaling van de ruwheid. Voor de klasse moeras wordt in de tabel geen percentage aangegeven. Dit komt doordat deze niet vanaf de kaart is af te leiden. Het is echter realistisch aan te nemen dat er wel moeras aanwezig was in het Rijngebied. Daarom wordt er in het basisscenario wel met moeras gewerkt ondanks dat dit niet op de kaart zichtbaar is. Dit wordt verder uitgewerkt in hoofdstuk 7.

Voor de keuze van de te gebruiken ruwheden is gekozen voor de ruwste varianten voor deze klassen uit deel 1 en 2 van het Handboek Stromingsweerstand vegetatie in Uiterwaarden (Ministerie van Verkeer en Waterstaat; RIZA, 2002), omdat er in de middeleeuwen nog geen machines waren voor bijvoorbeeld de landbouw. Hierdoor is het aannemelijk dat de akkers en graslanden erg ruw waren in vergelijking met de ruwheden die vandaag de dag gelden voor dit landgebruik.

Tabel 6: Percentages van verschillende soorten landgebruik bij Keulen in 1662

Landgebruik	Percentage op de kaart	Gebruikte ruwheden
Bebouwing	5%	Bebouwing
Bos/ruwe vegetatie	10%	Zachthoutoobos
Moeras	0%	5% Zachthoutoobos 95% Natte ruigte (waarvan 25% water)
Landbouw/Graslanden	80%	Verruigd grasland
Water	5%	Diepe bedding

Daarnaast zijn de aanwezige waterlichamen zoals plassen en dergelijke verwaarloosd in de ruwheidsscenario's. Als water worden enkel de Rijn en de zijriviertjes meegenomen. Dit is mogelijk omdat de resterende hoeveelheid oppervlaktewater een verwaarloosbaar aandeel heeft ten opzichte van het totale oppervlak. Hierbij moet worden opgemerkt dat de Rijn in alle scenario's over de gehele lengte dezelfde ruwheid heeft. In werkelijkheid is dit niet zo. Omdat de ruwheid van het zomerbed in 1374 slechts een aanname betreft wordt er een vaste waarde gebruikt.

7 Scenario's

Om de onzekerheid van de verschillende (invloedrijke) parameters in het model te kunnen schatten wordt er gewerkt met scenario's. Allereerst wordt een basismodel verkregen dat de meest waarschijnlijke situatie van het modelgebied in 1374 beschrijft. De andere scenario's beschrijven andere mogelijke situaties. Dit kunnen realistische, maar ook niet-realistische situaties zijn. Door gebruik te maken van scenario's kan de invloed van bepaalde parameters worden geschat. Door deze scenario's toe te passen, wordt er een bandbreedte van de afvoer bepaald waartussen de werkelijke afvoer zeer waarschijnlijk heeft gezeten. Hoe breder deze bandbreedte is, hoe meer onzekerheid er is betreffende de afvoer die opgetreden is ten tijde van het hoogwater. In dit onderzoek wordt gewerkt met scenario's op het gebied van de historische ruwheden, dijkhoogtes en laterale instroompunten.

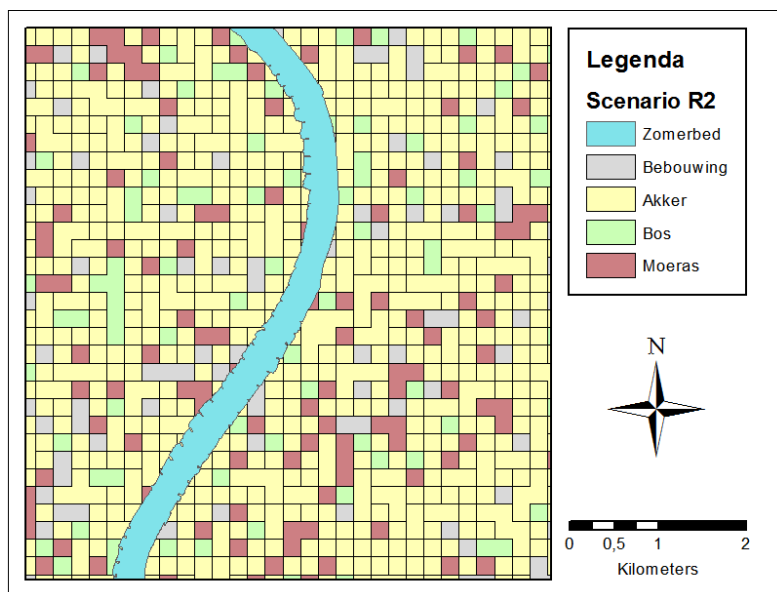
7.1 Scenario's historische ruwheden

Met behulp van de hiervoor genoemde percentages landgebruik (hoofdstuk 6) zijn er verschillende scenario's voor de ruwheid gemaakt. De scenario's zijn opgedeeld in twee categorieën. De eerste categorie bevat een random scenario. In dit scenario is gewerkt met de percentages van het landgebruik. Deze zijn geheel random verdeeld over het winterbed. Dit is zichtbaar in figuur 13. Om deze random verdeling te kunnen maken is het winterbed opgedeeld in cellen van 4 hectare. Aan deze cellen wordt random een ruwheid gekoppeld waarbij de percentages zoals deze in tabel 7 staan worden aangehouden.

Tabel 7: Random scenario

	Percentage	Oppervlak [ha]
Akker	70%	132.505
Bos	10%	18.929
Moeras	10%	18.929
Bebouwd	10%	18.929
Water		10.060

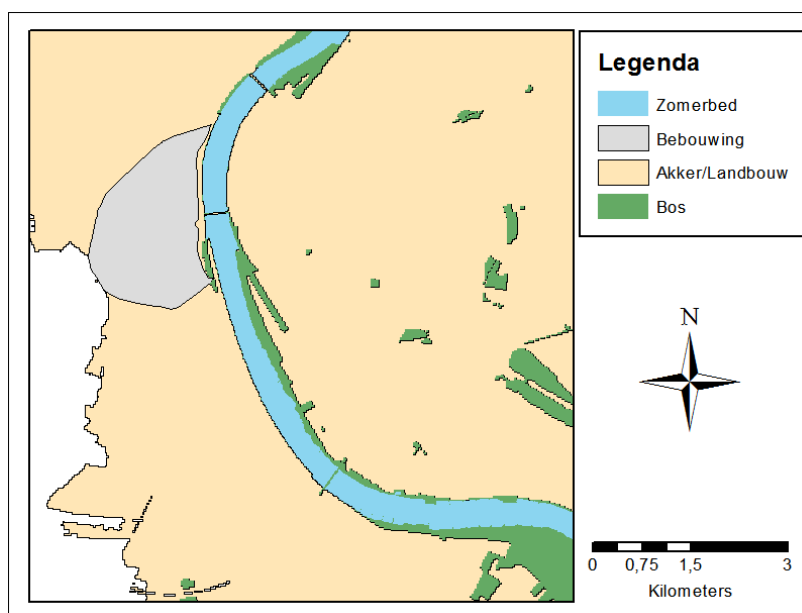
Ondanks dat het random scenario geen realistische situatie beschrijft, geeft dit toch een indicatie van de invloed van de ruwheid op de afvoer die optreedt. Deze kennis kan als verdere indicatie fungeren over de betrouwbaarheid van de gevonden afvoer in het basisscenario.



Figuur 13: Uitsnede random ruwheidsscenario

De tweede categorie bestaat uit scenario's die gebaseerd zijn op een koppeling tussen landgebruik en relatieve hoogte. In deze context wordt relatieve hoogte gezien als de hoogte relatief gezien ten opzichte van de rivier. De precieze werkwijze om deze relatieve hoogte te bepalen wordt verder beschreven in Bijlage D. Op basis van gemaakte aannames is deze relatieve hoogte vervolgens gebruikt om ruwheden te koppelen aan de verschillende gebieden in het model. Er is gekozen om een ruw en een glad scenario te maken op deze manier.

Algemeen wordt aangenomen dat de hoger gelegen gronden (relatieve hoogte van circa -5 meter tot +45 meter) in die tijd naast bebouwde gronden ook als landbouwgronden werden gebruikt. Dit door het lagere risico op overstromingen en doordat deze gronden niet drassig zijn. Daarnaast is aangenomen dat lagere gronden bestaan uit bossen en moeras. Aan gebieden die hoger gelegen waren, is bos toegekend.



Figuur 14: Op hoogte gebaseerd ruwheidsscenario

Er is voor gekozen om vast te houden aan vaste percentages voor landbouw, bos en moeras, gebaseerd op historische kaarten (tabel 6). Deze percentages gelden ook in deze categorie voor de oppervlakte die niet bij bebouwing of water hoort. Bebouwing zal aan de hand van kaarten zo goed mogelijk worden gemodelleerd. Dit houdt in dat de bebouwing van de kaarten af, op de juiste locaties, zal worden ingetekend. Op deze wijze worden er vlakken aan het landgebruik bebouwing toegekend.

Tabel 8: Scenario's gebaseerd op relatieve hoogte

Scenario Basis	Percentage	Oppervlak [ha]
Akker	80%	151.435
Bos	10%	18.929
Moeras	10%	18.929
Bebouwing		664
Water		10.060
Scenario Ruw	Percentage	Oppervlak [ha]
Akker	80%	151.435
Bos	20%	37.859
Bebouwing		664
Water		10.060
Scenario Glad	Percentage	Oppervlak [ha]
Oever		39.288
Akker	80%	120.004
Bos	20%	30.001
Bebouwing		664
Water		10.060

7.2 Scenario's historische dijkligging

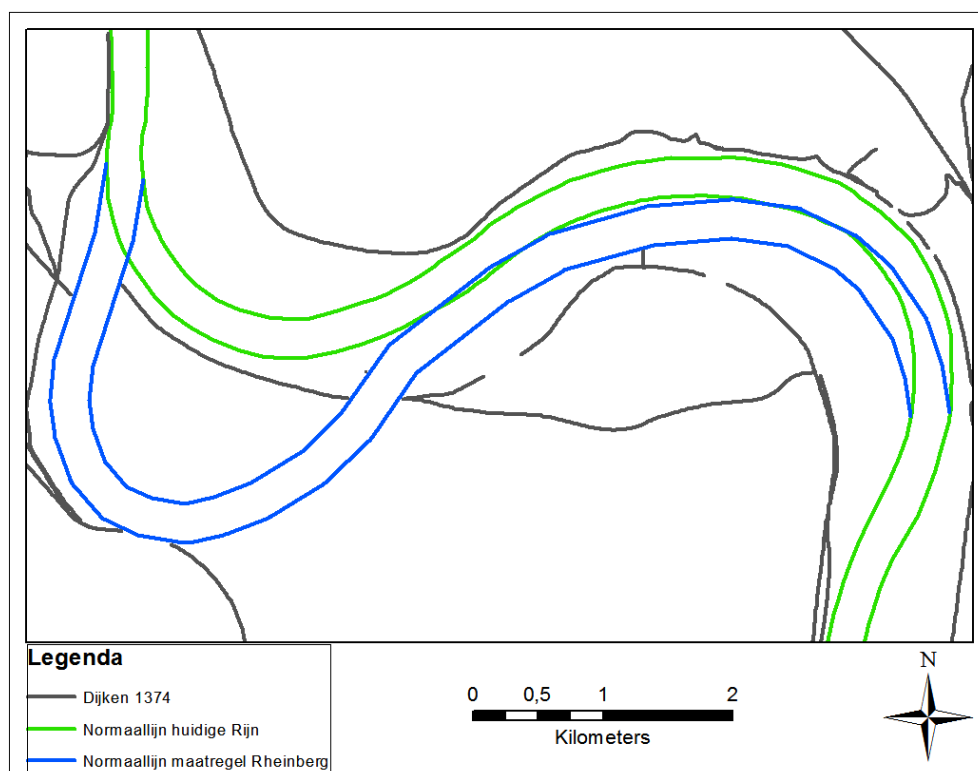
De oudste gedocumenteerde dijkvoorschriften in het gebied van de Nederrijn stammen uit de 13^e eeuw. Dijken en dijkbescherming waren toen nog een lokale aangelegenheid van de bevolking. Dit duurde tot het midden van de 18^e eeuw. Pas toen werd de dijkbescherming ondergebracht bij de regering (Stadt Duisburg, z.j.; Bezirksregierung Düsseldorf, 2007;2010).

Omdat er geen gegevens zijn over de ligging van de dijken in 1374 is het onmogelijk om op basis hiervan realistische scenario's te maken. Daarom wordt aangenomen dat de dijken op dezelfde locaties gelegen waren als vandaag de dag het geval is. Dit is een veilige aanname omdat de dijken de rivier de bewegingsvrijheid ontnemen (dijkdoorbraken buiten beschouwing gelaten). Doordat er geen enkele informatie is over de dijken in de middeleeuwen wordt daar waar de huidige dijken doorkruist worden door de historische loop de dijk verwijderd (zie ook figuur 15). Dit is een aanname die het directe gevolg is van het gebrek aan bruikbare informatie over dijklocaties en dijken waren toen waarschijnlijk ook niet continu. Wat betreft de hoogte moet er ook volstaan worden met het maken van aannames. Het is aan te nemen dat de dijken minder hoog waren dan in de huidige situatie. Er worden twee scenario's aangenomen. Deze worden gepresenteerd in tabel 9.

Tabel 9: Dijkscenario's

Dijkscenario	Eigenschap
DBASIS	$\frac{1}{3}$ * huidige hoogte
GeenDijk	Geen dijkhoogte

De uitvoer van deze dijkscenario's geven aan welke invloed de dijktoestand uitoefent op de afvoer die Lobith bereikt.



Figuur 15: De doorsnijding van dijken

7.3 Scenario's laterale instroompunten

Voor de laterale instroompunten worden ook scenario's uitgewerkt. Het worstcasescenario voor de laterale punten is als de hoge afvoer van de zijrivier samenvalt met de piek van de afvoergolf van het hoogwater op de Rijn. De kans dat dit voorkomt is erg klein. Dit scenario is van veel externe invloeden afhankelijk. Allereerst moet er in alle deelstroomgebieden sprake zijn van een vergelijkbaar extreme gebeurtenis. Dit is afgaande op Silva (2002) de afgelopen 1000 jaar niet voorgekomen. Dit sluit niet uit dat een dergelijke situatie in 1374 niet is voorgekomen, het legt enkel de nadruk op de kleine kans.

In het extreme scenario wordt aangenomen dat een dergelijk extreme gebeurtenis wel optreedt. Dit houdt in dat er een hoge uniforme afvoer bij de laterale punten wordt gemodelleerd. Dit samen met de hoge afvoergolf in de Rijn geeft een worstcasesituatie wat betreft het aantal kubieke meters water dat per seconde afgevoerd wordt.

Het basisscenario zal worden gesimuleerd zonder laterale inlaatpunten. Daarnaast wordt het extreme scenario gesimuleerd. Dit wordt gedaan om de invloed van deze laterale punten te onderzoeken. De laterale scenario's worden samengevat in tabel 10.

Tabel 10: Scenario's laterale punten

Zijrivieren	Scenario Lat_Basis	Scenario Lat_Hoog
Wupper	Geen afvoer	168
Erft	Geen afvoer	182
Ruhr	Geen afvoer	723
Emscher	Geen afvoer	100
Lippe	Geen afvoer	317

Deze piekafvoeren zijn afkomstig uit data die gebruikt zijn het onderzoek Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Niederrhein (Lammersen, 2004). Op basis van 30 jaar meteorologische gegevens van het stroomgebied van de Rijn zijn er 1000 jaar neerslaggegevens gegenereerd. Met behulp van een neerslagafvoermodel is er vervolgens de conversie gemaakt van 1000 jaar neerslag naar 1000 jaar afvoer. Uit deze data is de meest extreme laterale toestroming gekozen. Deze is vervolgens als stationaire toestroming aan het model toegevoegd.

Wanneer de waarden in deze tabel vergeleken worden met de waarden in Silva (2002) en Eberle et al. (2004) valt op dat de waarden van de gebruikte toestroming in dit scenario voor alle zijrivieren behalve voor de Erft lager zijn dan de hoogst gemeten waarde in de periode 1880 tot 1999.

7.4 Gesimuleerde scenario's

In deze paragraaf wordt een korte opsomming gegeven van de verschillende modellen die gesimuleerd zijn. Deze modellen zijn samengesteld uit de verschillende scenario's die hiervoor zijn genoemd. Zoals ook genoemd in de introductie van dit hoofdstuk zijn er scenario's opgesteld voor de ruwheid, dijkhoogten en de laterale instroompunten.

Model	Ruwheid	Dijken	Laterale toestroming
Basismodel	Scenario Basis	DBASIS	Lat_Basis
Ruwheidsmodel Random	Scenario Random	DBASIS	Lat_Basis
Ruwheidsmodel ruw	Scenario Ruw	DBASIS	Lat_Basis
Ruwheidsmodel glad	Scenario Glad	DBASIS	Lat_Basis
Scenario Geen dijk	Scenario Basis	GeenDijk	Lat_Basis
Scenario Geen dijk + lateralen	Scenario Basis	GeenDijk	Lat_Hoog

8 Afvoer van de Rijn nabij Keulen in 1374

Dit hoofdstuk richt zich op de afvoer die bij Keulen is opgetreden als gevolg van het hoogwater en geeft antwoord op de eerste onderzoeksvraag (zie hoofdstuk 1.2). Allereerst wordt de werkwijze uiteengezet, gevolgd door de resultaten en de hier bijbehorende conclusies.

8.1 Werkwijze en aannames

Om de afvoer bij Keulen te bepalen, is er een stationaire berekening toegepast. Deze stationaire berekening houdt in dat er een constante afvoer instroomt bij de bovengrens van het model bij Andernach. Deze afvoer geeft een waterstand bij meetstation Keulen. Voor deze methode is aangenomen dat meetstation Keulen representatief is voor de locatie waar de waterstand in 1374 is gemeten. De afvoer is stationair bij Andernach na een dag. De eerste dag loopt de afvoer op van 2564 m³/s tot de uiteindelijke stationaire afvoer bij Andernach. Er is gekozen voor een oplopende afvoer om er zeker van te zijn dat het model stabiel blijft tijdens de simulatie.

Om tot de juiste afvoer te komen, is er gebruik gemaakt van trial-and-error. Door steeds een inschatting te maken van de afvoer en deze bij te stellen naar aanleiding van de resultaten is er geconvergeerd naar de afvoer die de gemeten waterstand in Keulen geeft. Het bijstellen van de afvoer is gedaan in stappen van 100 m³/s bij de modelrand bij Andernach. Voor de waterstand wordt een foutmarge van 10 centimeter aangehouden. Wanneer de gevonden waterstand binnen deze marge valt, wordt dit als de juiste waterstand aangenomen. De meest waarschijnlijke afvoer wordt bepaald met behulp van het basisscenario. De onzekerheid in deze afvoer wordt bepaald met de scenario's. Hierin worden alleen de ruwheidsscenario's en het dijkscenario meegenomen. Het laterale toestroomscenario wordt hierin niet meegenomen omdat de lateralen geen significante invloed hebben op de waterstand bij Keulen.

8.2 Resultaten

In deze paragraaf worden de resultaten van de hiervoor besproken werkwijze gepresenteerd. Deze werkwijze heeft geresulteerd in vijf verschillende afvoeren. Al deze afvoeren resulteren in een waterstand die binnen de foutmarge van 10 centimeter valt. Deze zijn gepresenteerd in tabel 11.

Zoals blijkt uit tabel 11 geeft het basisscenario een afvoer van 19.497 m³/s voor het hoogwater van 1374. De bandbreedte die hieraan gegeven wordt door de scenario's is 2.683 m³/s, wat overeenkomt met een bandbreedte van ongeveer 15%. Echter in alle gevallen overschrijden deze afvoeren de grens van 18.000 m³/s.

Tabel 11: Resultaten bij Keulen

Model	Afvoer [m ³ /s]	Bijbehorende waterstand [m+NAP]
Basismodel	19.497	49,33
Ruwheidsscenario Ruw	18.520	49,35
Ruwheidsscenario Glad	19.040	49,35
Ruwheidsscenario Random	20.126	49,28
Scenario Geen Dijken	21.203	49,28

De verschillen in de gesimuleerde afvoeren tussen de verschillende ruwheidsscenario's is procentueel erg klein. Hoe hoger de ruwheid, hoe lager de afvoer horend bij de waterstand van 49.30 m + NAP is. De bandbreedte van de afvoer als gevolg van de variatie in de ruwheden is circa 1600 m³/s. Dit komt neer op ongeveer 8% van de afvoer die gesimuleerd wordt in het basismodel. De bandbreedte als gevolg van het verwijderen van alle dijken resulteert in een bandbreedte van circa 9% van de afvoer die in het basismodel wordt gesimuleerd.

Ondanks dat onder andere Toonen et al. (2012) hebben aangetoond dat er een grote onzekerheid in de ruwheid schuilt, is dat uit deze simulaties niet overduidelijk gebleken. In zekere zin is dit verklaarbaar. De invloed van de ruwheid van de bodem wordt steeds kleiner naarmate de afvoer hoger wordt (Knighton, 1998). Bij een dergelijk extreem hoogwater treden er ook extreme waterstanden op, waardoor de ruwheid invloed verliest. Echter maken Herget en Meurs gebruik van een andere methode om de ruwheid te schatten. Deze methode bevat meerdere schattingen van ruwheden die samengevoegd worden tot een gemiddelde ruwheid, terwijl in dit onderzoek de ruwheid gekoppeld wordt aan het type landgebruik. De verschillen tussen de resultaten van de op relatieve hoogte gebaseerde ruwheidsscenario's zijn erg klein.

De invloed van de dijken is erg logisch. Dijken begrenzen de rivier, waardoor deze minder ruimte heeft om water te stallen. Hierdoor stuwt het water op totdat de dijken overstromen. Wanneer er geen dijken zijn, zal er direct een groot gebied langzaam volstromen en is er meer water nodig om de waterstand uit 1374 te benaderen.

Deze afvoeren verschillen significant met de afvoer die Herget en Meurs (2009) gevonden hebben in hun onderzoek. De afvoer die deze auteurs voor het hoogwater van 1374 hebben gevonden, is 23.800 m³/s. Dit is een afvoer die 22% hoger ligt dan de in dit onderzoek gevonden afvoer. De onzekerheden in het onderzoek van Herget en Meurs (2009) resulteren in een bandbreedte die loopt van 18.800 m³/s tot 29.000 m³/s. De afvoeren die in dit onderzoek gevonden zijn, vallen binnen deze bandbreedte, behalve de afvoer in het ruwheidsscenario Ruw. De in dit onderzoek gevonden afvoeren bevinden zich aan de onderzijde van de door Herget en Meurs (2009) gevonden bandbreedte. De verschillen tussen de meest waarschijnlijke afvoeren van beide onderzoeken worden veroorzaakt door de verschillende aannames en door de verschillende methodes die gehanteerd zijn in beide onderzoeken. Deze verschillen worden verder behandeld in hoofdstuk 12.2.

Ondanks deze onzekerheden kan de conclusie worden getrokken dat alle scenario's resulteren in een afvoer die de grens van 18.000 m³/s overschrijdt.

9 Afvoer bij Lobith in 1374

Dit hoofdstuk gaat dieper in op de afvoer bij Lobith in 1374. In dit hoofdstuk wordt net als in hoofdstuk 8 begonnen met de werkwijze en aannames om daarna de resultaten te presenteren.

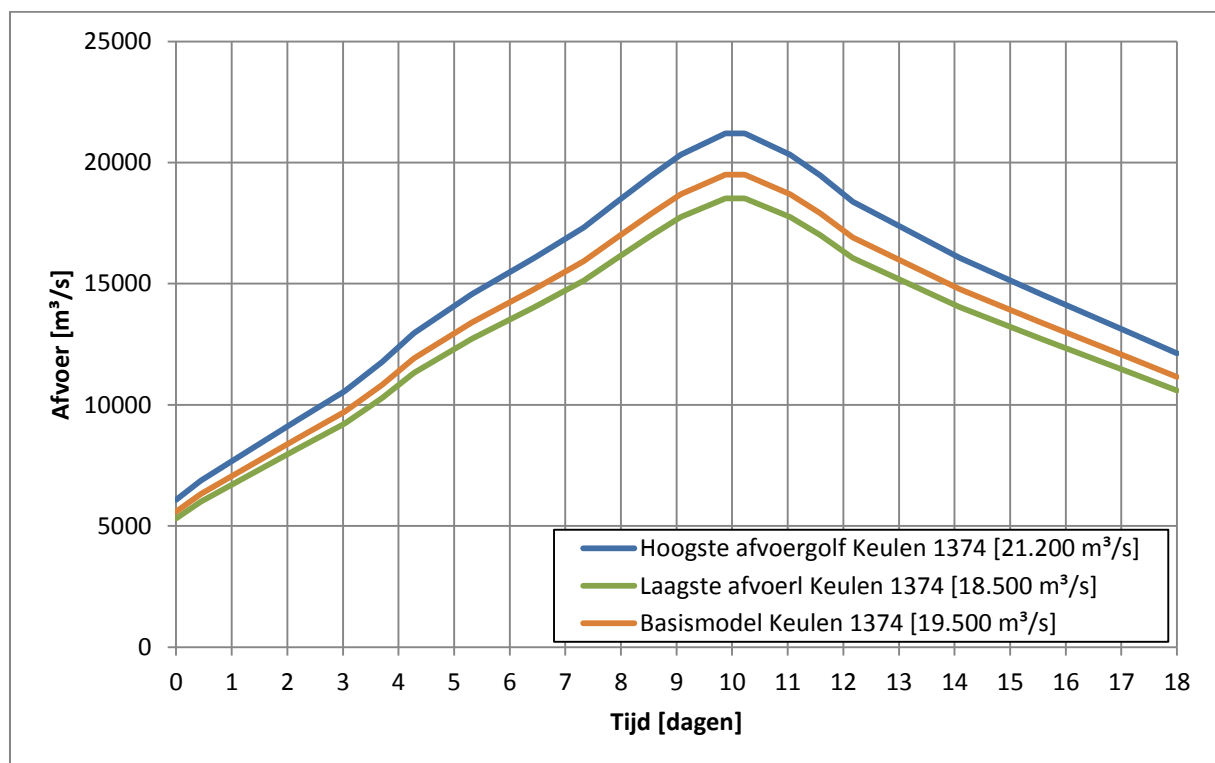
9.1 Werkwijze, randvoorwaarden en aannames

Om de afvoer bij Lobith in 1374 te kunnen bepalen is er gebruikgemaakt van een niet-stationaire berekening. Het toepassen van een stationaire berekening was voor deze situatie niet bruikbaar, omdat in een stationaire toestand de afvoer bij Lobith gelijk is aan de afvoer bij Keulen.

Omdat er geen gegevens zijn van de precieze afvoergolf uit 1374 is er gebruikgemaakt van een standaardgolf. Om deze te krijgen is de standaardgolf van 18.000 m³/s opgeschaald. Deze standaardgolf wordt normaliter gebruikt als invoer van het deltamodel om een afvoer van 18.000 m³/s bij Lobith te genereren (Schielen, 2013) en duurt 18 dagen. De gebruikte (opgeschaalde) golven zijn gepresenteerd in figuur 17. Het betreft hier de hoogste en laagste en de basisafvoer van de situatie in 1374. Deze afvoergolven worden als randvoorwaarde opgegeven aan de bovenrand (bij Andernach) van het model. Dit opschalen is gedaan door een factor te gebruiken. Deze factor wordt berekend met behulp van vergelijking 1.

$$factor = \frac{\text{Afvoer nabij Keulen in 1374}}{18.000} \quad \text{Vergelijking 1}$$

Er had ook gekozen kunnen worden voor een opgeschaalde vorm van de afvoergolf zoals gebruikt in het onderzoek "Grensoverschrijdende effecten" (Lammersen, 2004). Dit betreft echter golven van 28 dagen. Dit heeft vergaande gevolgen voor de rekentijd van het model. Hierdoor is er gekozen om gebruik te maken van de kortere standaardafvoergolf.



Figuur 16: Gebruikte afvoergolven voor de simulaties huidige situatie

Voor de bepaling van de afvoer bij Lobith is er naast de hoogste afvoergolf bij Keulen ook gebruikgemaakt van laterale toestroming. Voor de gevolgen voor de afvoer bij Lobith wordt uitgegaan van het meetstation Wesel en niet van meetstation Lobith. De reden hiervoor is dat het model na Wesel een flessenhals is, waarbij het modelgebied erg smal wordt. Hierdoor kunnen overstromingen in dat gebied niet goed meegenomen worden. Aangenomen wordt dat door de korte afstand tussen beide meetstations de afvoeren bij Wesel weinig zullen verschillen met de afvoeren bij Lobith tijdens een echt hoogwater.

9.2 Afvoerresultaten

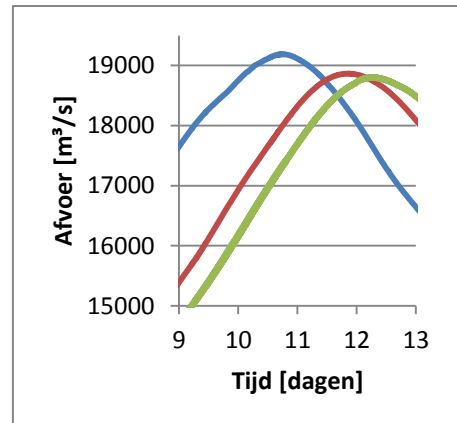
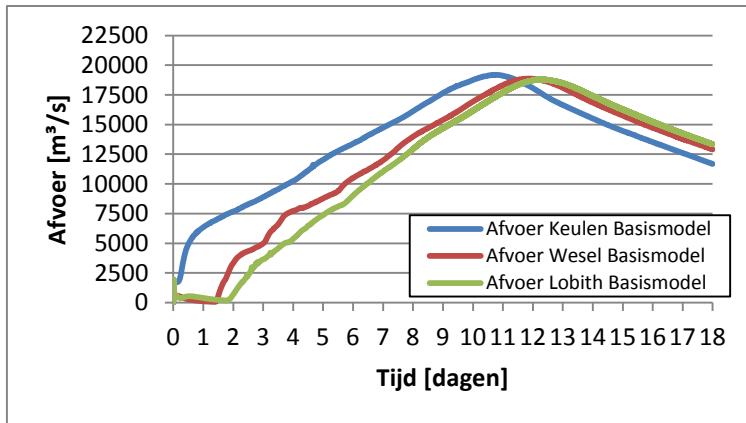
In deze paragraaf worden de afvoerresultaten van de voorgaande werkwijze beschreven. Bij de beschrijving van de resultaten wordt gefocust op de hoogste (horend bij scenario Geen Dijken) en laagste afvoer (horend bij scenario Ruw) die in 1374 bij Keulen zijn opgetreden. Deze veroorzaken eveneens de laagste afvoeren bij Wesel. Hiermee wordt eveneens de bandbreedte bepaald in deze afvoer. De piekafvoeren bij Wesel worden gepresenteerd in tabel 12.

Tabel 12: Piekafvoer bij Wesel en Lobith in de situatie 1374

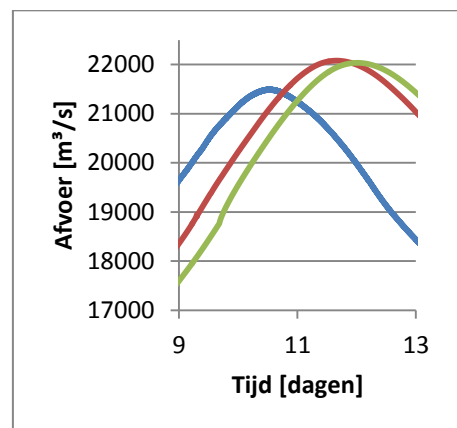
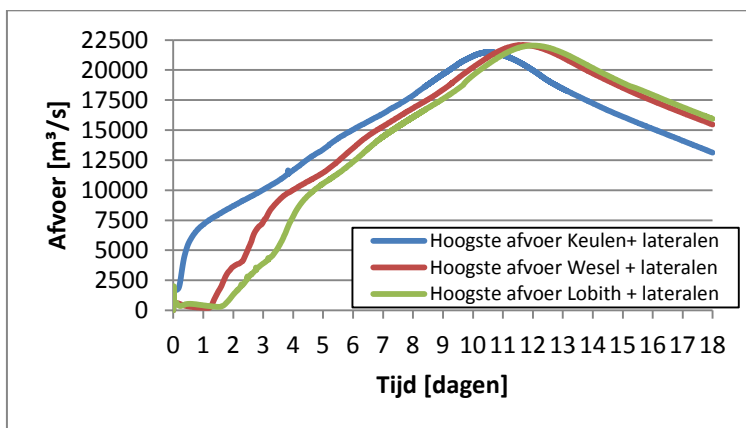
Afvoerscenario	Afvoer Wesel	Afvoer Lobith
	[m ³ /s]	[m ³ /s]
Basismodel	18.865	18.808
Hoogste afvoer plus laterale toestroming	22.080	22.035
Laagste afvoer	17.882	17.821

Het blijkt dat het van de scenariokeuze afhangt of er een afvoer bij Wesel (dan wel Lobith) optreedt die de grens van 18.000 m³/s overschrijdt. De hoogste afvoer bij Keulen is 21.203 m³/s (zie hoofdstuk 8.2), terwijl de hoogste afvoer bij Wesel 22.080 m³/s is. Tussen Keulen en Wesel wordt er door de laterale toestroming 1.490 m³/s toegevoegd (zie hoofdstuk 7.3). Wanneer geen water geborgen wordt in het gebied tussen Keulen en Wesel zou de afvoer bij Wesel 22.693 m³/s zijn (afvoer bij Keulen plus laterale toestroming). Hiervan uitgaande blijkt dat de afvoer ongeveer 610 m³/s afneemt tussen Keulen en Wesel. Dit is gepresenteerd in figuur 17 en figuur 18. In deze figuren is zichtbaar dat de afvoergolf afvlakt in de tijd. Dit is een gecombineerde invloed van het verliezen van energie en het achterblijven van water in het winterbed en het binnendijkse gebied. Wanneer in een gebied tussen Keulen en Wesel de afvoer afneemt met circa 600 m³/s is het niet waarschijnlijk dat er een grote hoeveelheid afvoer achterblijft in het gebied tussen Wesel en Lobith. Dit blijkt ook uit tabel 12. Hierin is meegenomen dat er water via stromen over de oppervlakte bij Lobith komt, echter hierin is niet meegenomen hoeveel water Lobith nooit bereikt door stromen in het winterbed en het binnendijkse gebied. Wel kan worden waargenomen dat de piekafvoer tussen Wesel en Lobith afneemt (zonder overstromingen meegenomen) met circa 60 m³/s.

Het is niet waarschijnlijk dat er in de situatie van 1374 dusdanig veel water achter is gebleven in het gebied tussen Wesel en Lobith, zodat er geen afvoer hoger dan 18.000 m³/s heeft kunnen optreden bij Lobith. Belangrijk hierbij is dat er niet bekend is hoeveel water bijvoorbeeld door de Oude IJssel of oppervlakte afstroming naar elders is afgevoerd.



Figuur 17: Verplaatsing van de afvoergolf door de Rijn in het basismodel met rechts een uitsnede van de piekafvoeren



Figuur 18: Verplaatsing van de afvoergolf door de Rijn in het scenario met de hoogste afvoer plus lateralen met rechts een uitsnede van de piekafvoeren

10 De Niederrhein in 2020

Niet alleen in Nederland, maar ook in Duitsland worden er maatregelen getroffen om ook in de toekomst beschermd te zijn tegen het water dat door de Rijn wordt afgevoerd. Hoofdstuk 2 beschrijft de manier waarop deze hoogwaterbescherming in Duitsland in het verleden is geregeld. In dit hoofdstuk zal behandeld worden op welke wijze Duitsland de hoogwaterbescherming aanpast om deze aan de huidige afvoerverwachtingen te laten voldoen.

10.1 Vernieuwde maatgevende afvoeren

In 2003 is er door het Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV-NRW) aan de Regierungsbezirk Köln en Düsseldorf een nieuw voorstel met betrekking tot de herziening van de maatgevende afvoer in Noordrijn-Westfalen voorgelegd (MUNLV-NRW, 2003).

Volgens dit voorstel dienen de waterkeringen in de toekomst berekend te worden met andere maatgevende afvoeren dan voorheen het geval is geweest. Verder moeten er bij aarden dijken een waakhogte van één meter worden toegepast. Bij dijken die onderhevig zijn aan directe mijnzakking dient anderhalve meter in acht genomen te worden. Dit heeft effect op de maximale afvoer. De maatgevende afvoeren zijn beschreven in tabel 13.

Tabel 13: Maatgevende afvoeren van de Rijn, geplande toestand 2020 (MUNLV-NRW, 2003; Lammersen, 2004)

Meetstation	Herhalingsfrequentie [jaren]	Maatgevende afvoer [m^3/s]	Maatgevend afvoer inclusief waakhogte [m^3/s]
Bonn	200	12600	14500
Köln	200	12900	14800
Düsseldorf	200	12900	14900
Ruhrort	500	14200	17100
Wesel	500	14800	17500
Rees	500	14700	17700
Emmerich	500	14500	17500
Lobith	1250	16000	n.v.t. ¹

¹ In Nederland wordt niet gewerkt met kerende waakhogtes

10.2 Maatregelen tot 2020 langs de Niederrhein

Er worden meerdere maatregelen langs de Niederrhein genomen om te voldoen aan de nieuwe maatgevende afvoeren voor 2020. In de verschillende documenten worden vele mogelijke maatregelen genoemd. Veel van deze documenten spreken elkaar tegen over het feit welke maatregelen uitgevoerd worden en in welke uitvoering dit zal gebeuren. In het document Hochwasserschutzkonzept Nordrhein-Westfalen (MUNLV-NRW, 2006) en het Umweltbericht Nordrhein-Westfalen (MUNLV-NRW, 2009) staan maatregelen die zijn uitgevoerd of worden uitgevoerd voor 2020. Aangenomen wordt dat het model voor deze maatregelen moet worden veranderd, voor zover deze maatregelen nog niet in het model aanwezig zijn.

Deze maatregelen omvatten dijkverhogingen, dijkverleggingen en de aanleg van retentiegebieden. De retentiegebieden die aangelegd worden, bestaan uit ongestuurde en gestuurde retentiegebieden. In dit onderzoek is enkel rekening gehouden met de ongestuurde retentiegebieden. Dit omdat het onbekend is of deze retentiegebieden handmatig worden ingezet of automatisch. Een ongestuurd retentiegebied wordt hier gedefinieerd als een retentiegebied met een vaste overlaat. Een gestuurd retentiegebied wordt gedefinieerd als een retentiegebied met een overlaat die door een menselijke beslissing dan wel een beslissing door een computer op basis van data wordt verlaagd, waardoor het water het retentiegebied instroomt.

Wanneer een retentiegebied gestuurd wordt door een computer is met zekerheid te stellen met welke waterstand dit retentiegebied opengesteld wordt. Als echter een menselijke beslissing aan de opening vooraf gaat, wordt het onzeker of en wanneer het retentiegebied wordt ingezet en in welke mate het gebied optimaal wordt ingezet. Hierdoor is ervan uitgegaan dat deze gebieden niet ingezet worden. Op deze wijze wordt een meest extreem scenario voor de afvoer bij Lobith geschetst.

De uitgebreide beschrijving van de retentiegebieden met verdere specificaties zijn gegeven in Bijlage E.

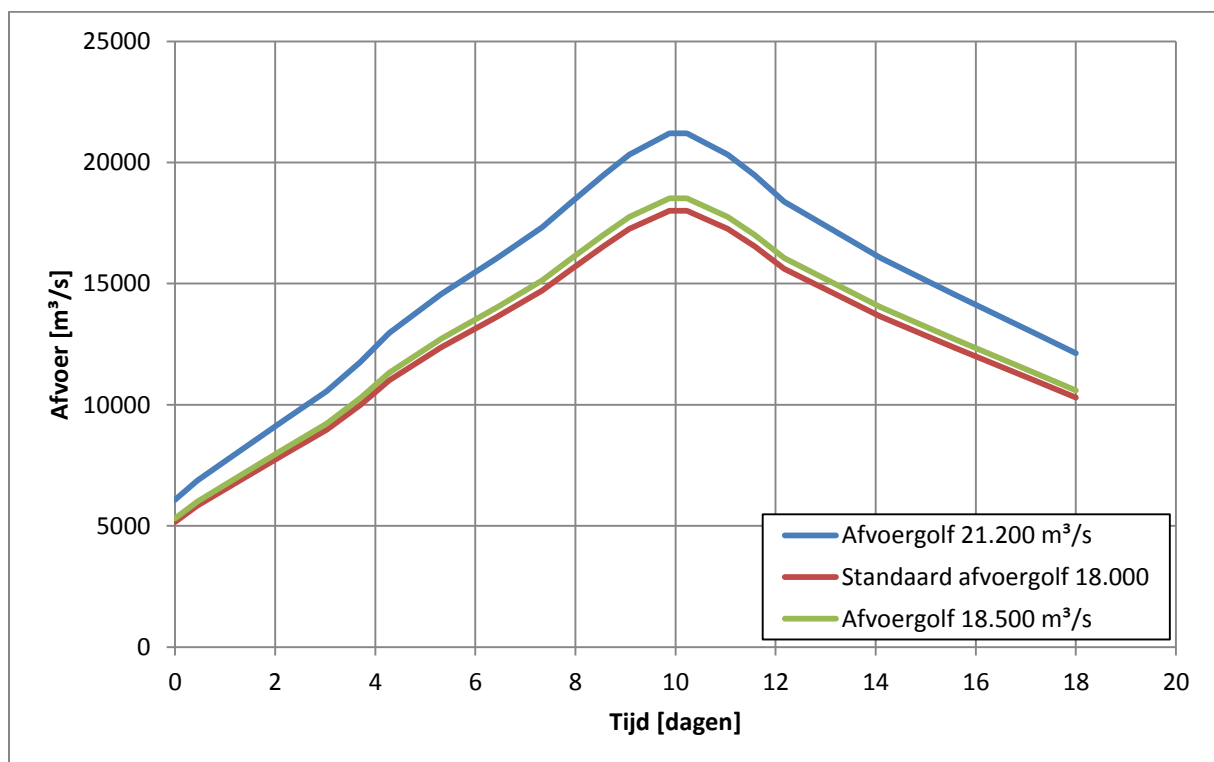
11 De gevolgen van het hoogwater 1374 in de huidige situatie

In dit hoofdstuk wordt besproken welke gevolgen een hoogwater vergelijkbaar met het hoogwater uit 1374 zou hebben als dat in de huidige situatie zou plaatsvinden. Deze gevolgen worden toegespitst op welke afvoeren er bij Keulen en Lobith kunnen optreden en er wordt een inschatting gemaakt van de overstromingen langs de Niederrhein en de gevolgen hiervan. Dit sluit aan op de tweede onderzoeksvraag (zie hoofdstuk 1.2).

11.1 Werkwijze en aannames

De laagste gevonden afvoer (in hoofdstuk 8) en de hoogste afvoer plus laterale toestroming (de laterale toestroming is benoemd in hoofdstuk 7.3) worden gebruikt om de gevolgen in de hedendaagse situatie te simuleren.

Net als voor de afvoer bij Lobith in 1374 (beschreven in hoofdstuk 9) is er ook nu gerekend met een opgeschaalde standaardgolf. De redenering hiervoor is dezelfde zoals beschreven in hoofdstuk 9.1. De gebruikte (opgeschaalde) golven zijn gepresenteerd in figuur 19.



Figuur 19: Gebruikte afvoergolven voor de simulaties huidige situatie

Beide golven zijn vervolgens in het huidige model gesimuleerd (aangepast met de maatregelen die beschreven zijn in hoofdstuk 10).

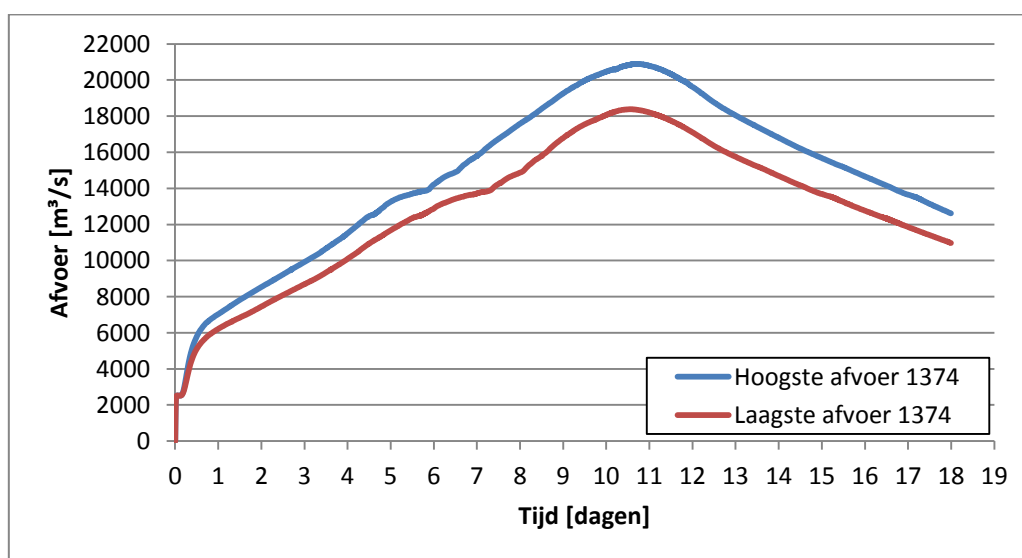
Voor de gevolgen voor de afvoer in Nederland wordt, net als in hoofdstuk 9, uitgegaan van het meetstation Wesel en niet van meetstation Lobith. Voor de analyse van de overstromingen in het gebied zullen twee relevante doorsneden gemaakt worden. Een doorsnede bij Keulen en een doorsnede bij Wesel.

11.2 Afvoerresultaten

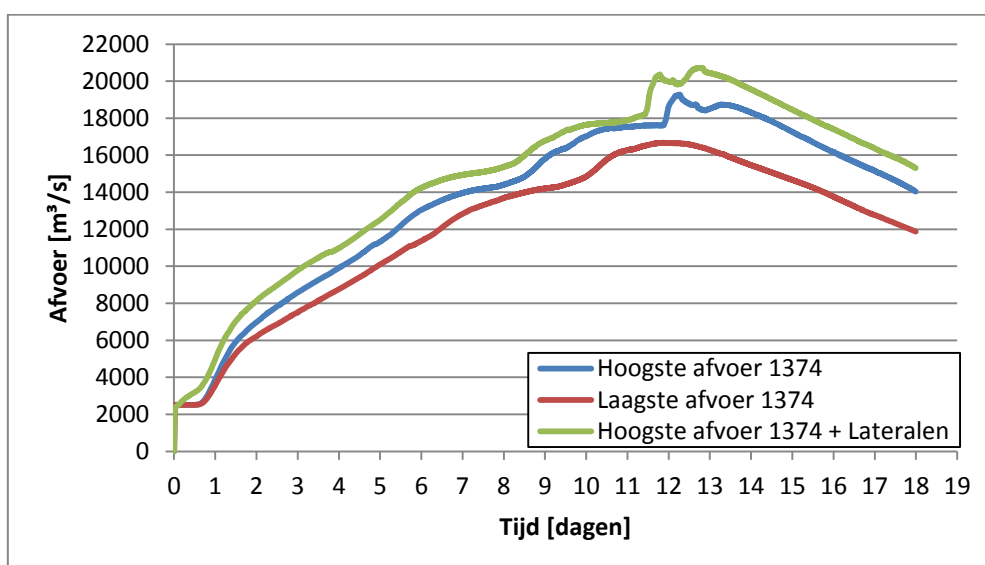
In deze paragraaf worden de resultaten van het hoogwater in de huidige situatie besproken. De werkwijze heeft geresulteerd in drie verschillende simulaties die de gevolgen van het hoogwater in de huidige situatie simuleren. De afvoerresultaten bij Keulen en Wesel zijn gepresenteerd in tabel 14, figuur 20 en figuur 21.

Tabel 14: Resultaten in de huidige situatie

	Hoogste afvoer [m ³ /s]	Laagste afvoer [m ³ /s]	Hoogste afvoer + Lateralen [m ³ /s]
Keulen	20.892	18.381	20.897
Wesel	19.277	16.672	20.719
Verschil	1.615	1.709	178

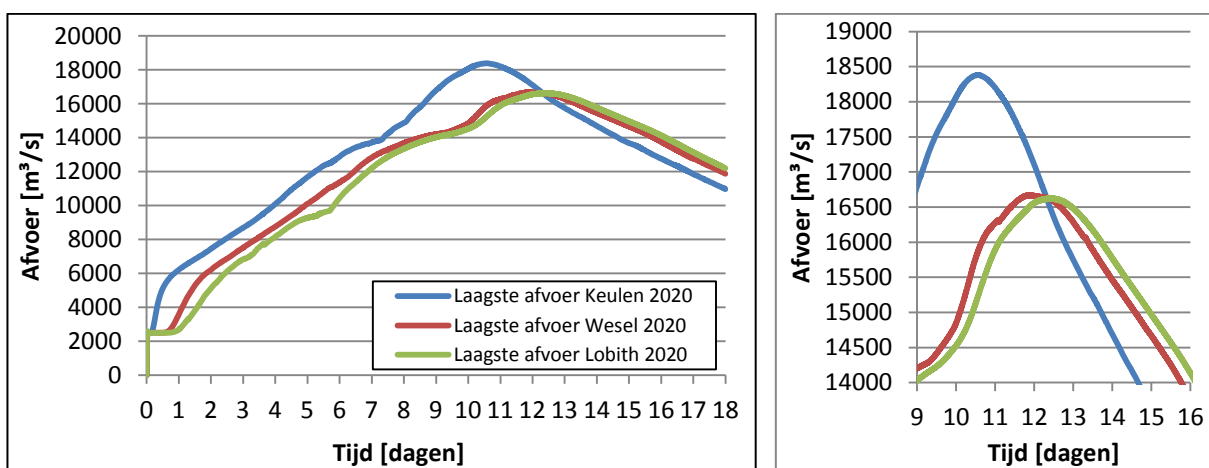


Figuur 20: Afvoer bij Keulen in de situatie 2020

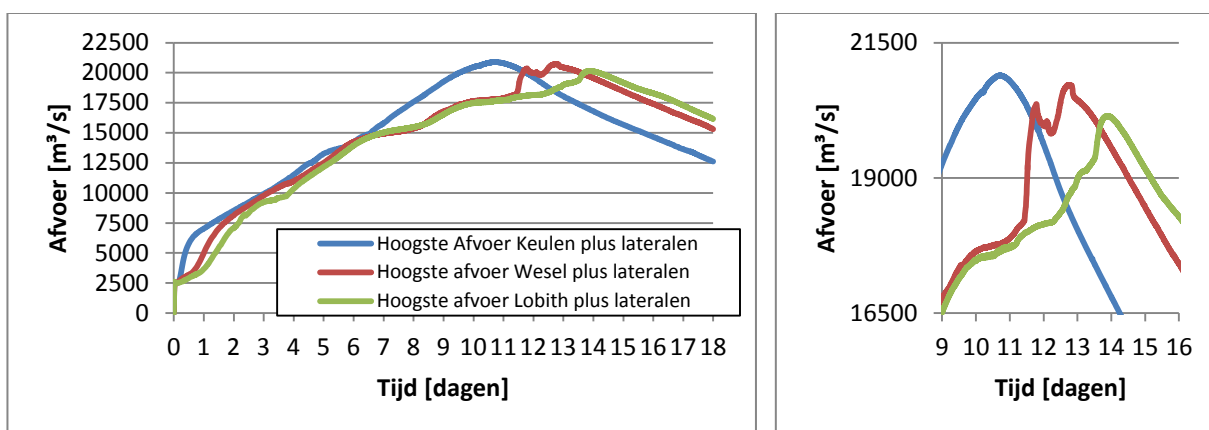


Figuur 21: Afvoer bij Wesel in de situatie 2020

Opvallend aan deze figuren is dat in alle scenario's bij Keulen ook in de huidige situatie een afvoer optreedt die hoger is dan 18.000 m³/s. Wanneer echter naar de afvoer bij Wesel wordt gekeken, blijkt dat deze enkel bij de extreme scenario's boven de grens van 18.000 m³/s uitkomen. Wat verder zichtbaar is in figuur 20 is dat deze de vorm van de invoer nog goed volgt. De piek van deze afvoergolf is maar enkele uren later dan de piek van de invoer. In figuur 21 echter is de vorm van de golf anders. De piek van de golf is ingezakt. De piek van deze golf komt ook enkele dagen later. Dit is logisch doordat het water enkele dagen nodig heeft om de afstand te overbruggen. Deze tijd is ongeveer twee dagen, afgaande op de grafiek. Dit komt overeen met de reistijd die wordt weergegeven op figuur 2 (pagina 22). Deze effecten worden benadrukt in figuur 22 en figuur 23. In deze figuren is duidelijk zichtbaar dat de golf afvlakt tussen Keulen en Wesel. Dit effect is veel minder zichtbaar tussen Wesel en Lobith. Dit komt door de veel kleinere afstand tussen beide meetpunten.



Figuur 22: Verplaatsing van de afvoergolf in de huidige situatie met rechts een uitsnede van de piekafvoeren



Figuur 23: Voorgang van de afvoergolf in de huidige situatie in het geval met de hoogste afvoer plus lateralen uit 1374 met rechts een uitsnede van de piekafvoeren

De plotselinge sprong in de afvoer bij Wesel op dag twaalf en dertien (zie figuur 21 en figuur 23) is het gevolg van overstromende dijken. Hierdoor wordt de afvoer bij Wesel ineens groter. Dit komt doordat Waqua de afvoer langs een lijn, even breed als het rekenrooster, berekent. Hierdoor worden de oppervlaktestromen ook meegenomen in de berekening van de afvoer.

Verder is zichtbaar in tabel 14 dat de toevoeging van lateralen geen significante invloed heeft op de afvoer bij Keulen. Echter, verder stroomafwaarts bij Wesel is de invloed duidelijk zichtbaar. Alle laterale toestromingen komen samen in de Rijn stroomopwaarts van Wesel. Het blijkt dat de laterale toestromingen de aftopping van de afvoergolf als gevolg van overstromingen bijna teniet doen.

Opvallend is dat de afvoeren in de huidige situatie lager zijn dan de afvoeren in 1374. Dit is gepresenteerd in tabel 15.

Tabel 15: Vergelijking van de bandbreedte van afvoeren in 1374 en in de huidige situatie

	Afvoeren in 1374 [m ³ /s]	Afvoeren in de huidige situatie [m ³ /s]
Keulen	18.520 – 21.203	18.381 – 20.897
Wesel	17.882 – 22.080	16.672 – 20.719

Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de verschillen in het winterbed en het binnendijkse gebied tussen beide situaties. De situatie in 1374 bevat veel minder hoge dijken en veel minder obstakels zoals bebouwing dan de huidige situatie. Hierdoor wordt er in de huidige situatie meer water geborgen in het winterbed en het binnendijkse gebied. Dit geborgen water heeft geen invloed meer op de situatie benedenstrooms. Verder is de verandering van de bodem sinds 1374 in de omgeving van Duisburg het grootste geweest (zie hoofdstuk 5.4), hierdoor zal er meer water geborgen worden in de omgeving Duisburg dan in 1374 het geval is geweest.

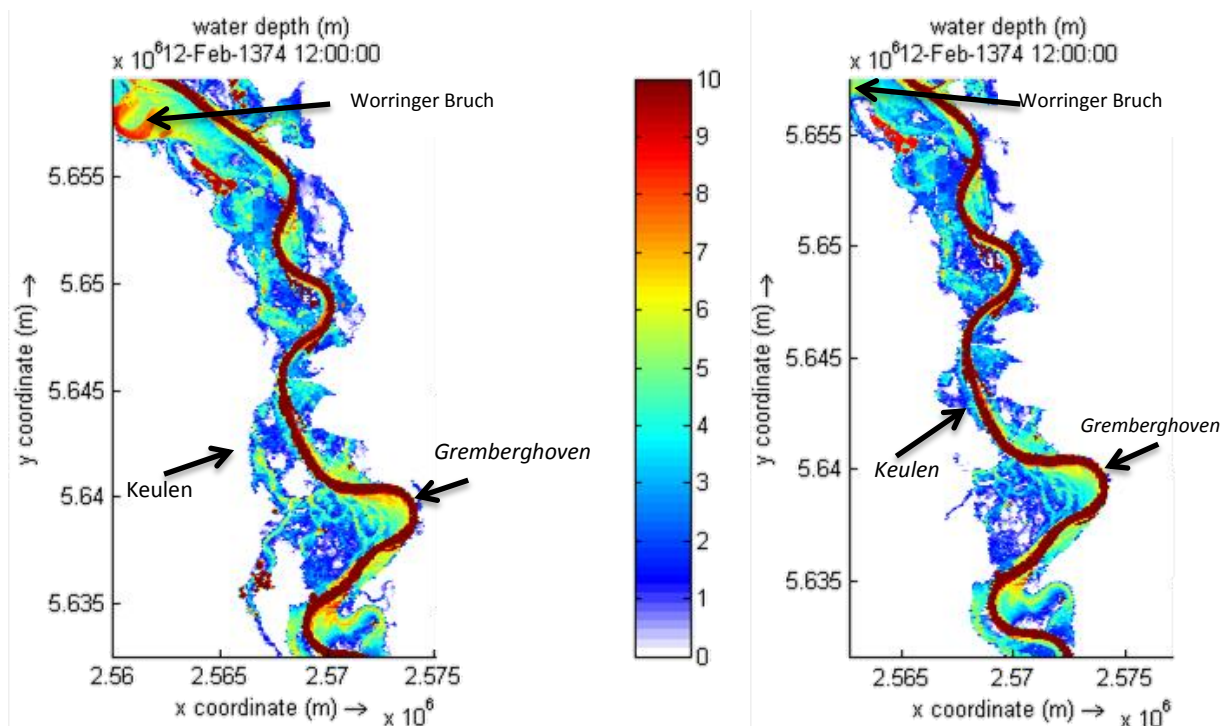
11.3 Overstromingsresultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten wat betreft de overstromingen gepresenteerd. Deze overstromingen worden enkel gepresenteerd voor het scenario met de meeste overstromingen en met de minste overstromingen. Dit zijn de scenario's met de hoogste afvoer plus lateralen en laagste afvoer van de bandbreedte.

11.3.1 Overstromingen in de omgeving van Keulen

Allereerst wordt er in de omgeving van Keulen een analyse van de overstromingen gedaan. De figuren die hierbij horen, zijn gepresenteerd in Bijlage F. Wat opvalt in deze figuren is dat de overstromingen in deze omgeving al beginnen op dag drie. Op dag drie begint het water over het winterbed richting Worringer Bruch te stromen. Vanaf daar breidt de overstroming zich snel uit in stroomopwaartse richting (voor zover dit te zien is op deze figuren). Ook begint de rivierbocht bij Gremberghoven (ongeveer 10 kilometer stroomopwaarts van Keulen) te overstromen. In een week na de start van de simulatie is de Rijn van Worringer Bruch tot aan Keulen ver buiten zijn oevers getreden. De waterdiepte is dan buiten de oevers opgelopen tot maximaal enkele meters zowel in buitendijks als binnendijks gebied. Dit is zichtbaar in figuur 24. Deze figuur presenteert de situatie waarop de waterdieptes maximaal zijn in de omgeving van Keulen.

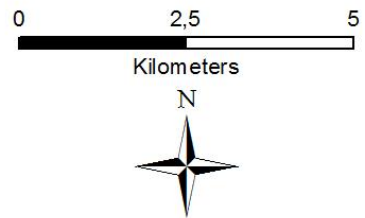
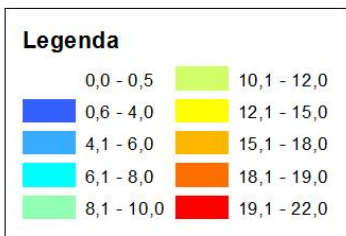
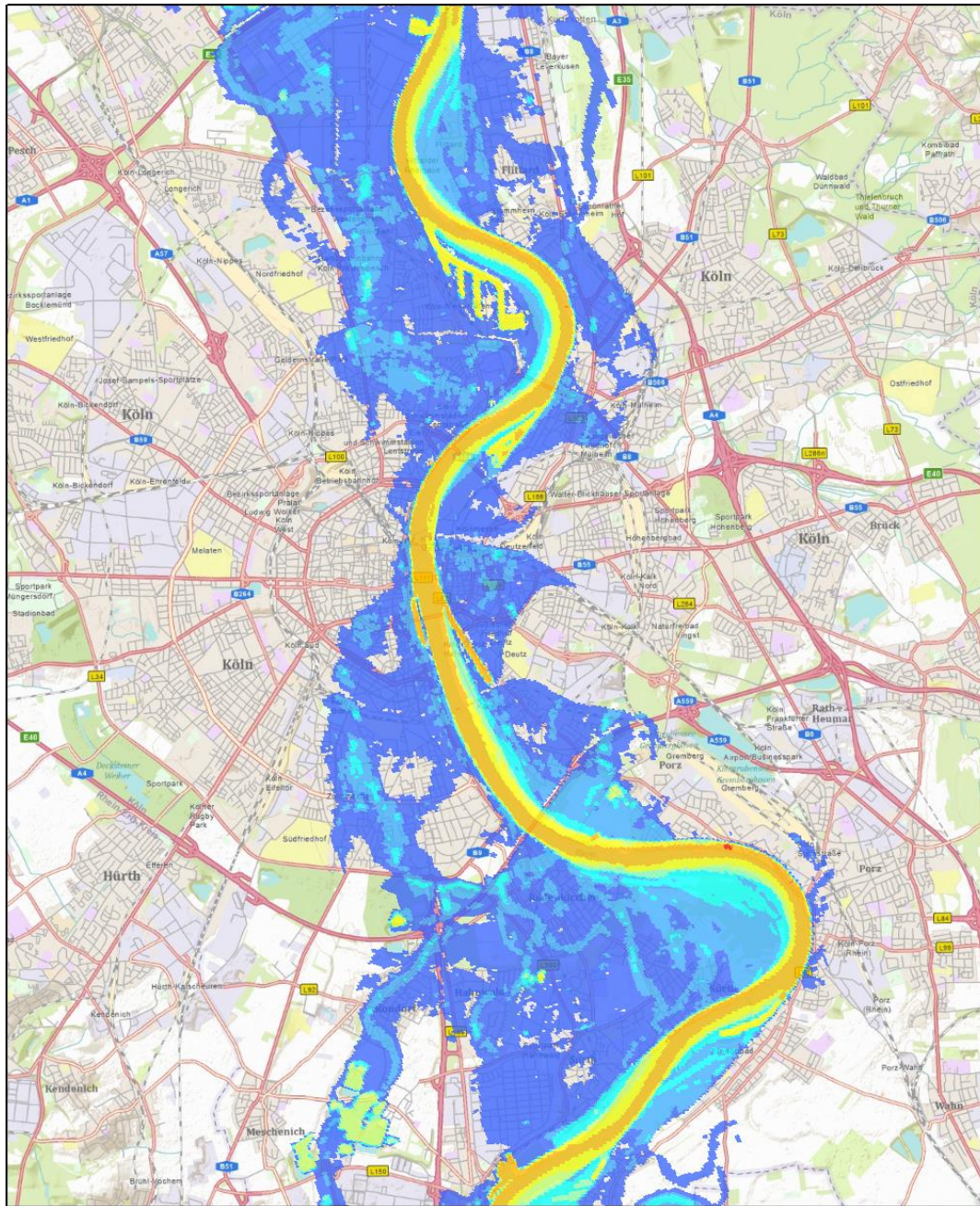
Zichtbaar is dat de omgeving van Worringer Bruch met enkele meters water bedekt is. Deze trend zet zich verder door in de richting van Keulen. Een kaart specifiek voor Keulen wordt gepresenteerd in figuur 25 en figuur 26. In deze figuren wordt een kaart van Keulen getoond. Deze kaarten presenteren de situatie in 2020 tijdens een afvoer vergelijkbaar met de hoogste (figuur 25) en laagste (figuur 26) afvoer van 1374. Zichtbaar is dat in deze situatie de kern van Keulen relatief buiten schot blijft in vergelijking tot de buitenwijken van de stad. Echter, de stad overstroomt met waterdieptes van enkele meters. In het meest extreme geval overstroomt er een oppervlakte van ongeveer 50 km², dit komt overeen met ongeveer een tiende van de hele stad Keulen. In het minst extreme geval is dit ongeveer 40 km².



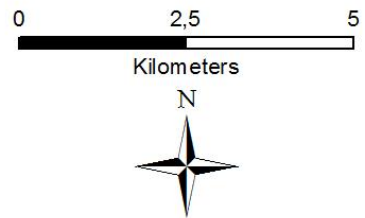
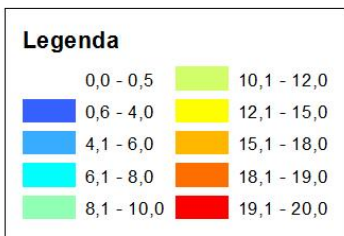
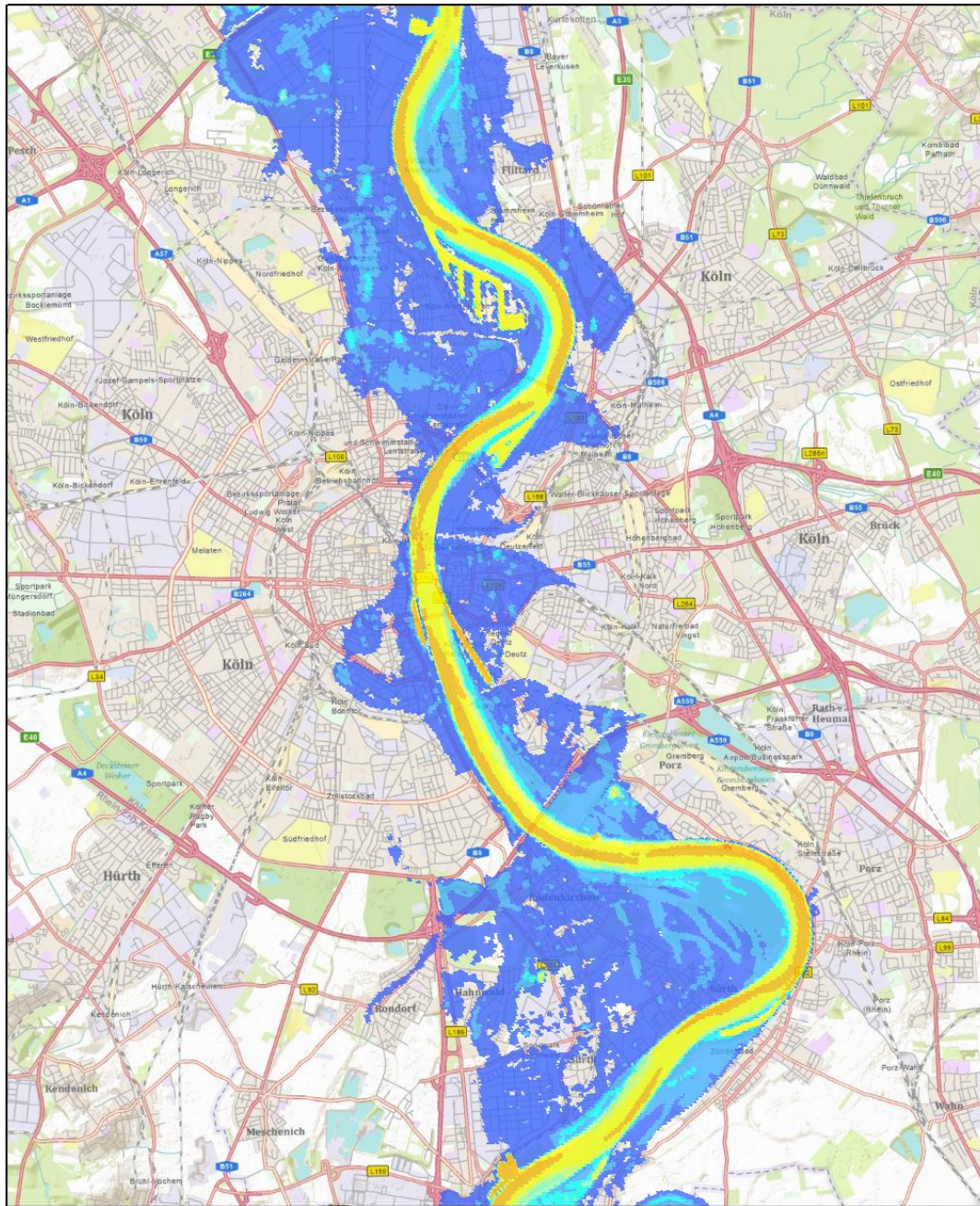
Figuur 24: Waterdiepte in Keulen in het meest extreme geval (linker figuur) en het minst extreme geval (rechterfiguur)

In figuur 24 zijn de overstromingen bij Keulen als gevolg van het meest extreme en het minst extreme scenario zichtbaar. Wat opvalt, is dat de twee voornamelijk verschillen in het achterland. In het meest extreme scenario is er sprake van grotere oppervlakten die overstromen. Dit is logisch door de hogere afvoer. De waterdieptes als gevolg van beide overstromingen op korte afstand van de rivier zijn redelijk gelijk. De patronen van de overstromingen die optreden bij het minst extreme scenario zijn vergelijkbaar met de patronen van het meest extreme scenario. De verschillen tussen beide scenario's zijn voornamelijk zichtbaar in de tijd die het duurt voordat een bepaald gebied overstroomt in het minst extreme scenario en de oppervlakte die overstroomt in beide scenario's. Dit is terug te zien in Bijlage F.

Een volgend verschil is dat er vaker grotere waterdieptes in het meest extreme scenario optreden. Dit is zichtbaar wanneer de kaarten in figuur 25 en figuur 26 met elkaar worden vergeleken. In het meest extreme scenario treden er meer overstromingen op die afkomstig zijn uit oppervlaktestromingen.



Figuur 25: Keulen tijdens een piekafvoer vergelijkbaar met de hoogste afvoer 1374



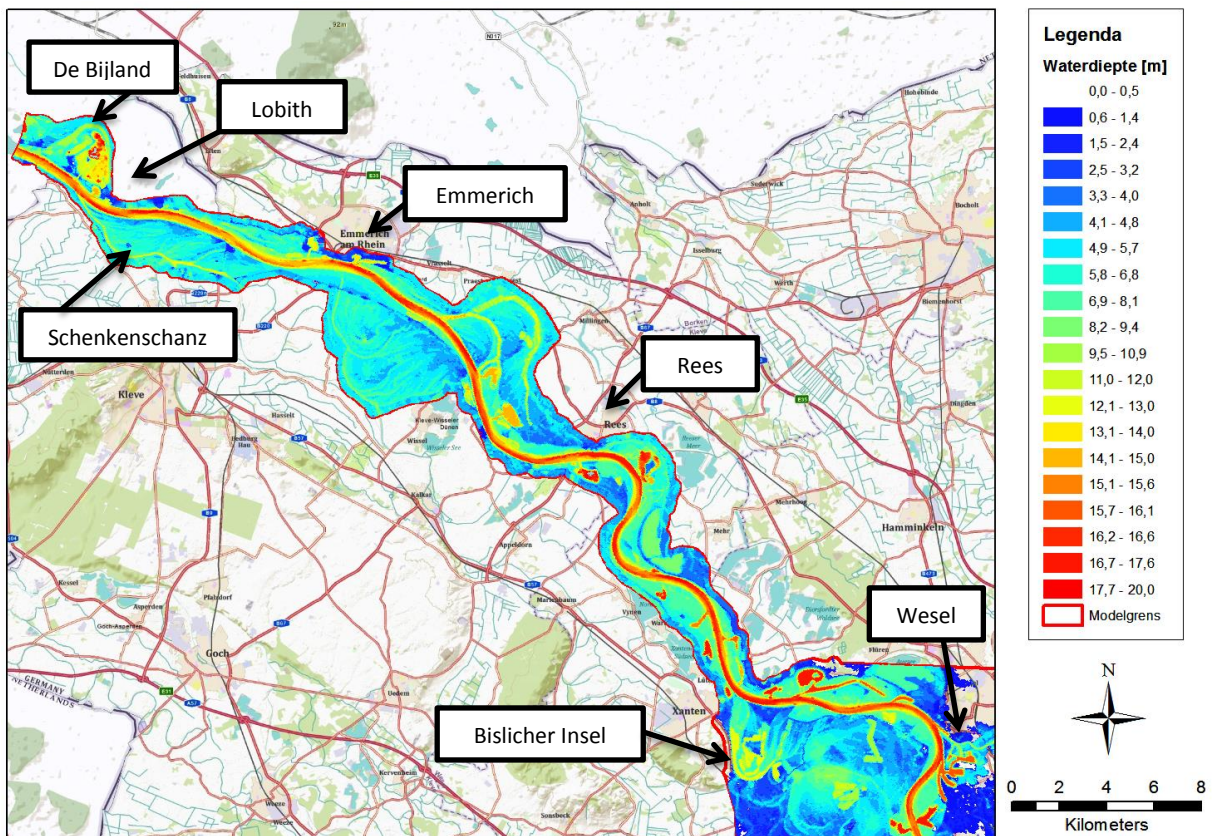
Figuur 26: Keulen tijdens een piekafvoer vergelijkbaar met de laagste afvoer 1374

11.3.2 Overstromingen op het traject Wesel-Lobith

In deze paragraaf zullen de overstromingen op het traject Wesel-Lobith worden geanalyseerd. Dit gebied wordt weergegeven in figuur 27, in deze figuur wordt ook de extreemste situatie weergegeven. De vragen die centraal staan bij deze analyse zijn: bij welke afvoeren (tabel 16) treden er overstromingen op en hoe groot deze overstromingen zijn (qua waterdieptes). Deze analyse wordt gedaan voor dezelfde scenario's als in paragraaf hiervoor.

Er wordt begonnen met het meest extreme scenario. Overstromingen treden op vanaf dag twee van de berekening. Dit zijn echter kleinschalige overstromingen ter hoogte van de Bijland. Bij deze overstromingen komt er geen water over de dijken. De overstromingen betreffen enkel buitendijks gebied. Het retentiegebied Bislicher Insel stroomt vol vanaf dag drie van de simulatie en is in vier dagen vol. Wesel krijgt te maken met wateroverlast vanaf dag zes van de simulatie. De haven krijgt te maken met overstromingen. De afvoer bij Wesel is dan 17.330 m³/s.

De eerste dijken die overstroomd, zijn degene die het dorp Schenkenschanz beschermen. Deze dijken zijn vanaf dag zeven niet toereikend genoeg. Na deze dag is de hele plaats overstroomd. Vanaf dag tien overstroomd er meer dijken. Op deze dag van de simulatie overstroomd de dijken aan de linkerkant van de Rijn tegenover Lobith. De bijbehorende afvoer is 17.135 m³/s. Vanaf deze dag overstroomd vervolgens ook de dijken aan de rechterkant van de Rijn bij Rees en bij Emmerich het. De afvoeren die hierbij horen zijn 17.365 m³/s en respectievelijk 17.200 m³/s. Ook de dijken aan de linkerkant bij Wesel op deze dag. De afvoer bij Wesel is op dat moment 17.883 m³/s. Op dag elf overstroomd de dijken aan de rechterkant van de Rijn ter hoogte van Lobith. De bijbehorende afvoer is 17.482 m³/s.



Figuur 27: Overstromingen in de situatie 2020 op het traject Wesel-Lobith tijdens het extreemste scenario

Eén dag later overstromen ook de dijken aan de linkeroever van de Rijn ter hoogte van Rees. De afvoer die op dat moment optreedt, is 17.983 m³/s. Vanaf dag veertien is het gehele binnendijkse gebied (voor zo ver in het model aanwezig) tussen Wesel en Lobith aan beide zijden overstromd. Wanneer het water de modelgrenzen bereikt heeft, kan het niet wegstromen, dit komt doordat de modelgrenzen oneindig hoog zijn. Op het moment dat de piek van de afvoergolf gepasseerd is, wordt de gemiddelde waterdiepte in het binnendijkse gebied geschat op ongeveer vijf meter. Dit is op dag vijftien van de simulatie. Dit wordt gepresenteerd in figuur 53 op pagina 105 in Bijlage G. De situatie voor het minst extreme scenario verschilt in grote mate met de situatie op dit traject. Tijdens dit scenario falen de dijken niet grootschalig. De dijken overstromen enkel bij Emmerich. Dit is zichtbaar in figuur 54 in Bijlage G op pagina 106. De waterdieptes die binnendijks bij Emmerich worden bereikt, variëren van ongeveer één tot twee meter en zullen veel minder desastreuze gevolgen hebben dan de overstromingen in het meest extreme scenario.

Tabel 16 : Afvoeren, in m³/s, waarbij de dijken overstromen

	Dijken linkeroever	Dijken rechteroever
Wesel	17.330	17.883
Rees	17.893	17.365
Emmerich	17.903	17.200
Lobith	17.135	17.482

Opvallend aan deze getallen is dat geen enkele afvoer overeenkomt met de maatgevende afvoeren inclusief waakhoogte, zoals genoemd in tabel 13. Het verschil tussen de maatgevende afvoer en de afvoer waarbij de dijken overstromden, is het grootste bij Emmerich. De gemiddelde afvoer per stad (gemiddelde afvoer van linker- en rechteroever) uit tabel 16 komt beter overeen met de maatgevende afvoeren zoals genoemd in tabel 13. De afwijking hierin is circa 1%. In deze afvoerberekeningen is er sprake van een overschatting. Tussen Wesel en Emmerich komt het water hoger te staan dan de aanwezige dijkhoogten. Dit komt door de vernauwing van het model, waardoor het water binnen de modelgrenzen opgestuwd wordt. Hierdoor wordt er meer water afgevoerd dan in realiteit mogelijk is. Dit leidt tot hogere afvoeren benedenstrooms. De grootte van de overschatting is onbekend.

Wanneer deze overschatte afvoeren worden beschouwd, kan er circa 17.500 m³/s Lobith bereiken bij een hoogwater gelijk aan het hoogwater van 1374. Hierin zijn de binnendijkse waterstromen niet meegenomen. Het is dan ook niet ondenkbaar dat via deze waterstromen alsnog de grens van 18.000 m³/s wordt overschreden.

12 Discussie

In dit hoofdstuk komen enkele discussiepunten van dit onderzoek aan bod. Hierbij wordt eerst stilgestaan bij de aannames en keuzes die gemaakt zijn in dit onderzoek. Vervolgens wordt er een vergelijking gemaakt tussen dit onderzoek en andere onderzoeken die relatie hebben tot dit onderzoek en onderwerp. De invloed van deze aannames, keuzes en verschillen tussen de onderzoeken worden kwalitatief beschreven. Belangrijk is dat, ter ondersteuning van dit hoofdstuk, terdege beseft dient te worden dat een model slechts een versimpeling van de werkelijkheid is, en dat de resultaten een ondersteunende functie moeten krijgen.

12.1 Aannames en keuzes

Binnen dit onderzoek zijn verschillende aannames en keuzes gemaakt die de resultaten beïnvloeden. Hierbij is vooral gekeken naar de effecten op de waterstanden en afvoer.

De gebruikte QH-relatie aan de benedenstroomse rand van het model is een relatie uit de huidige situatie. Zoals eerder beschreven in hoofdstuk 3 is deze niet juist voor de situatie in 1374. Door de verlaging van de bodem van het zomerbed in de loop der tijd zal de waterstand bij eenzelfde afvoer ten tijde van het hoogwater 1374 hoger zijn geweest dan bij de gebruikte QH-relatie. Door een hogere waterstand stroomafwaarts zal er opstuwung plaatsvinden in stroomopwaartse richting (backwater curve), waardoor er mogelijk eerder dijken overstromen in 1374 op het invloedstraject van deze QH-relatie.

Het dwarsprofiel van de gereconstrueerde Rijn is een bakjesvorm. Verwacht wordt dat in de werkelijke situatie van 1374 dit dwarsprofiel een gecompliceerdere vorm heeft gehad. Dit impliceert ook dat de oevers geleidelijker hebben opgelopen, waardoor de waterdieptes in de beginfase van het hoogwater bij de oevers lager zijn geweest dan in dit onderzoek. De gevolgen hiervan zijn dat de stroomsnelheid bij de oevers lager is geweest. Verwacht wordt echter dat deze aanname een geringe invloed heeft bij de piekafvoer van het hoogwater.

Een aanname die grotere gevolgen heeft gehad op de resultaten van dit onderzoek is de aanname voor de ruwheden. In dit onderzoek is op grove schaal gebruikgemaakt van enkele ruwheden. Deze ruwheden kunnen de resultaten op significante schaal beïnvloeden. In dit onderzoek is bijvoorbeeld niet gevarieerd in de ruwheid van het zomerbed voor de situatie 1374. Deze ruwheid is echter niet langs het gehele traject gelijk in de huidige situatie en zal dit ook niet zijn geweest in 1374. Dit kan plaatselijke effecten hebben. Wanneer de zomerbedruwheid bij Keulen hoger is geweest dan in dit onderzoek aangenomen, zou dit zelfs kunnen betekenen dat de afvoer bij Keulen tijdens het hoogwater lager is geweest dan de afvoer die in dit onderzoek is berekend (door de hogere ruwheid vermindert de stroomsnelheid, waardoor opstuwung plaatsvindt). Dit heeft ook gevolgen voor de overige resultaten. De ruwheden van het winterbed zijn eveneens van groot belang voor de bereikte stroomsnelheden en dus afvoeren en waterdieptes in het winterbed. Gevolgen hiervan kunnen zijn dat de afvoer in het winterbed over- of onderschat is.

Binnen dit onderzoek is eveneens een aanname gemaakt aangaande de veranderingen die de bodem heeft ondergaan in de periode van 1374 tot het heden. Het bleek dat deze verandering het gevolg is van meerdere processen. Omdat deze processen in het tijdsbestek van dit onderzoek niet los van elkaar konden worden beschouwd, is er gekozen voor het toepassen van een verandering die al deze invloeden samen neemt. Het is reëel te denken dat deze trend de werkelijke verandering geen

volledig recht doet. Wanneer de bodemhoogte verandert, heeft dit directe gevolgen voor de afvoer die optreedt bij Keulen in 1374 en heeft het hierdoor ook gevolgen voor de afvoeren en overstromingen stroomafwaarts. Wanneer de bodemhoogte in 1374 lager blijkt te zijn geweest dan de bodemhoogte waarmee in dit onderzoek is gewerkt, betekent dit dat de afvoer hoger zal zijn geweest, en vice versa.

Verder is de aanname die de locatie van de dijken gezamenlijk met hun hoogte in dit onderzoek hebben bepaald van significante invloed op de resultaten. De werkelijke situatie van de dijken heeft vermoedelijk tussen beide dijksscenario's in gelegen, ook de ligging van de dijken is mogelijk anders geweest dan in dit onderzoek aangenomen. Dit heeft invloed op de overstromingen en hierdoor ook op de afvoeren die stroomafwaarts worden bereikt. De verwachting is dat wanneer de aanwezigheid van dijken is overschat de afvoer stroomafwaarts is onderschat. Door de overstroming van deze dijken zal er door de overschatting meer water achterblijven achter deze dijken, waardoor er minder afvoer stroomafwaarts zal aankomen. Ook worden de mogelijkheden voor het water om terug in de Rijn te stromen verminderd.

De keuzes voor de verschillende scenario's hebben vanzelfsprekend ook invloed op de resultaten. Er is gekozen voor verschillende ruwheden op basis van onderzoek. Wanneer deze ruwheden extremer worden gemaakt, heeft dit vanzelfsprekend ook invloed op de resultaten (afvoer en overstromingen) die gesimuleerd worden. Ook hier geldt weer dat hoe ruwer deze gemaakt worden, hoe lager de gekalibreerde afvoeren zullen zijn.

Daarnaast heeft de keuze om een opgeschaalde vorm van de standaardafvoergolf te gebruiken invloed op de resultaten. Met deze keuze is er gekozen voor een bepaalde vorm van de golf die gesimuleerd wordt. Het is onbekend of de daadwerkelijke hoogwatergolf die is opgetreden in 1374 een soortgelijke vorm heeft gehad, of dat dit totaal anders was. Het is echter ook goed mogelijk dat de daadwerkelijke golf een spitsere vorm heeft gehad, waarbij de absolute piekperiode korter heeft geduurd. Het tegenovergestelde kan ook het geval zijn geweest. Wanneer de afvoergolf een spitsere verloop heeft gekend, is het waarschijnlijk dat er een minder grote hoeveelheid water in totaliteit is afgevoerd. De piek komt dan immers sneller en is ook sneller gepasseerd. Wanneer de afvoergolf een stomper verloop heeft gekend, is er sprake van een langere aanlooptermijn en een langere aflooptermijn, waardoor er in totaliteit veel meer water door de Rijn is afgevoerd. Dit zal dan ook een langere periode beslaan dan een spitsere golf.

Verder heeft de manier waarmee met overstromingen van dijken wordt omgegaan effect of de uiteindelijke overstromingen die optreden. In dit onderzoek wordt enkel van overstromende dijken uitgegaan. In realiteit zullen er door de hoge waterstanden en overstromende dijken zeer waarschijnlijk bressen in de dijken ontstaan. Deze bressen beïnvloeden de stroming benedenstrooms en de overstromingen die plaatsvinden op dat specifieke punt waar de bres ontstaat.

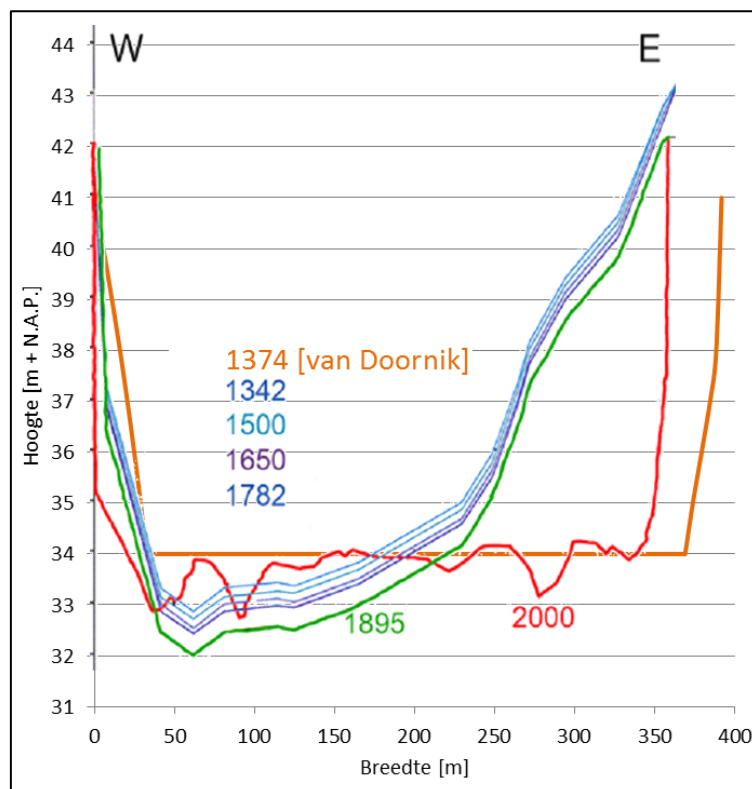
De laatste aanname die besproken wordt, is de aanname om te kiezen om de gestuurde retentiepolders (retentiepolders met een regelbare overlaat) niet mee te nemen in dit onderzoek. Hierdoor is de verwachting dat de uiteindelijke piekafvoer verder afgetopt wordt, doordat er meer water wordt geborgen in retentiepolders.

12.2 Vergelijking van dit onderzoek met dat van Herget en Meurs (2009)

In deze paragraaf wordt dit onderzoek vergeleken met het onderzoek van Herget en Meurs (2009). Door deze verschillen te benoemen, wordt er inzicht verkregen in de oorzaken van de verschillende uitkomsten van beide onderzoeken die deels dezelfde vraag proberen te beantwoorden.

Het grootste verschil en ook direct het meeste in het oog springende verschil tussen beide onderzoeken is dat Herget en Meurs (2009) gebruikmaken van een berekening die een zeer plaatselijke analyse in Keulen geeft van het hoogwater van 1374. In dit onderzoek is de gehele Rijn van Keulen tot aan Lobith gereconstrueerd en niet alleen de omgeving van Keulen. Ook is er in dit onderzoek gerekend in twee dimensies. Wanneer er gebruikgemaakt wordt van een hydraulisch model, wordt ook de invloed van het stroomafwaartse gedeelte van de rivier meegenomen. Met andere woorden: benedenstroomse wijzigingen (in geometrie of bijvoorbeeld ruwheid) hebben ook invloed op de situatie bovenstrooms.

Verschillen tussen de beide onderzoeken zijn er ook bij de bepaling van de dwarsdoorsnede. Het dwarsprofiel wordt door Herget en Meurs genomen vanaf de westelijke rivierzijde tot in de oostelijk gelegen uiterwaarden. De breedte van dit profiel, voor dit soort hoge afvoeren, is dan negen kilometer. Dit is een aanmerkelijk verschil met de aanpak die gebruikt is in dit onderzoek. Doordat in dit onderzoek een simulatiemodel is gebruikt, is er van tevoren geen totale stroombreedte geformuleerd. Uit de resultaten is gebleken dat de totale stroombreedte in het meest extreme scenario voor 1374 bij Keulen circa zeven kilometer was en in het basismodel vijfentwintig kilometer. Ook strekt dit doorstroomprofiel zich aan beide zijden van de Rijn uit in plaats van enkel de oostelijke zijde van de Rijn. Dit zijn relatief grote verschillen voor het doorstroomoppervlak.



Figuur 28: Dwarsprofielen zoals gebruikt in het onderzoek van Herget & Meurs (2009) en dit onderzoek

Een ander verschil bij de bepaling van de dwarsdoorsnede is het feit dat in dit onderzoek gebruik wordt gemaakt van een geschematiseerd bakje (gebaseerd op het huidige zomerbed, dit is zichtbaar in figuur 28) als benadering van de Rijn in 1374. Herget en Meurs echter hebben gebruikgemaakt van dieptemetingen uit 1895 (zie figuur 28) en daar verschillende correcties op gedaan met betrekking tot de bodemverandering als gevolg van natuurlijke processen, zoals sedimentatie. Dit brengt gelijk het volgende punt naar voren waarin deze onderzoeken verschillen. Herget en Meurs zijn uitgegaan van hoogtegegevens van voor de normalisatie en mijnbouw. Hierdoor zijn er geen aannames gemaakt wat betreft de invloed van deze menselijke handelingen op de bodemhoogte. In dit onderzoek zijn, benedenstrooms van Keulen, deze processen en hun invloed verwerkt met de hulp van een correctie die al deze invloeden dient mee te nemen. Ondanks deze verschillende aanpak qua aanpassingen aan de bodem is het verhang in beide onderzoeken min of meer gelijk. Het verhang van de Rijn tussen Andernach en Lobith is afgerond 0.0002.

Voor de ruwheid wordt in beide onderzoeken een compleet andere benadering toegepast. Herget en Meurs nemen voor de verschillende onderdelen van de riviergeometrie een ruwheid aan. De verschillende onderdelen die worden gedefinieerd, zijn het zomerbed, winterbed en de kanaaltjes in het winterbed. De ruwheid wordt bepaald aan de hand van Manningcoëfficiënten, voor elk onderdeel wordt een range genomen in coëfficiënten. Deze waarden worden bepaald op basis van een oude kaart. Het meest extreme en minst extreme scenario in dat onderzoek is hierdoor een opeenstapeling van minima of maxima van ranges. Over het algemeen zijn deze ruwheden gladder dan de ruwheden die in dit onderzoek gebruikt worden. In dit onderzoek worden voor de uiterwaarden verschillende soorten landgebruik met een bepaalde oppervlakte, op basis van oude kaarten, bepaald. Hierin worden kanaaltjes in de uiterwaarden niet onderscheiden met een aparte ruwheid. In het onderzoek van Herget en Meurs is geen rekening gehouden met de aanwezigheid van dijken. In dit onderzoek zijn dijken echter wel meegenomen in het meest waarschijnlijke scenario. Dit heeft vanzelfsprekend grote effecten (zie ook hoofdstuk 8).

Het onderzoek van Herget en Meurs schat de afvoer die opgetreden is in Keulen hoger in dan in dit onderzoek. De afvoeren die gevonden zijn in dit onderzoek bevinden zich aan de onderzijde van de bandbreedte zoals die gevonden is door Herget en Meurs. In het onderzoek van Herget en Meurs wordt gevonden dat er in het zomerbed circa 13.500 m³/s (43% van de afvoer) en in het winterbed 10.300 m³/s (57% van de afvoer) wordt afgevoerd. In dit onderzoek is gevonden dat het zomerbed ongeveer 13.800 m³/s (71% van de afvoer) afvoert tegenover circa 5.700 m³/s (29% van de afvoer) in het winterbed. Er kan dus gesteld worden dat in dit onderzoek veel minder afvoer door het winterbed gaat dan in het onderzoek van Herget en Meurs het geval is. Het blijkt dat de afvoeren die in beide onderzoeken door het zomerbed worden afgevoerd bijna gelijk zijn. Het verschil in de gevonden afvoeren tussen beide onderzoeken is voornamelijk het gevolg van de verschillen in het winterbed. Verwacht wordt dat dit voornamelijk te wijten is aan het gebrek aan dijken in het winterbed in het onderzoek van Herget en Meurs, terwijl in dit onderzoek is aangenomen dat er wel dijken aanwezig waren in het winterbed.

Verder kan worden geconcludeerd dat het onderzoek van Herget & Meurs bij Keulen qua bodemveranderingen en het dwarsprofiel van de Rijn verfijnder is geweest dan dit onderzoek. De gebruikte methode is eenvoudiger dan de methode die gebruikt is in dit onderzoek. Dit onderzoek heeft betrekking op een veel groter studiegebied. Wanneer dit gereflecteerd wordt naar bijvoorbeeld de ruwheden is er voor de heel Rijn een zeer grove aanname gemaakt.

12.3 Vergelijking van dit onderzoek en de Niederrheinstudie

In deze paragraaf wordt het onderzoek van Lammersen (2004) genaamd "Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Niederrhein" vergeleken met dit onderzoek. Hiermee worden de verschillen in aanpak gekoppeld aan de verschillen in resultaten.

Het onderzoek van Lammersen (2004) richt zich op de vragen, zoals hoeveel water er onder extreme omstandigheden kan worden verwacht uit het stroomgebied van de Rijn en hoeveel water de Rijn binnen de dijken kan afvoeren. De vervolgvraag hierop is wat de effecten zijn wanneer de hoeveelheid water die afkomstig is uit het stroomgebied de hoeveelheid die tussen de dijken kan worden afgevoerd overstijgt. Deze vragen zijn vergelijkbaar met de onderzoeksvragen zoals gedefinieerd in hoofdstuk 1.2.

Verdere overeenkomsten in uitgangspunten tussen beide onderzoeken zijn dat beide rekening houden met de situatie in 2020 wat betreft de dijken en overige waterstand verlagende maatregelen. Verschillen zijn dat van Lammersen rekening houdt met maatregelen op de Oberrhein en de Nederlandse Rijntakken en met het effect van klimaatverandering. De methodiek waarmee gewerkt is, komt eveneens overeen in beide onderzoeken. Allereerst is de maximale afvoer bepaald (in het geval van dit onderzoek de afvoer bij Keulen) om vervolgens de overstromingen te berekenen en te analyseren. Lammersen (2004) verschilt van dit onderzoek in de zin dat in dit onderzoek niet wordt gewerkt met klimaatscenario's, waar dit in Lammersen (2004) wel wordt gedaan.

In dit onderzoek wordt er gefocust op het hoogwater uit 1374 bij Keulen, waarbij de bijbehorende afvoer heeft gediend als input voor de andere onderzoeksvragen. Lammersen (2004) richt zich op de hoogst mogelijke afvoer in het Rijngebied. Hiertoe is gebruikgemaakt van 30 jaar meteorologische data, waarmee vervolgens 1000 jaar aan neerslag en temperatuur is gegenereerd. Met deze gegevens is vervolgens met behulp van een neerslagafvoermodel 1000 jaar aan afvoeren berekend. De extreemste afvoeren die hieruit zijn gekomen, zijn gebruikt als input om de andere vragen te beantwoorden. De methodiek om de overstromingen te berekenen, is eveneens verschillend. Allereerst zijn in het onderzoek van Lammersen (2004) berekeningen uitgevoerd met een tweedimensionaal model. Waar overstromingen optraden, zijn deze als input ingevoerd in een eendimensionaal model. Dit model is gebruikt om de gezamenlijke effecten van de overstromingen en de hoogwater verlagende maatregelen in Noordrijn-Westfalen en Gelderland op de waterstand en afvoer te bepalen. De onderzoeken verschillen voornamelijk in het laatste gedeelte, in dit onderzoek is er geen ander model gebruikt om overstromingen en hun effecten te simuleren. Verder worden er door Lammersen (2004) golven tot 18.000 m³/s gebruikt terwijl in dit onderzoek golven gebruikt worden tot circa 21.200 m³/s.

Het onderzoek van Lammersen (2004) concludeert dat zonder overstromingen langs de Oberrhein afvoeren van 17.800 m³/s bij Andernach mogelijk zijn. In dit onderzoek bleek dat er ooit mogelijk al een afvoer van 19.497 m³/s bij Keulen is opgetreden. Wanneer de hoogst gemeten afvoer in de Sieg (zie tabel 3) meegenomen wordt, die net bovenstreams van Keulen in de Rijn uitkomt, komen deze resultaten redelijk overeen. Het verschil is minder dan 5%.

Wanneer vervolgens gekeken wordt naar de overstromingen geeft Lammersen (2004) aan dat de hoogwater verlagende maatregelen en dijkverbeteringen het beschermingsniveau plaatselijk wordt verhoogd. Bij extreme hoogwaters zullen de zuidelijke (omgeving Keulen) en middelste gebieden (omgeving Düsseldorf) van de Niederrhein als eerste overstromen. Deze zullen pas overstromen bij

hogere afvoeren, maar dit kan niet voorkomen worden. Dit komt overeen met de resultaten die in dit onderzoek naar voren zijn gekomen. Ook in dit onderzoek blijkt dat er grootschalige overstromingen plaats zullen vinden ondanks alle maatregelen die genomen zijn. Echter verschillen de resultaten op het aspect welke gevolgen deze overstromingen hebben op de afvoergolf. Lammersen (2004) stelt dat de afvoergolf duidelijk afvlakt als gevolg van de overstromingen. Dit is minder duidelijk gebleken uit dit onderzoek. Mogelijke oorzaak is de rand van het model (en hierdoor het ontbreken van echte onttrekkingen van water uit het model), waardoor het water op een andere wijze dan bij aanwezigheid van deze onttrekkingen terug de Rijn in stroomt. Een overeenkomst is dat in beide onderzoeken deze overstromingen hebben geleid tot een verlenging van de afvoergolf.

Samenvattend kan worden gesteld dat Lammersen (2004) op afwijkende resultaten uitkomt wat betreft de maximum afvoeren die voor kunnen komen in het stroomgebied van de Rijn. De overstromingsresultaten zijn beter vergelijkbaar. De verschillen in deze resultaten zijn zeer waarschijnlijk het gevolg van de beperkingen van het in dit onderzoek gebruikte model en het ontbreken van een secundair model om de overstromingen beter te simuleren.

13 Conclusies en aanbevelingen

Dit hoofdstuk beschrijft de conclusies gebaseerd op de resultaten. Deze conclusies zijn teruggekoppeld naar de drie onderzoeksvragen die in hoofdstuk 1 zijn genoemd. Er wordt een algemene conclusie getrokken die gerelateerd is aan de doelstelling van dit onderzoek en die eveneens in hoofdstuk 1 aan de orde is gekomen. Ook worden er in hoofdstuk 13.2 aanbevelingen gedaan.

13.1 Conclusies

Wat was de afvoer van de Rijn bij Keulen tijdens het hoogwater in 1374 en wat is de onzekerheid hierin?

Uit de resultaten blijkt dat de meest waarschijnlijke afvoer bij Keulen tijdens het hoogwater in 1374 gelijk is aan circa 19.500 m³/s. De onzekerheid hiervan is onderzocht met behulp van verschillende scenario's. De laagst gevonden afvoer is het resultaat van scenario Ruw. Dit is het meest ruwe ruwheidsscenario dat is opgesteld in dit onderzoek. In dit scenario is gekozen voor vijf typen landgebruik: akker, bos, moeras, bebouwing en water. De bijbehorende afvoer is 18.520 m³/s. De hoogst gevonden afvoer is afkomstig van scenario "GeenDijk" en is 21.203 m³/s. In dit scenario is aangenomen dat er geen dijken waren in het jaar 1374. De totale bandbreedte van de gevonden afvoeren is 2.683 m³/s.

Verder kan geconcludeerd worden dat naast de ruwheden ook de dimensionering van de dijken een grote invloed heeft op de uiteindelijke resultaten. Dit is verklaarbaar omdat dit de grootste en grofste aanname is.

Welke afvoer is er opgetreden in Lobith als gevolg van het hoogwater bij Keulen in 1374?

De afvoer bij Lobith als gevolg van het hoogwater bij Keulen in 1374 is moeilijk te kwantificeren. Door de vernauwing van het model kan deze afvoer niet goed worden gesimuleerd. De afvoer bij Wesel is daardoor meer representatief voor de ordegrootte die mogelijk Nederland bereikt.

De afvoer die Wesel bereikt als gevolg van het hoogwater varieert tussen de 17.882 m³/s en 22.080 m³/s. Het basismodel geeft een afvoer van 18.865 m³/s. De aanwezige bandbreedte hierin is 4.198 m³/s. Dit is 22% van de meest waarschijnlijke afvoer.

Het is afhankelijk van welk scenario wordt beschouwd of er ooit een afvoer van 18.000 m³/s Nederland heeft bereikt. Het is echter denkbaar dat door de vlakke bodem en de inrichting van het toenmalige landschap een afvoer van 18.000 m³/s Nederland bereikt heeft.

Hoe verloopt een vergelijkbare afvoer van Keulen naar Nederland onder de huidige omstandigheden en treden er overstromingen op in Noordrijn-Westfalen en Nederland?

De afvoer bij Keulen tijdens het hoogwater in 1374 resulteert in de situatie van 2020 in een afvoer bij Keulen die ligt tussen de 18.381 m³/s en 20.897 m³/s. Dit is een bandbreedte van 2.516 m³/s. Deze bandbreedte is verkregen door de bij de beantwoording van de eerste onderzoeksvraag gevonden laagste en hoogste afvoer plus lateralen te simuleren in de huidige situatie.

Deze afvoer bij Keulen leidt zeker tot overstromingen in Noordrijn-Westfalen en zeer waarschijnlijk tot overstromingen in Nederland. In de huidige situatie zullen er bij de eerder genoemde

piekafvoeren grootschalige overstromingen optreden in Noordrijn-Westfalen. Deze overstromingen zullen grote gebieden beslaan. De omgeving rondom Keulen wordt als eerste getroffen. Al vanaf dag drie blijkt het reguliere rivierbed niet meer te voldoen. Retentiegebied Worringer Bruch in de buurt van Keulen wordt dan ingezet. Vanaf dat moment rukt de overstroming snel op in de richting van Keulen (stroomopwaartse richting). Met een week is het gehele gebied tussen Keulen en Worringer Bruch overstroomd, waarbij waterdieptes van enkele meters geen uitzondering zijn. Ook Keulen zelf ontkomt niet aan overstromingen. De oude kern van Keulen blijft hierbij buiten schot. In de buitenwijken die aan de Rijn gelegen zijn, worden echter waterdieptes van enkele meters bereikt. Dit geldt voor zowel het meest als het minst extreme scenario.

Wanneer gekeken wordt naar de gevolgen op het traject Wesel-Lobith blijkt dat in het extreme scenario al vanaf dag twee van de simulatie overstromingen optreden ter hoogte van de Bijland. Hierbij overstromen er nog geen dijken. De eerste dijken die overstromen, waardoor er een dorp onder water komt te staan, zijn de dijken bij Schenkenschanz op dag zeven. Vanaf deze dag overstromen achtereenvolgens de dijken bij Lobith, Rees, Emmerich en Wesel. Binnen twee weken is het gehele gebied tussen Wesel en Lobith aan beide kanten van de Rijn overstroomd. Overal treden waterdieptes van meer dan een meter op, waarbij waterdieptes van meerdere meters geen uitzondering zijn. Plaatselijk kan er een waterdiepte van vijf à zes meter optreden.

De verschillen tussen het meest extreme en minst extreme scenario zijn erg groot. Waar in het extreemste scenario desastreuze overstromingen optreden, is dit bij het minst extreme scenario niet het geval. Met dit scenario treden er enkel overstromingen op bij Emmerich, waarbij de waterdieptes die optreden variëren van één tot twee meter. Opvallend is dat de afvoer waarbij overstromingen in beide scenario's optreden lager liggen dan de maatgevende afvoeren.

De resultaten bij Wesel voor de verschillende scenario's geven afvoeren die variëren van 16.672 m³/s (minst extreme scenario) tot 20.719 m³/s (meest extreme scenario). De afvoeren die uiteindelijk Lobith bereiken, zijn niet goed in te schatten met het huidige model. Gezien de maatgevende afvoer van 17.500 m³/s bij Lobith en de waterdieptes die bereikt worden bij de overstromingen in de omgeving van Lobith is het realistisch te veronderstellen dat bij een hoogwater gelijk aan het hoogwater van 1374 afvoeren van 18.000 m³/s Nederland kunnen bereiken.

Algemene conclusie

De algemene conclusie van dit onderzoek luidt dat de doelstelling ten dele gehaald is. Het is gelukt om de hoogwatergebeurtenis van 1374 te modelleren in Waqua en om de gevolgen hiervan in de historische en huidige situatie in Noordrijn-Westfalen te onderzoeken. Het is echter ten dele gelukt om de gevolgen van dit hoogwater bij Lobith te onderzoeken in de historische en huidige situatie. De reden hiervoor zijn de beperkingen die het gebruikte model heeft. Wel kan worden gesteld dat de grens van 18.000 m³/s geen waan, maar werkelijkheid is.

13.2 Aanbevelingen

Op basis van de verkregen resultaten en de conclusies worden hier meerdere aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek naar dit hoogwater. De aanbevelingen zijn ingedeeld in vier categorieën: reconstructie, modelaanpassingen, simulatie en algemene aanbevelingen.

Aanbevelingen die gedaan worden met betrekking tot de reconstructie zijn voornamelijk om kennishiaten uit dit onderzoek op te vullen. De eerste aanbeveling op dit gebied is om verder onderzoek te verrichten naar het landgebruik dat er was in die tijd. Wanneer het landgebruik beter geschat kan worden, is het ook mogelijk de ruwheden beter te schatten. Dit heeft een positieve invloed op de betrouwbaarheid van de resultaten. Een volgende aanbeveling die gedaan wordt om de reconstructie te verbeteren, is het vullen van het kennishiaat wat betreft de dijken en hun hoogte en ligging ten tijde van het hoogwater. In dit onderzoek is gewerkt met zeer grove aannames wat de dijken betreft. De verwachting is dat de werkelijke situatie aspecten van beide dijkscenario's heeft bevat. Verder wordt aanbevolen om verder onderzoek te doen naar de verandering van de bodemhoogte sinds 1374.

Aanbevolen wordt om de modelgrenzen te verbreden. Dit geldt vooral voor de modelgrenzen tussen Wesel en Lobith. Wanneer deze verbreed worden, is het beter mogelijk om de overstromingspatronen te simuleren in dit gebied. Door de huidige smalle grenzen op dit traject stroomt het water tegen de modelgrenzen aan, waardoor het water zich anders zal gedragen dan in de realiteit het geval zou zijn geweest. Ook wordt aanbevolen om verder onderzoek te doen naar een geschikte QH-relatie voor de situatie 1374 om als randvoorwaarde aan de onderrand van het model.

Als laatste worden er enkele algemene aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek. Voor verder onderzoek naar de gevolgen van dit hoogwater wordt aanbevolen om verder onderzoek te doen naar de laterale toestroming in 1374 en de laterale toestroming in de huidige situatie met een gebeurtenis gelijk aan dat van 1374. Verder wordt aanbevolen om te onderzoeken welke invloed de vorm van de afvoergolf heeft. Om dit te onderzoeken wordt aanbevolen om gebruik te maken van een afvoergolf met een dubbele piek. Dit in tegenstelling tot dit onderzoek waar enkel gebruik is gemaakt van een afvoergolf met een enkele piek.

Aanbevolen wordt om voor de gevolgen van dit hoogwater in de huidige situatie ook enkele klimaatscenario's door te rekenen. Hoogwaters worden frequenter en extremer, het is dus goed mogelijk dat ook een vergelijkbare meteorologische situatie uit 1374 een veel heftiger extremer hoogwater zou veroorzaken in de huidige tijd. Verder wordt aanbevolen om onderzoek te doen naar de gevolgen van maatregelen die verder bovenstrooms van Keulen worden uitgevoerd. Deze maatregelen hebben effect op de afvoer die Keulen kan bereiken en daardoor ook effect op de afvoer die Nederland kan bereiken. Tot slot wordt aanbevolen om ook de gestuurde retentiegebieden op te nemen in het model van de huidige situatie. Hiervoor moet verder onderzoek gedaan worden naar de voorwaarden waarop deze worden ingezet.

14 Referenties

- Aubin, H. (1926). *Handatlas: Geschichtlicher, Der Rheinprovinz 1. Aufl.* Köln. Köln.
- Barneveld, H. (2012, mei 25). Waqua-model Duitsland (Andernach-Lobith). (R. Schielen, Interviewer)
- Beckers, J. (2012, September 14). Waqua-model Duitsland (Andernach-Lobith). (W. van Doornik, Interviewer)
- Berendsen, H. (2000). *Fysisch-geografisch onderzoek: Thema's en methoden*. Assen: Van Gorcum & Comp B.V.
- Bezirksregierung Düsseldorf. (2007, Februari 7). *Umweltschutz - Hochwasserschutz*. Opgeroepen op Januari 3, 2013, van Bezirksregierung Düsseldorf: http://www.brd.nrw.de/umweltschutz/hochwasserschutz/Geschichtliche_Entwicklung_der_Deichver789.html
- Bezirksregierung Düsseldorf. (2010, Januari 8). *Umweltschutz - Hochwasserschutz: FAQ*. Opgeroepen op Januari 3, 2013, van Bezirksregierung Düsseldorf: http://www.brd.nrw.de/umweltschutz/hochwasserschutz/FAQ_Die_haeufigsten_Fragen_zu_m_Hochwass5186.html
- BlackKisuX. *Flood Cologne 2011*. deviantart.com, Keulen.
- Bräuler, L. (1932). Die Wasserstandstatistik, insbesondere am Rhein. *Beiträge zur Rheinkunde*, 8, 30-35.
- Brázdil, R., Demarée, G., Deutsch, M., Garnier, E., Kiss, A., Luterbacher, J., et al. (2010). European floods during the winter 1783/1784: scenarios of an extreme event during the 'Little Ice Age'. *Theoretical and Applied Climatology*, 100, 163-189.
- Brunotte, E., Immendorf, R., & Schlimm, R. (1994). Das Stadtreliëf von Köln. *Kölner Geographische Arbeiten*(63), 32-44.
- Buisman, J. (1996). *Duizend jaar weer, wind en water in De Lage Landen; Deel 2 1300-1450*. Franeker: Uitgeverij Van Wijnen.
- CHR/KHR. (1993). Der Rhein unter der Einwirkung des Menschen, Ausbau, Schifffahrt, Wasserwirtschaft.
- CSO & HKV Lijn in Water. (2011). *Cursus Baseline*. Bunnik & Lelystad: CSO & HKV Lijn in Water.
- De Molenaar, M. (2012). *Reconstructing palaeo peak flow regimes for the River Rhine*. Utrecht: Universiteit Utrecht.
- De Wit, M., & Buishand, A. (2008). Extreme afvoeren voor Rijn en Maas gebundeld in GRADE. *H2O*, 8-9.
- Deltacommissie 2008. (2008). *Samen werken met water*.

- Eberle, M., Hammer, M., Busch, N., Engel, H., Krahe, P., & Wilke, K. (2004). *Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Niederrhein, Deelrapport Extreme afvoeren uit het Rijnstroomgebied*.
- Eich, H., Kau, J., & Bauer, B. (1983). Die Flucht auf den Viehberg. *Heimat Jahrbuch Wittlaer*(4), 31-37.
- Engel, H. (1996). The flood events of 1993/1994 and 1995 in the Rhine River basin. *Destructive Water: Water-Caused Natural Disasters, their Abatement and Control*. Anaheim: Federal Institute of Hydrology.
- Ernst Klett Verlag GmbH. Haack Grundschuleatlas Nordrhein-Westfalen. *Rheinisches Braunkohlerevier 1:240000*. Ernst Klett Verlag GmbH, Leipzig.
- Frechen, M., Ellwanger, D., Hinderer, M., Lämmerman-Barthel, J., Neeb, I., & Techmer, A. (2010). Late Pleistocene fluvial dynamics in the Hochrhein Valley and in the Upper Rhine Graben: Chronological frame. *International Journal of Earth Sciences*(99), 1955-1974.
- Gerlach, R. (2006). Holozän: Die Umgestaltung der Landschaft durch den Menschen seit dem Neolithikum. In J. Kunow, *Urgeschichte im Rheinland* (pp. 87-98). Verlag des Rheinischen Vereins für Denkmalpflege und Landschaftsschutz.
- Hantsche, I. (1999). *Atlas zur Geschichte des Niederrheins*. Bottrop; Essen: Peter Pomp.
- Herget, J., & Meurs, H. (2009). Reconstructing peak discharges for historic flood levels in the city of Cologne, Germany. *Global and Planetary Change*, 108-116.
- Hoppe, C. (1970). *Die großen Flußverlagerungen des Niederrheins in den letzten zweitausend Jahren und ihre Auswirkungen auf Lage und Entwicklung der Siedlungen*. Bonn; Keulen: Buch- und Verlagsdruckerei Ludwig Leopold KG.
- Hughes, D., & Smakhtin, V. (1996). Daily flow time series patching or extension: a spatial interpolation approach based on flow duration curves. *Hydrological Sciences Journal*, 41(6), 851-871.
- Jödemann, D. Cthulhu Mittelalter. *Stadtplan von Köln*.
- Knighton, D. (1998). *Fluvial forms and processes. A new perspective*. London: Taylor & Francis Ltd.
- Krahe, P. (1997). Hochwasser und Klimafluktuation am Rhein seit dem Mittelalter. *Hochwasser-Natur im Überfluss* (pp. 57-82). Heidelberg: C.F. Müller.
- Krahe, P., Liebscher, H.-J., & Wilke, K. (2000). Flood Risk Assessment at the Lower and Middle River Rhine- Lessons learnt from History. *The Extremes of hte Extremes: Extraordinary Floods*. Reykjavik: Federal Institute of Hydrology.
- Kwadijk, J. (2007, december 06). *Waar komt het water vandaan*. Opgeroepen op december 20, 2013, van Deltares: Public Wiki: <https://publicwiki.deltares.nl/display/CAW/Waar+komt+het+water+vandaan>
- Lacomblet, T. (1868). *Archiv für die Geschichte des Niederrheins*.

- Lammersen, D.-I. (2004). *Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Niederrhein; Eindrapport*. Düsseldorf;Arnhem: Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen; Provincie Gelderland; Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW. (2008). *Waqua aussenmodel Andernach-Lobith. j05_4*. Nordrhein-Westfalen, Duitsland.
- Lorenz, N. (1997). *Historische Hoogwaters Rijn en Maas voor 1900*. Arnhem: RIZA.
- Mercator. *Kölnplan des Arnold Mercator*. University of Cologne, Cologne.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat; RIZA. (2002). *Stromingsweerstand vegetatie in Uiterwaarden; Deel 1*. Lelystad: RIZA.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat; RIZA. (2002). *Stromingsweerstand vegetatie in uiterwaarden; Deel 2*. Arnhem: RIZA.
- MUNLV-NRW. (2003). Neufestsetzung des Bemessungshochwassers für den Rhein.
- MUNLV-NRW. (2006). *Hochwasserschutzkonzept Nordrhein-Westfalen*. Düsseldorf: MUNLV-NRW.
- MUNLV-NRW. (2009). *Umweltbericht Nordrhein-Westfalen 2009*. Düsseldorf: MUNLV-NRW.
- Piette, J. (1925). *Die Veränderungen des Rheinstroms zwischen Erft und Ruhr*. Köln Diss.
- Puff, A. (1908). Die stromlaufänderungen des Niederrheins zwischen Wupper- und Ruhrmündung. *Festschr. d. Naturwiss. Ver. zu Krefeld*.
- Rein, A. H. (1855). *Haus Bürgel, das römische Burungum*. Krefeld: Gustav Kühler.
- Rijkswaterstaat. (2012). *Normaal Amsterdams Peil*. Opgeroepen op Maart 19, 2013, van http://www.rws.nl/zakelijk/databestanden/normaal_amsterdams_peil/
- Scheller, H. (1965). *Laufänderung des Rheins bei Neuss - Heft 17 - Beiträge zur Rheinkunde Zweite Folge der Beiträge der Rheinfreunde*. Koblenz.
- Schielen, R. (2013, Januari 29). *Golven Rijn*. (W. van Doornik, Interviewer)
- Schneider, G. (1996). Das Bemessungshochwasser, Ermittlung gestern und heute. (D.-I. Lammersen, Interviewer)
- Schwartz, U. (2005). *Köln und sein Umland in alten Karten*. Emons : Köln.
- Shala, B. (2001). *Jungquartäre Talgeschichte des Rheins zwischen Krefeld und Dinslaken*. Düsseldorf: Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.
- Shaw, E. M., Beven, K. J., Chappel, N. A., & Lamb, R. (2011). *Hydrology in Practice*. Oxon: Spon Press.
- Silva, W. (2002). *Hoeveel (hoog)water kan ons land binnenkomen via de Rijn bij Lobith, nu en in de toekomst*. RIZA.

- Simona. (2010). *Waqua/Triwaq - two- and three-dimensional shallow water flow model. Technical documentation*. Ministry of Transport, Public Works and Water management.
- Simona. (2012). *User's Guide WAQUA: General Information*. Rijkswaterstaat.
- Stadt Duisburg. (z.j.). *Deichverbände am Niederrhein*. Opgeroepen op Januari 3, 2013, van Stadt Duisburg:
<http://www.duisburg.de/micro/deichverband/hochwasserschutz/102010100000185508.php>
- Stadtentwässerungsbetriebe Köln, AöR. (2012, January 07). *Hochwasserstatistik*. Opgeroepen op June 21, 2012, van Stadtentwässerungsbetriebe Köln: Home: <http://www.steb-koeln.de/statistik.html>
- Toonen, W., de Molenaar, M., Bunnik, F., & Middelkoop, H. (2012). Middle-Holocene palaeoflood extremes of the Lower Rhine. *Hydrology*.
- Ullrich, D. *Map of the Rhine*.
- Van Heezik, A. (2006). *Strijd om de rivieren; 200 jaar rivierbeleid in Nederland*. Den Haag/ Haarlem: HNT Historische producties.
- Van Kester, J., Stelling, G., Bijlsma, A., & van der Kaaij, T. (2000). *Randvoorwaarden in Waqua en Triwaq*. Delft: Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee.
- Van Putten, D. (2011). *Morfologisch modelleren van nevengeulen in 2D*. Enschede: Universiteit Twente.
- Von Petrikovits, H. (1960). *Das römische Rheinland : archäologische Forschungen seit 1945*. Köln.
- Waalewijn, A. (1987). The Amsterdam ordnance datum (NAP). *Survey Review*, 29(226), 197-204.
- Wetter, O., Pfister, C., Weingartner, R., Luterbacher, J., Reist, T., & Trösch, J. (2011). The largest floods in the High Rhine basin since 1268 assessed from documentary and instrumental evidence. *Hydrological Sciences Journal*, 5(56), 733-758.
- Zhou, D. (2000). *Jungquartäre Talgeschichte des mittleren Niederrheins*. Düsseldorf: Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.

Bijlage A

Zoals beschreven in hoofdstuk 2 maakt Waqua gebruik van de tweedimensionale ondiepwatervergelijkingen: de ondiepwatervergelijkingen uit de continuïteitsvergelijking (vergelijking 3) en de Navier-Stokesvergelijkingen (vergelijking 4 en vergelijking 5). Deze vergelijkingen zijn gebaseerd op de tweede wet van Newton. Aangenomen wordt dat de massa van een waterdeeltje onsamendrukbaar en dus constant is. Anders gezegd is de massa van een instromend deeltje gelijk aan de massa van een uitstromend waterdeeltje. De viscositeit van het water wordt ook als constant aangenomen. Omdat er gewerkt wordt met ondiep water is de verticale impulsvergelijking vereenvoudigd tot de hydrostatische drukverdeling (vergelijking 2). Hierbij is aangenomen dat de verticale versnellingen verwaarloosbaar klein zijn, vergeleken met de zwaartekrachtsversnelling. Bij de continuïteitsvergelijking wordt aangenomen dat een verandering in de in- en uitstroom van een waterdeeltje resulteert in de verandering van de waterstand.

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -\rho gh \quad \text{Vergelijking 2}$$

Waarin:

P = Hydrostatische druk [kg/ms²]

σ = verticale coördinaat [-]

ρ = dichtheid van water [kg/m³]

g = zwaartekracht versnelling [m/s²]

h = waterdiepte [m]

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [Hu]}{\partial x} + \frac{\partial [Hv]}{\partial y} = 0 \quad \text{Vergelijking 3}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + gu \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2(h + \zeta)} \\ = \frac{\rho_a C_d W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho_w (h + \zeta)} + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad \text{Vergelijking 4}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + gv \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2(h + \zeta)} \\ = \frac{\rho_a C_d W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho_w (h + \zeta)} + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad \text{Vergelijking 5}$$

Waarbij:

u,v = Richtingscomponenten van de diepte-gemiddelde stroomsnelheid [m/s]

ζ = Waterstand boven referentievlak [m]

h = Waterdiepte [m]

H = h + ζ [m] (Figuur 29)

f = Coriolisparameter [s⁻¹]

g = Zwaartekrachtversnelling [m/s²]

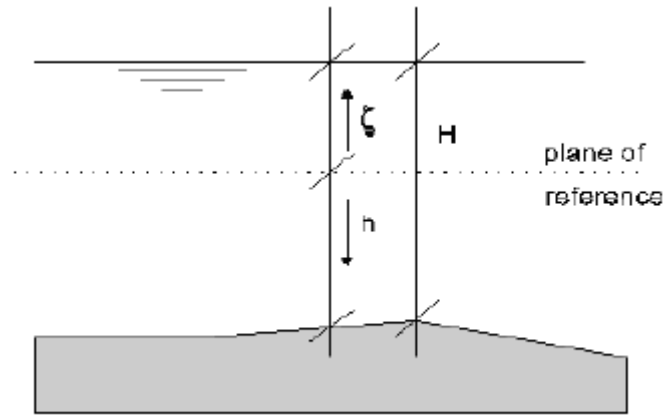
W_x, W_y = Richtingscomponenten van de windsnelheid [m/s]

C = Chezy coëfficiënt [m^{1/2}/s]

C_d = Luchtweerstandcoëfficiënt [-]

ρ_a, ρ_w = Dichtheid van lucht (air), water [kg/m³]

ν = Eddy-viscositeit [m²/s]



Figuur 29: Waterlaag = waterdiepte + waterhoogte (Simona, 2012)

In het model wordt de invloed van wind niet meegenomen. Hierdoor worden de vergelijkingen vereenvoudigd tot:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + gu \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2(h + \zeta)} = v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad \text{Vergelijking 6}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + gv \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2(h + \zeta)} = v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad \text{Vergelijking 7}$$

De horizontale componenten van deze vergelijkingen zijn als volgt opgebouwd. De termen worden enkel in x-richting gepresenteerd. De dimensie van alle termen is m/s².

$\frac{\partial u}{\partial t}$	Vertragingsterm	$g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$	Drukgradiënt
$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}$	Advectietermen	$gu \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2(h + \zeta)}$	Wrijvingsterm
$-fv$	Coriolissterm	$v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$	Dispersieterm

Doordat er tweedimensionaal gerekend wordt, vervallen de verticale termen uit deze formules. Ook wordt het effect van Coriolis niet meegenomen en dus vervalt ook de term met de Coriolis parameter. Dit resulteert in de uiteindelijk ondiepwatervergelijkingen (vergelijking 8 en vergelijking 9)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + gu \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2(h + \zeta)} = 0 \quad \text{Vergelijking 8}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + gv \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2(h + \zeta)} = 0 \quad \text{Vergelijking 9}$$

Bijlage B

In deze bijlage wordt verder ingegaan op de invloed die de keuze voor de gebruikte QH-relatie heeft op de resultaten. Zoals ook beschreven op pagina 28 heeft de keuze voor de QH-relatie te maken met het gebrek aan kennis. De QH-relatie die gold in 1374 is onbekend. Verschillende aannames kunnen hierover gemaakt worden. Kort is al de optie besproken om de waterstand voor elke afvoer te verlagen met de mate waarin het zomerbed is gedaald. Echter, dit geldt enkel voor de afvoer in het zomerbed. Het is onbekend hoeveel afvoer er echt door het zomerbed gevoerd kon worden. De schematisatie van het zomerbed die gemaakt is met de reconstructie van de Rijn is immers ook omgeven met onzekerheden. Alle aannames die gemaakt worden over aanpassingen van deze QH-relatie zijn omgeven met onzekerheden die de resultaten van dit onderzoek beïnvloeden. De oplossing hiervoor kan ook niet gevonden worden in het toepassen van een ander type randvoorwaarde zoals een vaste waterstand. Kort gezegd schuilt er in elke keuze voor deze randvoorwaarde onzekerheid en het is met geen mogelijkheid zeker te zeggen wat de beste keuze is. Daarom is gekozen om de huidige QH-relatie ook te gebruiken voor de situatie 1374.

Het volgende punt dat deze keuze aanroept is de invloed van deze keuze en hoe ver loopt deze invloed door op de resultaten. Met dit laatste wordt begonnen om de invloed van deze keuze op de resultaten beter in te kunnen schatten. Om de afstand te bepalen waarover deze keuze invloed heeft, wordt een vuistregel gebruikt. Deze vuistregel is vergelijking 10 (van Kester et al., 2000). Omdat het hier slechts een benadering betreft, wordt er gebruikgemaakt van afgeronde getallen.

$$L_{rand} = \frac{H C^2}{g |u|} \sqrt{gH} \quad \text{Vergelijking 10}$$

Hierin is:

L_{rand} = Invloed lengte van de rand

H = Waterdiepte [m]

C = Chézy-coëfficiënt van het zomerbed [$m^{1/2}/s$]

g = Zwaartekrachtversnelling [m/s^2]

u = Dieptegemiddelde snelheidscomponent in de x-richting [m/s]

Wanneer deze wordt ingevuld voor het meest extreme scenario uit 1374 geeft dit het volgende resultaat:

$$L_{rand} = \frac{9 * 60^2}{9,81 |-0.4|} \sqrt{9,81 * 9} = 77.584 \text{ m} \approx 78 \text{ km} \quad \text{Vergelijking 11}$$

Dit komt overeen met een invloed die iets verder stroomopwaarts dan Wesel reikt. Het is daarom aannemelijk dat de invloed op de waterstand bij Wesel relatief klein zal zijn. De resultaten in de flessenhals stroomafwaarts van Wesel zullen meer invloed ondervinden van de keuze voor deze QH-relatie. De effecten van deze keuze zullen hierdoor voornamelijk verborgen zitten in de resultaten van de overstromingen in dat gedeelte.

Bijlage C

In deze bijlage wordt de reconstructie die gemaakt is in dit onderzoek gedetailleerd beschreven. De reconstructie is beschreven per stad en zijn omgeving.

14.1.1 Keulen

De reconstructie van de Rijn begint in Keulen. Wanneer de kaart van Keulen van Carl Friedrich von Wiebeking uit 1796 uit Schwartz (2005, pp. 32-33) bekeken wordt, is duidelijk zichtbaar dat de rivierloop van toen niet significant verschilt van de rivierloop van nu. Ook gezien het bodemhoogtemodel kunnen er met behulp van de beschikbare middelen geen alternatieve lopen worden beargumenteerd. Ook oudere kaarten van Caspar Vopelius uit 1555, Joan Blaeu uit 1662 en Abraham Hogenberg uit 1609 (Schwartz, 2005, pp. 24-25; 38-39; 36-37) wijzen niet op een veranderde loop.

Net ten noorden van Keulen, op de linkeroever van de Rijn, is een oude, hoefijzervormige meanderbocht gelegen. Deze oude bocht wordt "Worringer Bruch" genoemd. Wat opvalt aan deze afgesneden bocht is dat het een moerassig en bebost gebied is, terwijl het landschap in de omgeving gekenmerkt wordt door open agrarisch landschap. Doordat de Worringer Bruch een nog goed behouden hoefijzervormige vorm heeft, is het aannemelijk dat de Rijn relatief kort geleden deze bocht afgesneden heeft. Echter er zijn geen bronnen aanwezig die aangeven wanneer dit is gebeurd (Hoppe, 1970).

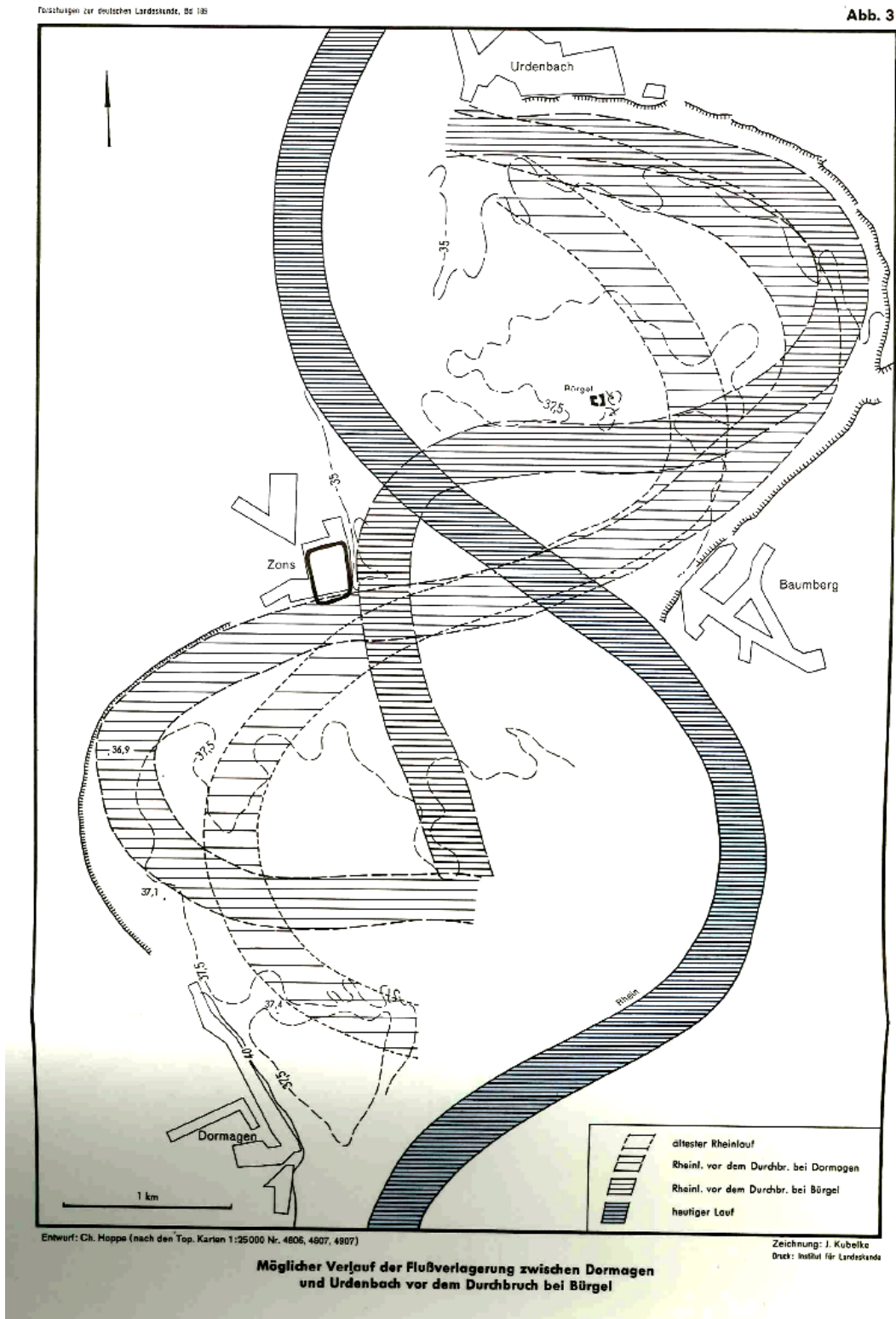
Rein (1855) stelt echter dat oude gebouwen, die zuidwestelijk gelegen zijn van Worringen, aantonen dat deze afgesneden bocht ten tijde van de trekschuiten (17^e eeuw) deel uitmaakte van de Rijn. Deze theorie wordt tegengesproken door nieuwe archeologische vondsten. Onder de rook van Worringen zijn resten van een Romeins kamp gevonden. Verder zijn langs de weg van Worringen naar Langel sporen gevonden van de Romeinse limes (Latijn voor grens en pad) (Puff, 1908; Handatlas, 1930).

Zoals eerder vermeld in hoofdstuk 5 bepaalt deze limes in belangrijke mate de reconstructie van de historische Rijnloop. Door deze grens is het uitgesloten dat de Worringer Bruch tot de Rijn behoorde in dit tijdperk. Er zijn aan de oostelijke zijde van de Worringer Bruch sporen gevonden van de limes. Dit betekent dat de Romeinen ook aan die zijde van de Worringer Bruch waren gevestigd. Echter de Romeinen zijn de Rijn niet (succesvol) overgestoken. Dit houdt in dat de Worringer Bruch al voor de Romeinse tijd moet zijn afgesneden of na de val van het Romeinse Rijk. Een verdere specificatie is echter niet te maken.

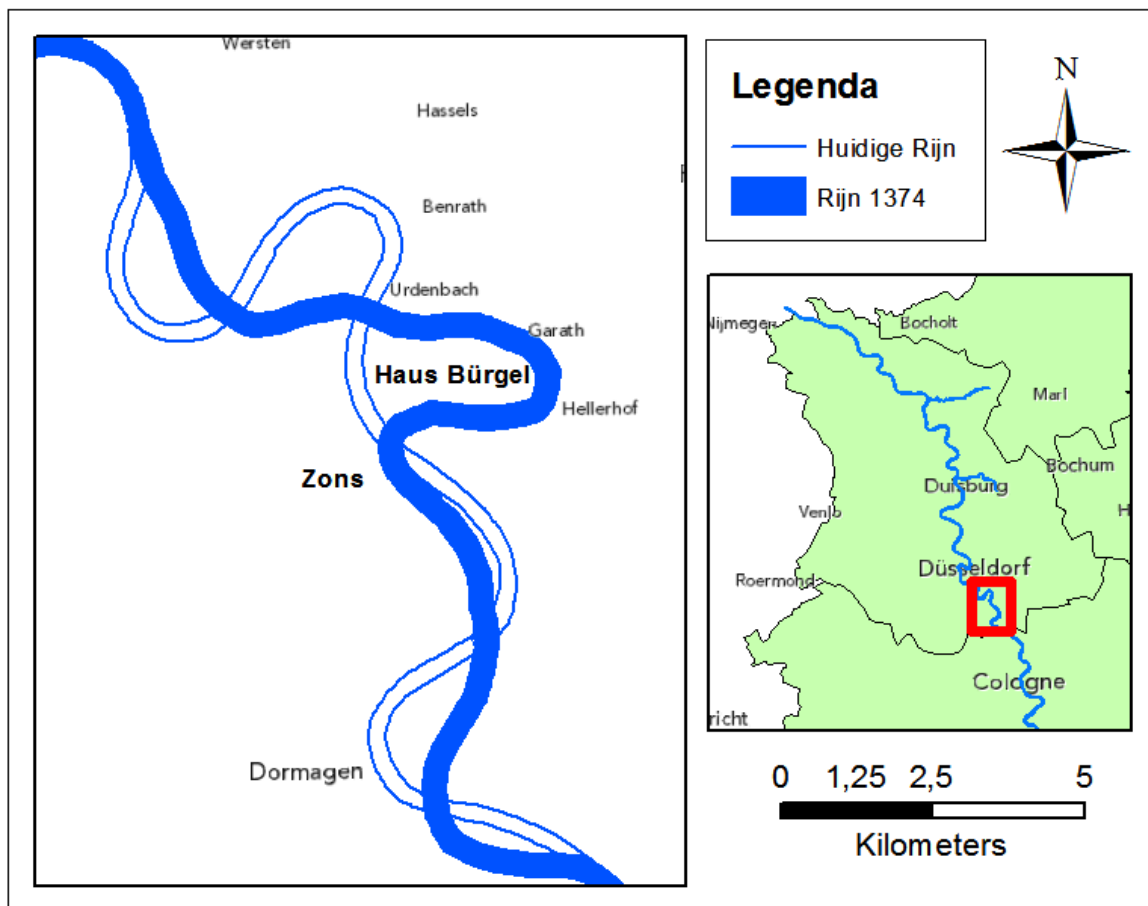
Hierdoor is ervoor gekozen om op de gevonden kaart van Gerlach (2006) af te gaan, hierop is Worringer Bruch geen onderdeel van de Rijn in de 14^e eeuw.

14.1.2 Dormagen

Wanneer de Rijn verder wordt gevolgd in de richting van de Nederlandse grens is de volgende mogelijke meanderbocht gelegen bij Dormagen en Monheim am Rhein. Vondsten van andermaal de limes en het oude Romeinse Haus Bürgel duiden erop dat de Rijn in Romeinse tijd om het fort heen heeft gestroomd (Gerlach, 2006; Von Petrikovits, 1960). Dit is gepresenteerd in figuur 30.



Figuur 30: Vermoedelijke loop van de Rijn tussen Dormagen en Urdenbach (Hoppe, 1970)

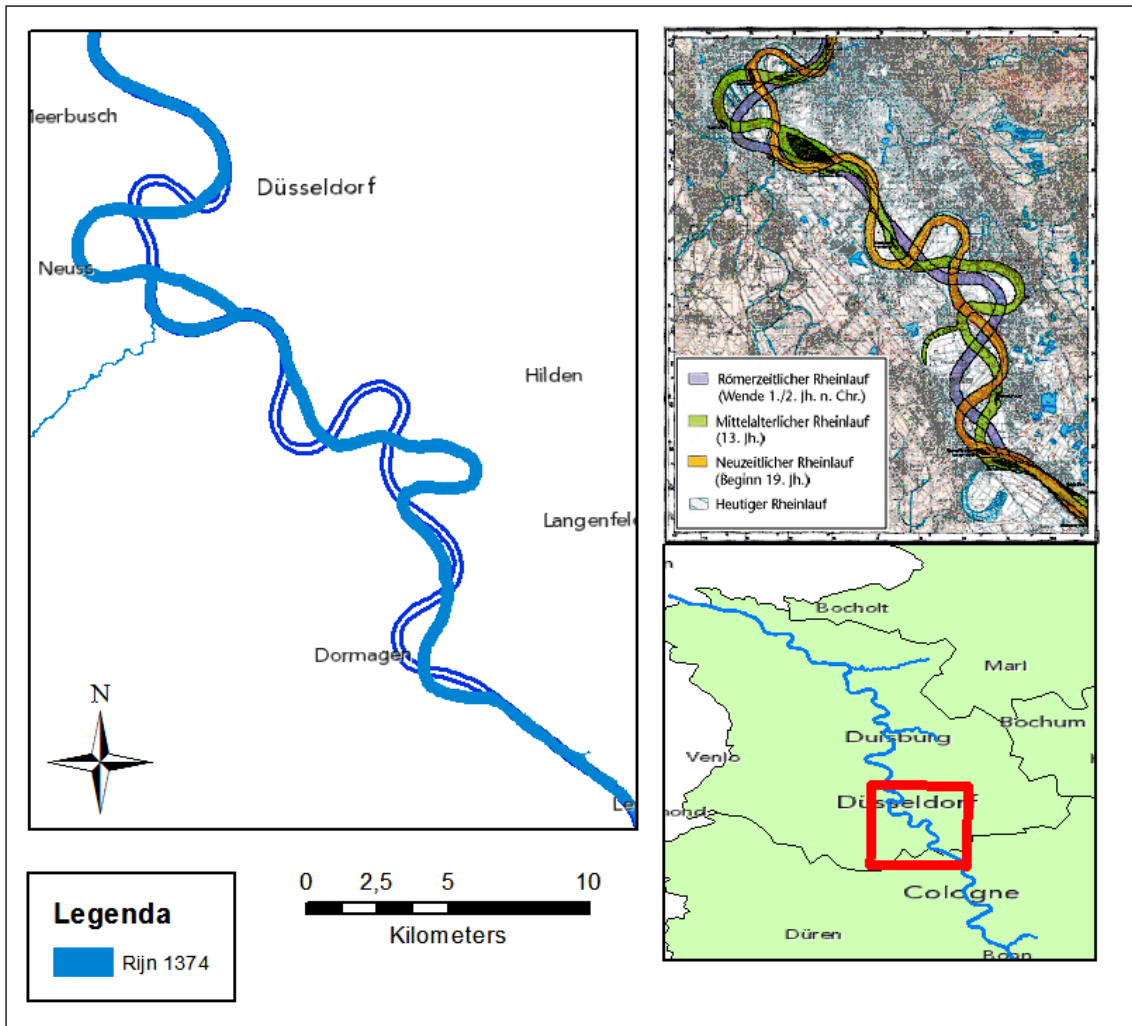


Figuur 31: Mogelijke loop van de Rijn tussen Dormagen en Urdenbach in 1374 (Hoppe, 1970)

De afsnijding van de meanderbocht heeft dus na de Romeinse tijd plaatsgevonden. In documenten uit de elfde en twaalfde eeuw worden Haus Bürgel en Zons samen genoemd. Dit doet vermoeden dat er relaties waren, deze vermoedens worden versterkt doordat Haus Bürgel lang de moederkerk van Zon is geweest. Hierdoor is het waarschijnlijk dat Zon en Haus Bürgel op dezelfde Rijnsoever gelegen waren. In 1388 heeft het bisdom Keulen een tolstation, dat in 1372 nabij Zon gebouwd was, in zuidelijke richting verplaatst. Dit zou erop kunnen wijzen dat de meanderbocht aan het migreren was en nog niet afgesneden werd. In 1374 heeft de meanderbocht zeer waarschijnlijk nog om Haus Bürgel gestroomd. Dit leidt tot de reconstructie van de Rijnloop zoals weergegeven in figuur 31.

Waar figuur 31 ophoudt, begint in de huidige situatie een S-vormige meanderbocht die loopt van Urdenbach tot Üdesheim. Door de randen van rivierterrassen (een rivierterras is een voormalige riviervlakte waar de rivier in is geërodeerd) te volgen, kan worden aangenomen dat de loop van de rivier op dit traject niet meer is veranderd na de doorbraak bij Bürgel.

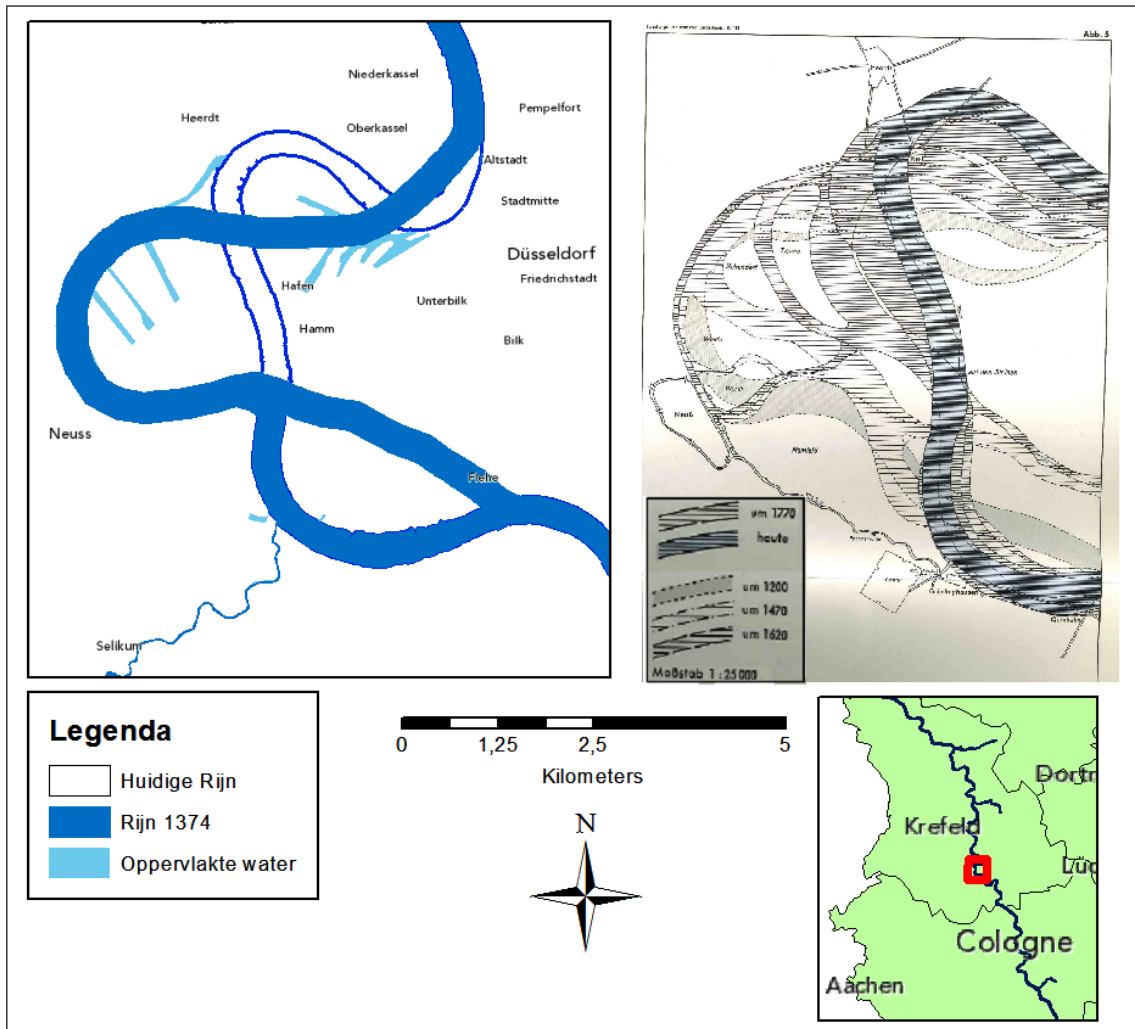
De rivierloop tussen Monheim en Düsseldorf wordt weergegeven door figuur 30 uit het onderzoek van Gerlach (2006). Deze kaart overlapt figuur 31. Deze kaart heeft geleid tot de reconstructie zoals deze is weergegeven in figuur 32.



Figuur 32: Rivierloop van Monheim tot Düsseldorf (Gerlach, 2006)

14.1.3 Düsseldorf

Het eerste aanknopingspunt voor de reconstructie van de Rijnloop nabij Neuß stamt uit 1195. Aartsbisschop Adolf I van Keulen droeg de rechten om te vissen in de Erft (het gebied van het Epse gemaal tot aan de uitmonding van de Erft in de Rijn) over aan de "gewone man" (Lacomblet, 1868). De locatie van het Epse gemaal en de loop van de oude Erf, door de zuidelijke helft van de meanderbocht nabij Neuß, is bekend (Epse gemaal staat niet op de kaart), zie figuur 33.

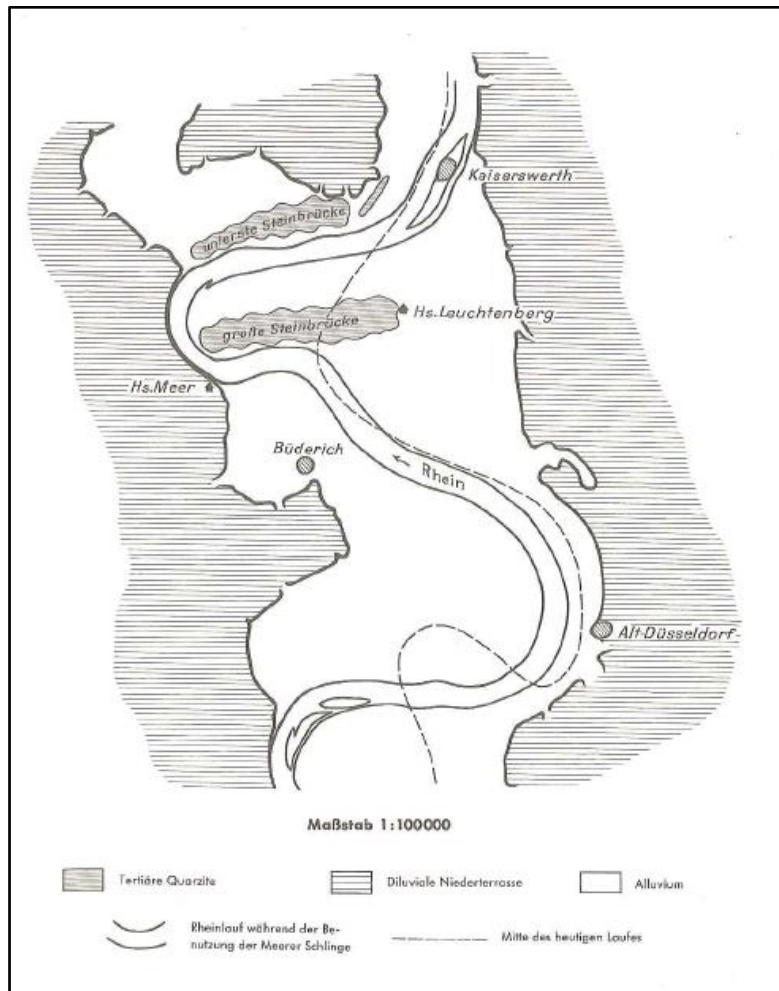


Figuur 33: De Rijn nabij Neuß (Hoppe, 1970)

Daarnaast zijn de huidige grenzen van de lager gelegen rivierterrassen, van Grimlinghausen tot Neuß, bekend. De Rijn moet daarom wel buiten de stadsmuren van Neuß om zijn gestroomd. Een volgende aanwijzing voor deze loop van de Rijn is een document uit 1254. Dit document spreekt van een eiland tussen de Erft en de Rijn, gelegen voor de poorten van Neuß. Dit eiland drukt als het ware de Rijn bij de stad vandaan (Hoppe, 1970). Aartsbisschop Konrad I wilde de Rijn aan de rand van Neuß houden voor de tolkomsten. Kijkend naar de ontwikkeling van de Rijnloop wordt duidelijk dat dit niet gelukt is (zie figuur 33). Bij Düsseldorf zelf en net onder Düsseldorf is de Rijnloop niet wezenlijk veranderd (Hoppe, 1970).

Ilvericher Bruch, ook wel Meerer Bruch genoemd, is vergelijkbaar met Worringer Bruch (zie pagina 79). Ook hier betreft het een duidelijk afgesneden meanderbocht. Deze oude bocht ligt iets ten

noorden van Düsseldorf, op de linker Rijnsoever. Gebaseerd op kaartmateriaal heeft deze meander een stroombreedte van ongeveer 250 meter gehad. Onderzoeken van Scheller (1965) en Piette (1925) concludeerden dat er in de 17^e eeuw nog geen sprake was van afsluiting van deze meanderbocht. Beide onderzoeken geven een mogelijke rivierloop die wordt weergegeven in figuur 34.



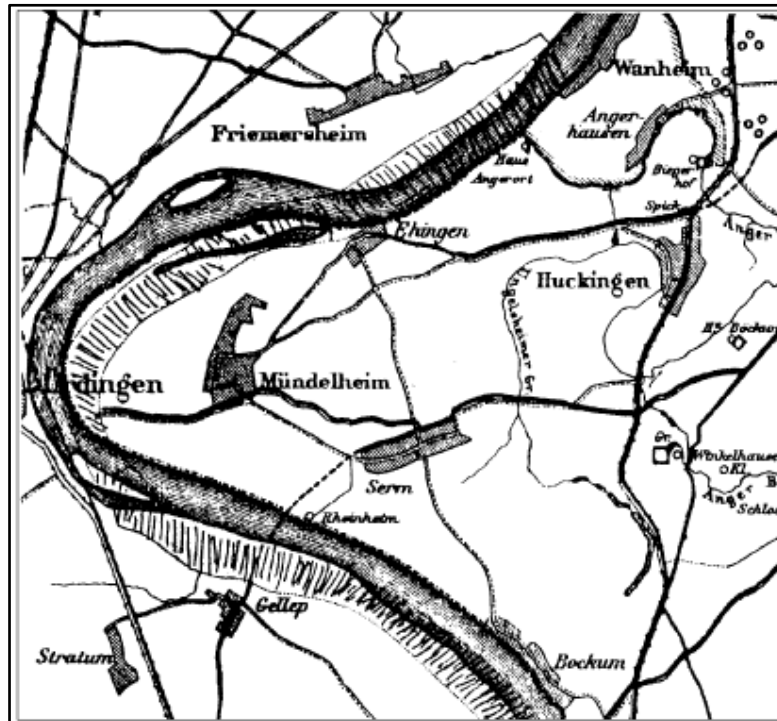
Figuur 34: Rijnloop tussen Düsseldorf en Kaiserswerth (Hoppe, 1970)

In deze figuur valt echter al op dat de huidige rivierloop een ondergrond van steen doorsnijdt. Deze is echter niet terug te vinden op geologische kaarten (Hoppe, 1970).

In 1964 zijn er echter resten gevonden van een burcht met boerderijen. Deze resten zijn gelegen op een heuvel, midden in de meander en stammen uit de 9^e eeuw (Herrenbrod, 1963 geciteerd door Hoppe, 1970). Geconcludeerd kan worden dat de meander voor de 9^e eeuw afgesneden is van de hoofdstroom.

14.1.4 Duisburg

Uit de onderzoeken van Shala (2001) en Zhou (2000) blijkt dat de opbouw van de geologische terrassen dusdanig is dat de loop van de Rijn bij Mündelheim niet wezenlijk is veranderd. Er is enkel sprake van een kleine erosie in de buitenbocht van de meander. Dit wordt weergegeven in figuur 35.

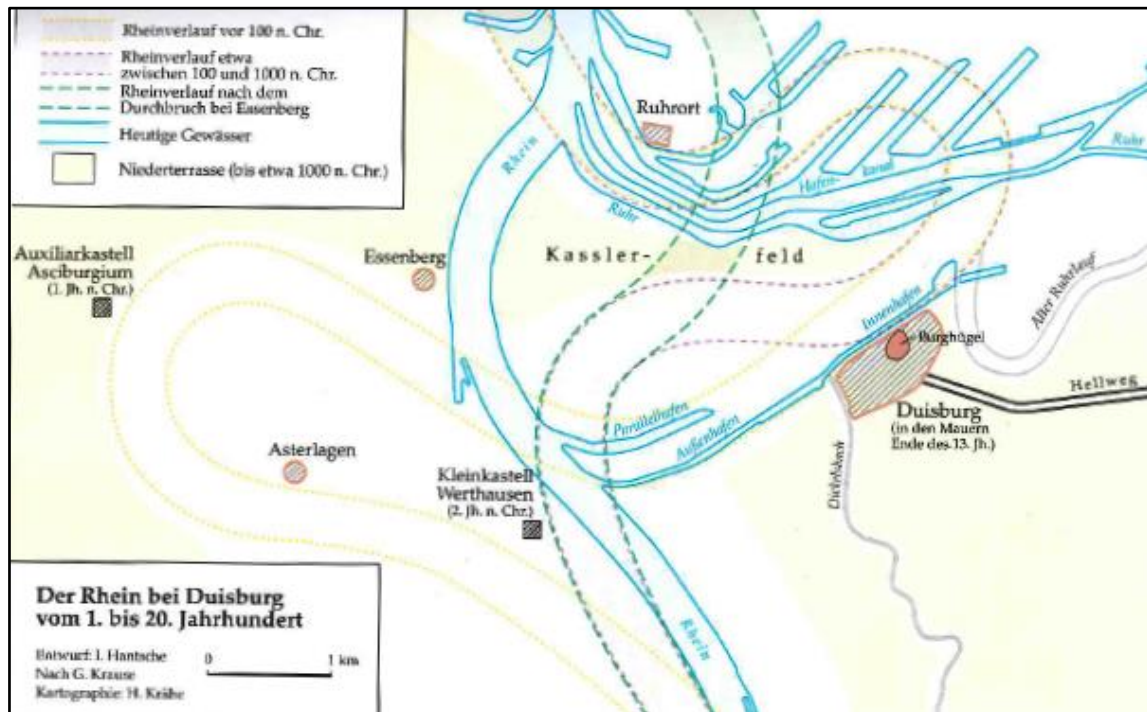


Figuur 35: Rijnloop bij Mündelheim rond het jaar 1300 (gearceerde gebied, uitsnede van Eich et al. (1983); Shala 2001)

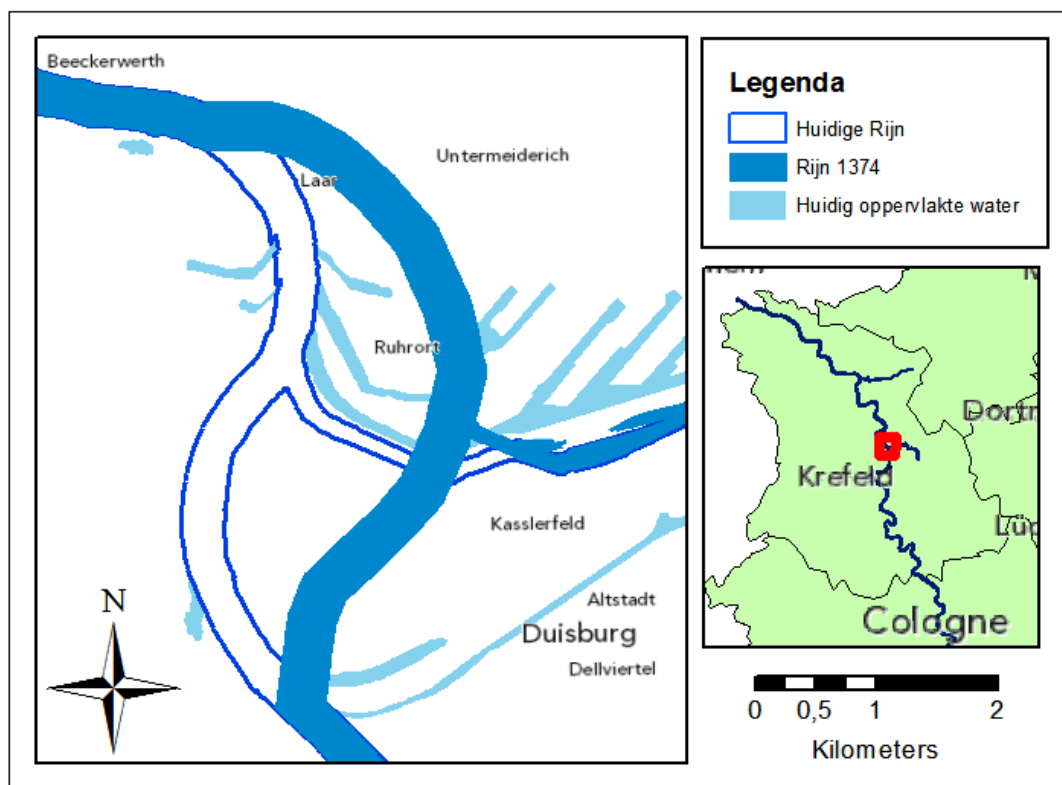
Bij Essenberg (stadsdeel van Duisburg) is een volgende afgesneden meanderbocht gelegen. Voor deze meanderbocht zijn verschillende theorieën over het tijdstip waarop deze bocht werd afgesneden van de hoofdgeul. Deze theorieën verschillen op meerdere punten. Het is niet met zekerheid te zeggen welke van deze theorieën klopt. Voor elke theorie zijn argumenten voor, maar ook argumenten tegen aan te voeren. Echter de overeenkomst tussen deze theorieën is dat deze meanderbocht volgens alle theorieën voor 1200 afgesneden is van de hoofdgeul (Hoppe, 1970; Hantsche, 1999; Scheller, 1957). Deze meanderbocht zal niet worden meegenomen in de reconstructie.

Het verloop van de Rijn bij Duisburg is in de geschiedenis meerdere malen ingrijpend veranderd. De grens waaraan de Rijn gelegen is, kan worden afgeleid aan de locaties van oude Romeinse forten. In de vroege Middeleeuwen liep de Rijn met een bocht in oostelijke richting, die al vanuit de Romeinse tijd stamde. Deze bocht bleef gehandhaafd tot na de afsnijding van de meanderbocht bij Essenberg. Deze doorbraak heeft een sterke invloed uitgeoefend op de meander bij Duisburg. De rivier bleef onderhevig aan veranderingen. In 1400 was door dichtslibben van de rivier scheepvaart in Duisburg niet meer mogelijk. Dit duidt op een in westelijke richting migrerende rivierloop, zoals te zien is in figuur 36 (Hantsche, 1999).

Op basis van het hoogtemodel is niets te zeggen over deze verschuiving. Dit is verklaarbaar door de vele ingrepen die er zijn gepleegd aan het landschap door de ontwikkeling van Duisburg. Daarom is er aangenomen dat figuur 36 een juiste afbeelding geeft van de Rijn. Hierop is de reconstructie gebaseerd. Deze reconstructie is te zien op figuur 37.



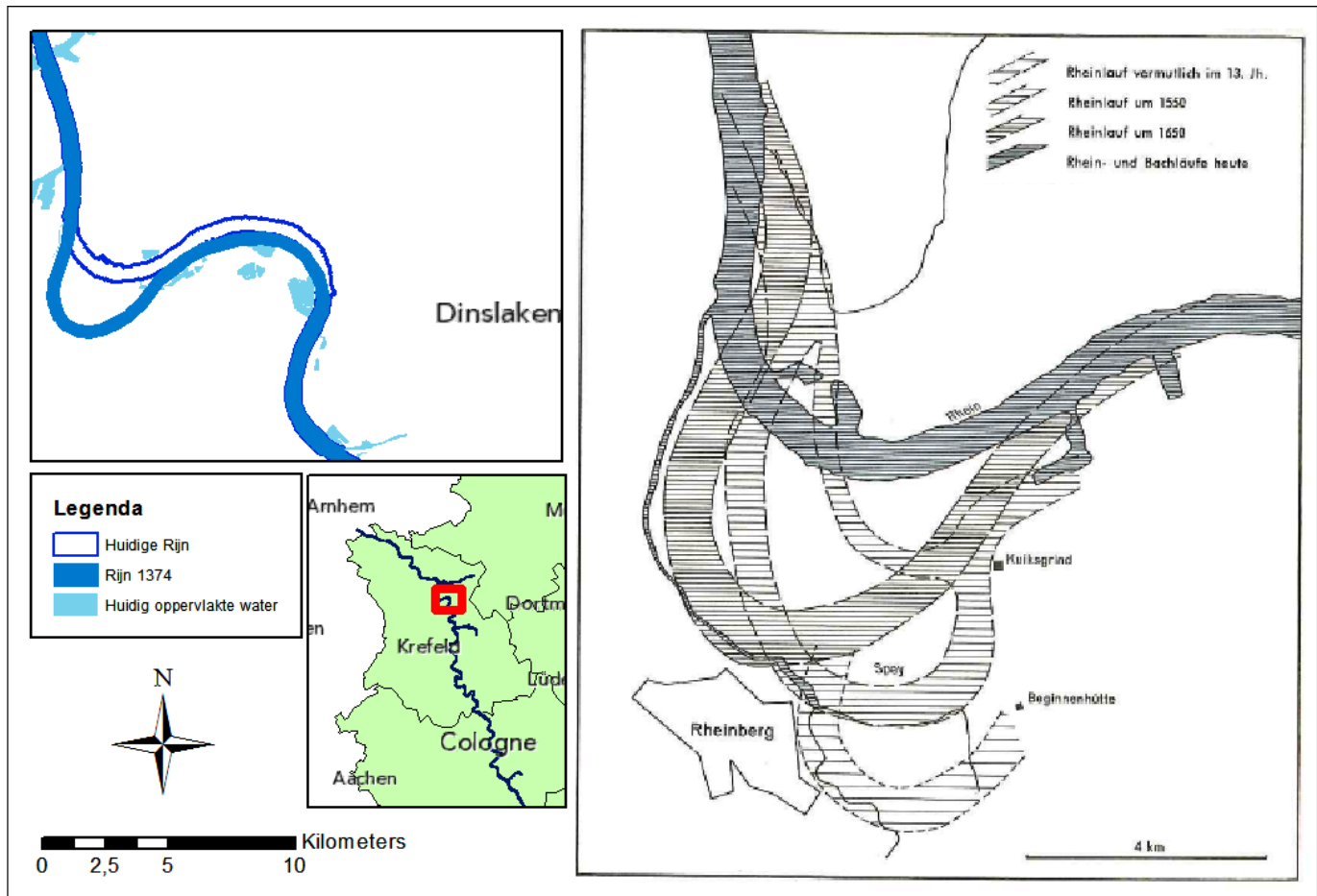
Figuur 36: De Rijn bij Duisburg van de eerste tot de 20e eeuw (Hantsche, 1999)



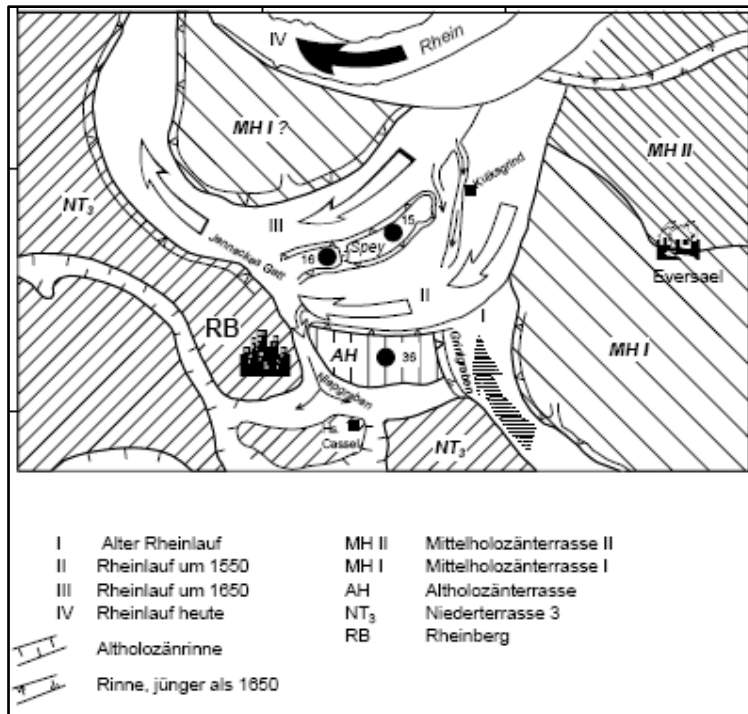
Figuur 37: De Rijn bij Duisburg

14.1.5 Dinslaken/Rheinberg

De reconstructie bij Dinslaken/Rheinberg wordt allereerst gebaseerd op twee kaarten (figuur 38 en figuur 39). Op deze kaarten is duidelijk zichtbaar dat de Rijn zeer dicht langs Rheinberg heeft gestroomd en hierdoor een meer zuidelijke loop heeft gehad op dit traject. Wanneer het hoogtemodel wordt geraadpleegd, blijkt dit inderdaad terug te vinden te zijn in de hoogtes. Er zijn twee mogelijke lopen mogelijk. Op basis van hoogte en kennis van de migratieprocessen van meanders is gekozen om de meest westelijke optie te kiezen. De oostelijkere optie is zeer waarschijnlijk van jongere leeftijd (gezien de bodemhoogte) en het ligt voor de hand dat de loop in oostelijke richting is gemigreerd en uiteindelijk daardoor afgesneden is van de Rijn.



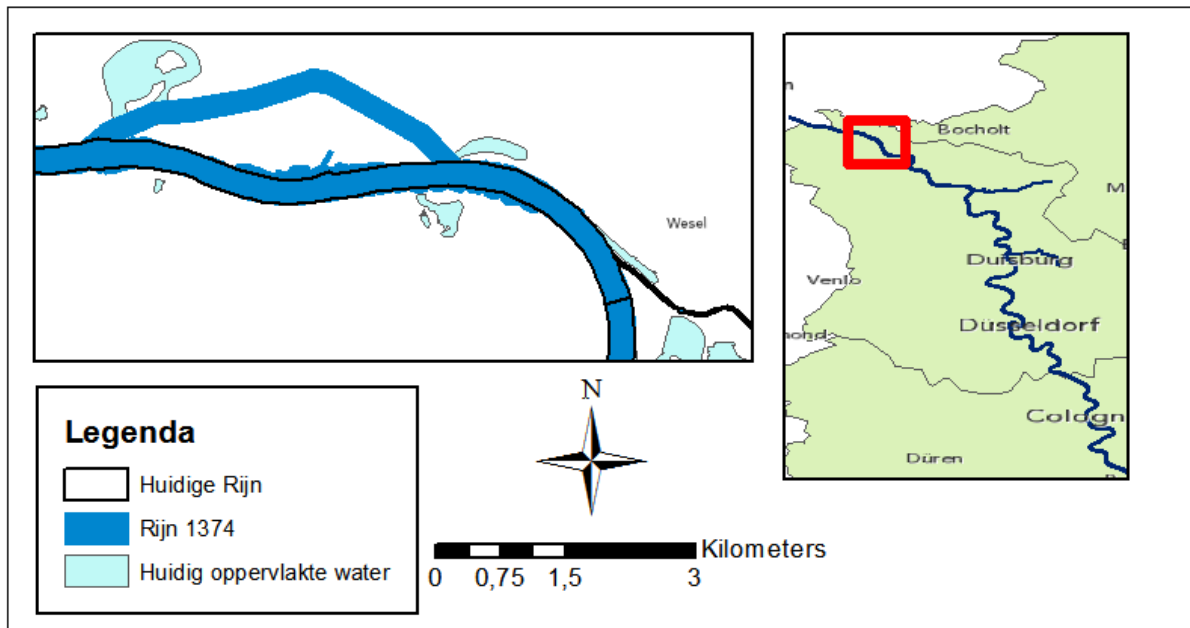
Figuur 38: Vermoedelijke loop van de Rijn nabij Rheinberg (Hoppe, 1970)



Figuur 39: Vermoedelijke loop van de Rijn bij Rheinberg (Shala, 2001)

14.1.6 Wesel

Hoppe (1970) stelt dat de veranderingen in de loop van de Rijn nabij Wesel niet groot, maar wel heel verschillend van aard zijn geweest. Op kaarten zijn talrijke sporen van vroegere lopen van de Rijn te herkennen. Op de oudst beschikbare schets, die stamt uit de 16^e eeuw, is te zien dat de Rijn westelijker stroomt dan nu. Daarnaast wordt er een kromming naar het Oosten weergegeven tussen Büdderich en Wesel, wat overeenkomt met de huidige situatie. De reconstructie is zichtbaar in figuur 40.



Figuur 40: De vermoedelijke Rijnloop nabij Wesel in 1374

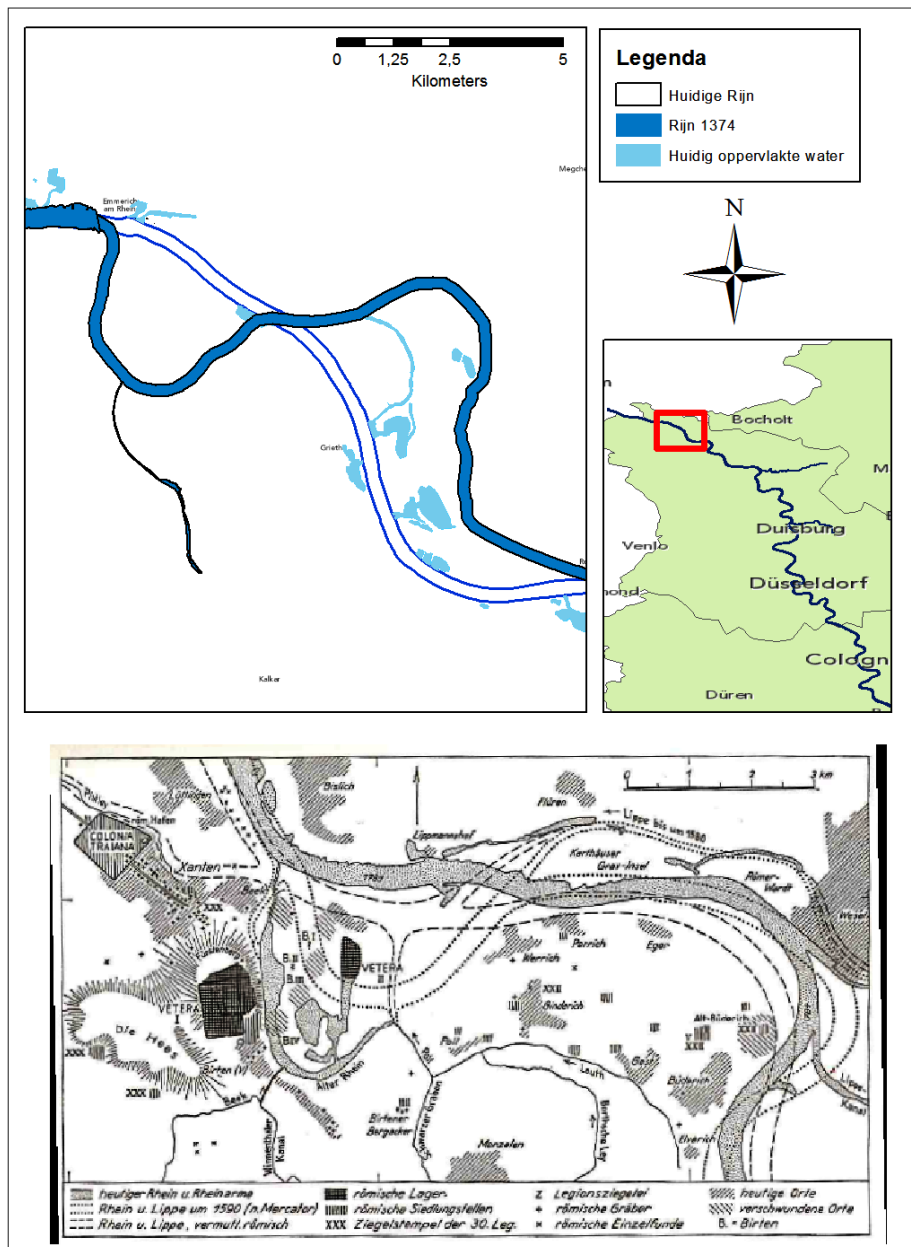
14.1.7 Xanten

Xanten is gelegen op de rand van een lager terras. Deze rand is ook de grens voor een inmiddels afgesneden meanderbocht. Deze bocht is slecht zichtbaar in het landschap. De kreek Pistley wordt door deze oude meander doorsneden. Deze meander is al ver voor de middeleeuwen dichtgeslibd (Hoppe, 1970).

Daarnaast zijn er aan beide kanten van de Rijn (oostelijk van Xanten) twee oude meanders te herkennen in het landschap. Over deze twee meanderbochten is weinig bekend. Het plaatsje Bislich wordt voor het eerst genoemd in 1291. Omdat deze plaats vlakbij een breekpunt voor de meest zuidelijk gelegen meander is gelegen (figuur 41), is het waarschijnlijk dat deze bocht al voor de 13^e eeuw is afgesneden. Over de Noordelijke van de twee is nog minder bekend. Het is moeilijk te zeggen welke van de twee invloed heeft uitgeoefend op de ander (Hoppe, 1970). Gebaseerd op bodemhoogtes wordt aangenomen dat de meest noordelijke van de twee in de middeleeuwen nog onderdeel van de Rijn was.

14.1.8 Rees

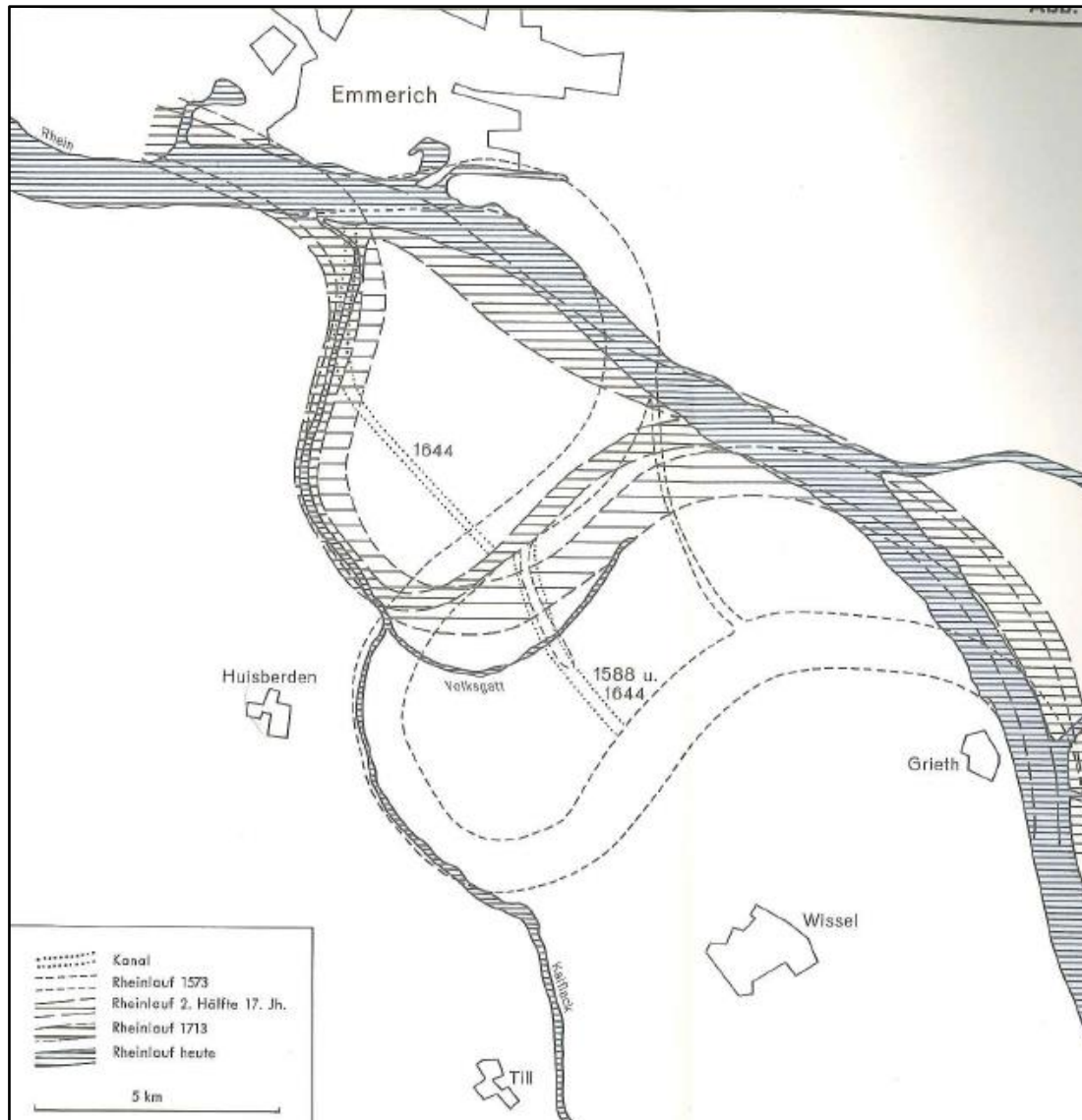
Tussen Rees en Emmerik (Emmerich) zijn twee waterlichamen gelegen. Deze lichamen hebben alle tekenen van oude meanderbochten. Dit is ook zichtbaar in figuur 41. In het boek van Hoppe (1970, p. 24) wordt omschreven dat de bocht om Grietherbusch (dat tussen beide waterlichamen in ligt) in de 14^e of 15^e eeuw is verlaten. Dit betekent dat het zeer goed mogelijk is dat de grootste bocht nog onderdeel van de Rijn was in 1374. Hier wordt dan ook van uitgegaan. De gemeten afstand tussen de kern van de huidige Rijn en de kern van deze meanderbocht is circa 3.5 km; uitgaande van de gemiddelde migratiesnelheid versterkt dit de onderbouwing voor deze reconstructie. De reconstructie van dit gedeelte is gevisualiseerd in figuur 41.



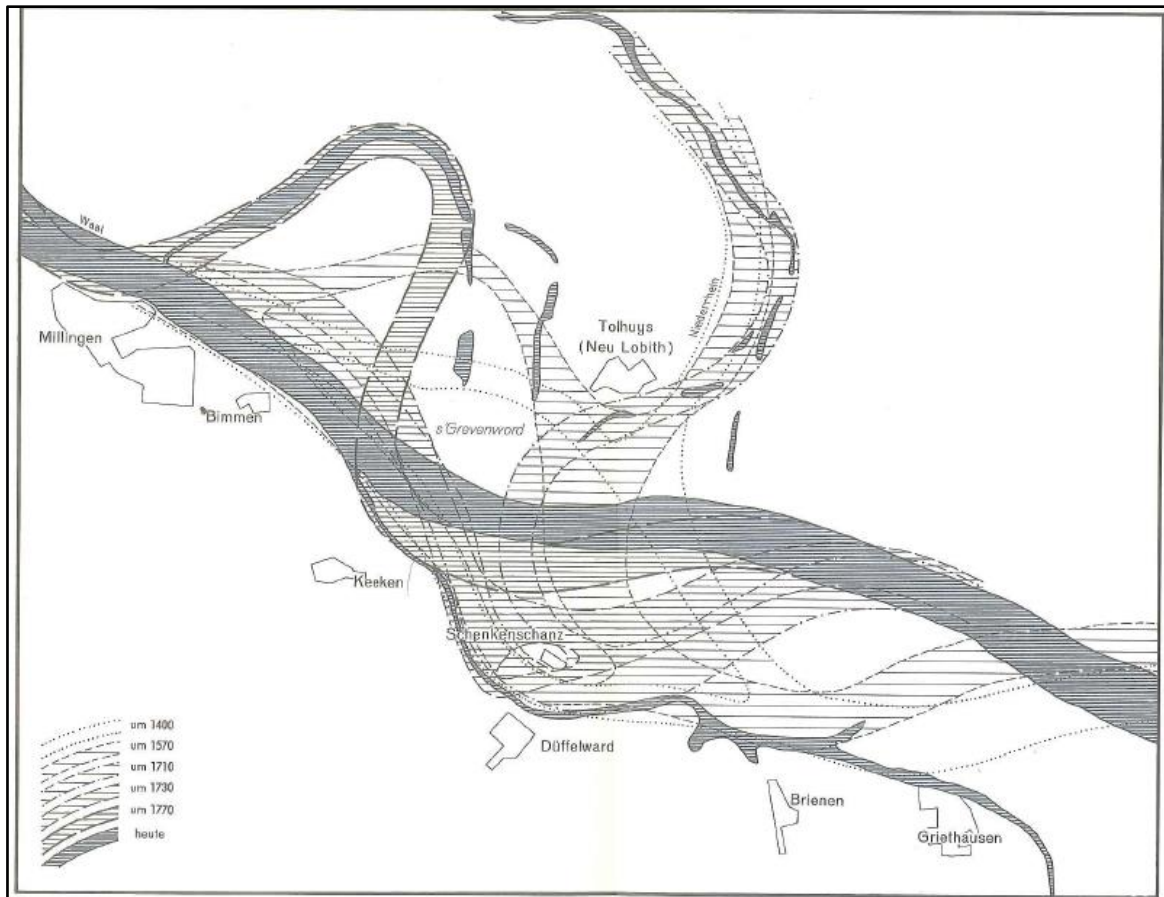
Figuur 41: De loop van de Rijn nabij Rees

14.1.9 Lobith

Van de Rijn nabij Emmerich en Lobith zijn kaarten (figuur 42 en figuur 43) beschikbaar die stammen uit de 16^e eeuw (Hoppe, 1970). Deze kaarten zijn als basis gebruikt voor de reconstructie van de betreffende meanders. Naast deze kaarten is ook de bodemhoogte gebruikt. Op basis van het huidige bodemhoogtemodel, de loop zoals aangegeven op de kaarten en de gemiddelde migratiesnelheid is er een reconstructie gemaakt.



Figuur 42: De Rijnloop nabij Emmerich door de tijd heen (Hoppe, 1970)



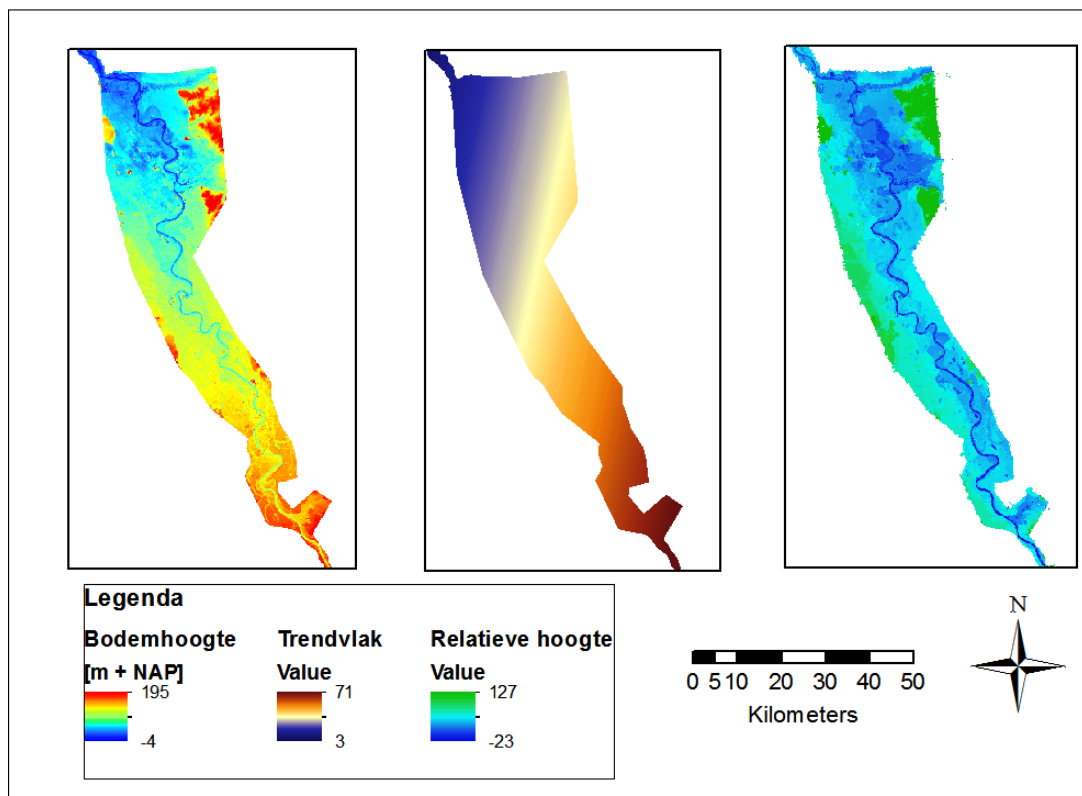
Figuur 43: De geschatte loop van de Rijn van 1400 tot nu (Hoppe, 1970)

Uiteindelijk is deze verandering van de rivierloop niet in het model opgenomen. Deze aanpassingen vielen buiten de modelgrenzen. Doordat deze aanpassing voor de beantwoording van de hoofdvragen geen meerwaarde heeft, maar wel een fors meerwerk betekent, is ervoor gekozen om deze aanpassing achterwege te laten.

Bijlage D

In deze bijlage wordt verder en dieper ingegaan op de tweede categorie ruwheidsscenario's. Deze categorie bestaat uit ruwheden als gevolg van landgebruik die op relatieve hoogte is gebaseerd. Deze hoogte is bepaald met behulp van het huidige bodemhoogtemodel (linker gedeelte van de figuur 44). Hiervoor zijn twee redenen. De eerste is dat op het moment van de bewerkingen er nog verschillende onopgeloste vragen waren, waardoor het gereconstrueerde bodemhoogtemodel nog niet gereed was. De tweede reden is dat wordt aangenomen dat gebieden die nu relatief hoog gelegen zijn, dit vroeger ook waren. Dit komt overeen met de locatie van onder andere de oude binnenstad van Keulen. Deze is in de huidige situatie hoger dan de recenter gebouwde delen van Keulen. Bekend is dat de mensen in de oudheid zich vestigden op hogere gronden. Dit ondersteunt de aanname om gebruik te maken van het huidige bodemhoogtemodel.

De eerste stap om tot de relatieve hoogte van elk hoogtepuntje afzonderlijk te komen, is het genereren van een trendvlak. Dit vlak moet de hoogtetrend van het gehele gebied weergeven. Deze trend loopt af in de richting van Nederland. Dit is ook zichtbaar in het middelste gedeelte van figuur 44. Dit trendvlak is gemaakt met behulp van basisfunctionaliteiten van ArcGis.



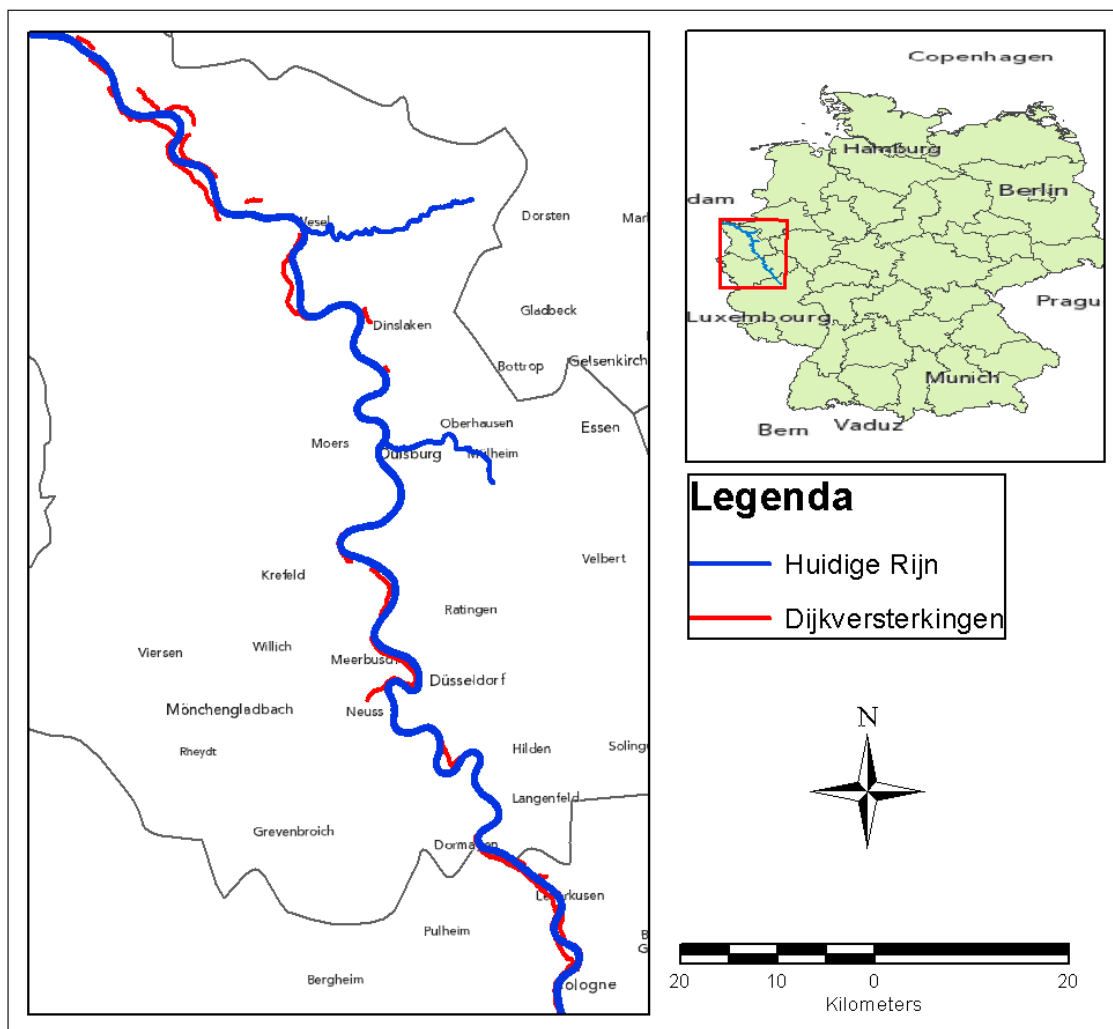
Figuur 44: Bepaling relatieve hoogte ten behoeve van de ruwheidsscenario's

Nadat het trendvlak is gegenereerd, worden met behulp van dit trendvlak en het huidige bodemhoogtemodel (linker gedeelte van de figuur) de verschillen tussen beide uitgerekend. Dit wordt ook gedaan met de basisfunctionaliteiten van ArcGis. Dit resulteert in het rechter gedeelte van figuur 44. Hierop is te zien of een locatie hoger of lager gelegen is dan het trendvlak. Een positieve waarde betekent dat de locatie hoger gelegen is dan het trendvlak. Logischerwijs betekent een negatieve relatieve hoogte dat de locatie lager dan het trendvlak is gelegen.

Bijlage E

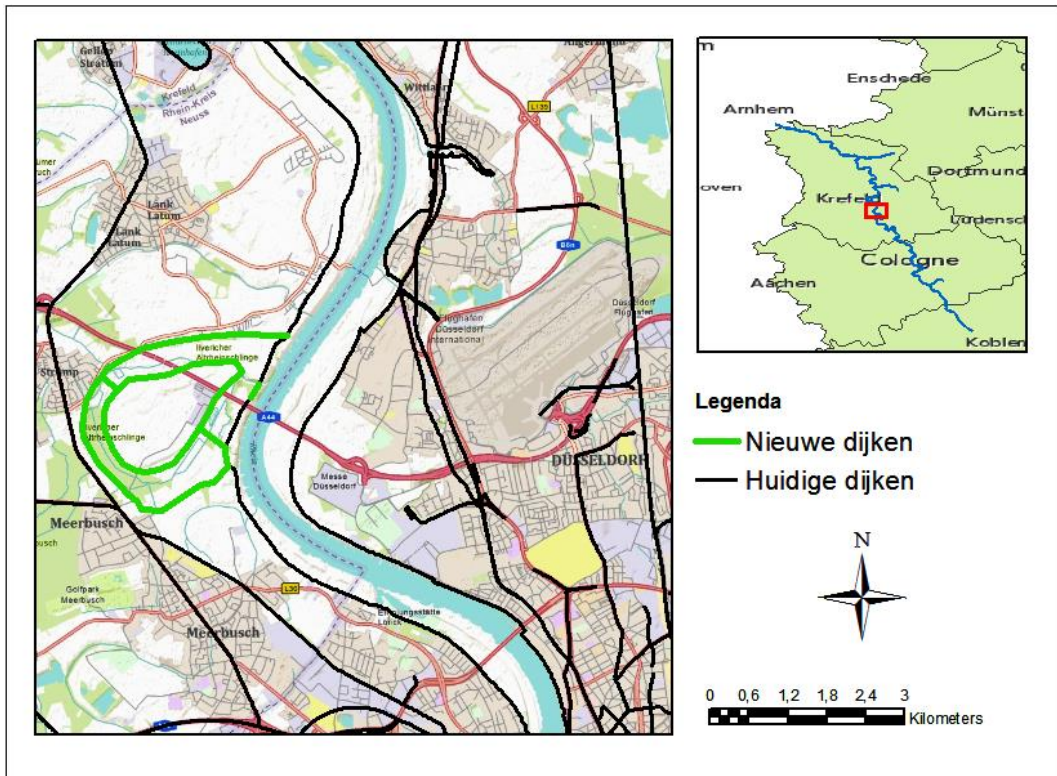
Er worden meerdere maatregelen langs de Niederrhein genomen om te voldoen aan de nieuwe maatgevende afvoeren die gelden. In de verschillende documenten worden vele mogelijke maatregelen genoemd. Veel van deze documenten spreken elkaar tegen over het feit welke maatregelen uitgevoerd worden en in welke uitvoering dit zal gebeuren. In het document Hochwasserschutzkonzept Nordrhein-Westfalen (MUNLV-NRW, 2006) en het Umweltbericht Nordrhein-Westfalen (MUNLV-NRW, 2009) staan maatregelen die zijn uitgevoerd of worden uitgevoerd voor 2020. Aangenomen wordt dat het model voor deze maatregelen moet worden veranderd, voor zover deze maatregelen nog niet in het model aanwezig zijn.

Allereerst wordt er 275 kilometer dijkverhoging toegepast (zie figuur 45). Met deze verhogingen worden de dijken verhoogd tot de hoogte waarop de dijken zijn berekend op de maatgevende afvoer op die locatie.



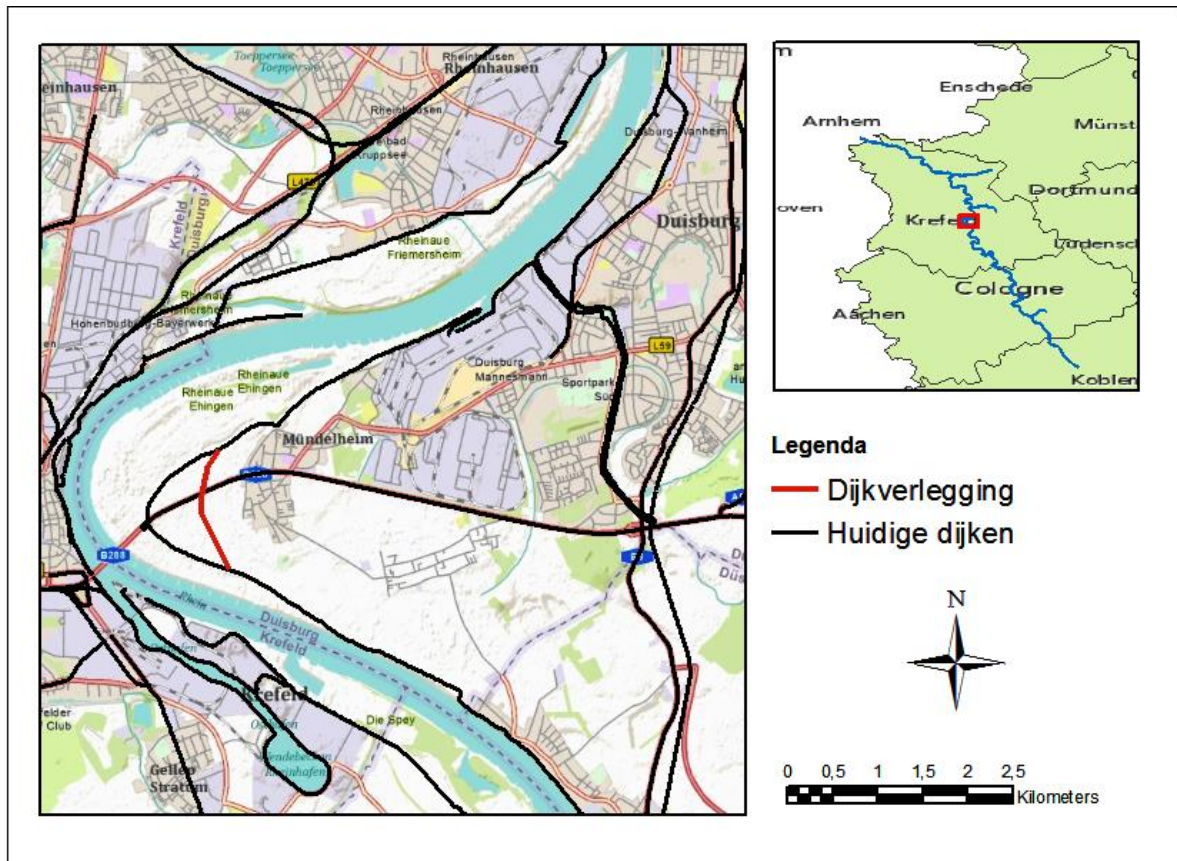
Figuur 45: Dijkversterkingen langs de Rijn tot 2020

Naast deze dijkverhogingen worden er ook een aantal waterstand verlagende maatregelen genomen om voorbereid te zijn op hogere afvoeren. Alleen de maatregelen die stroomafwaarts van Keulen worden genomen en nog niet in het model aanwezig zijn, worden hier beschreven.



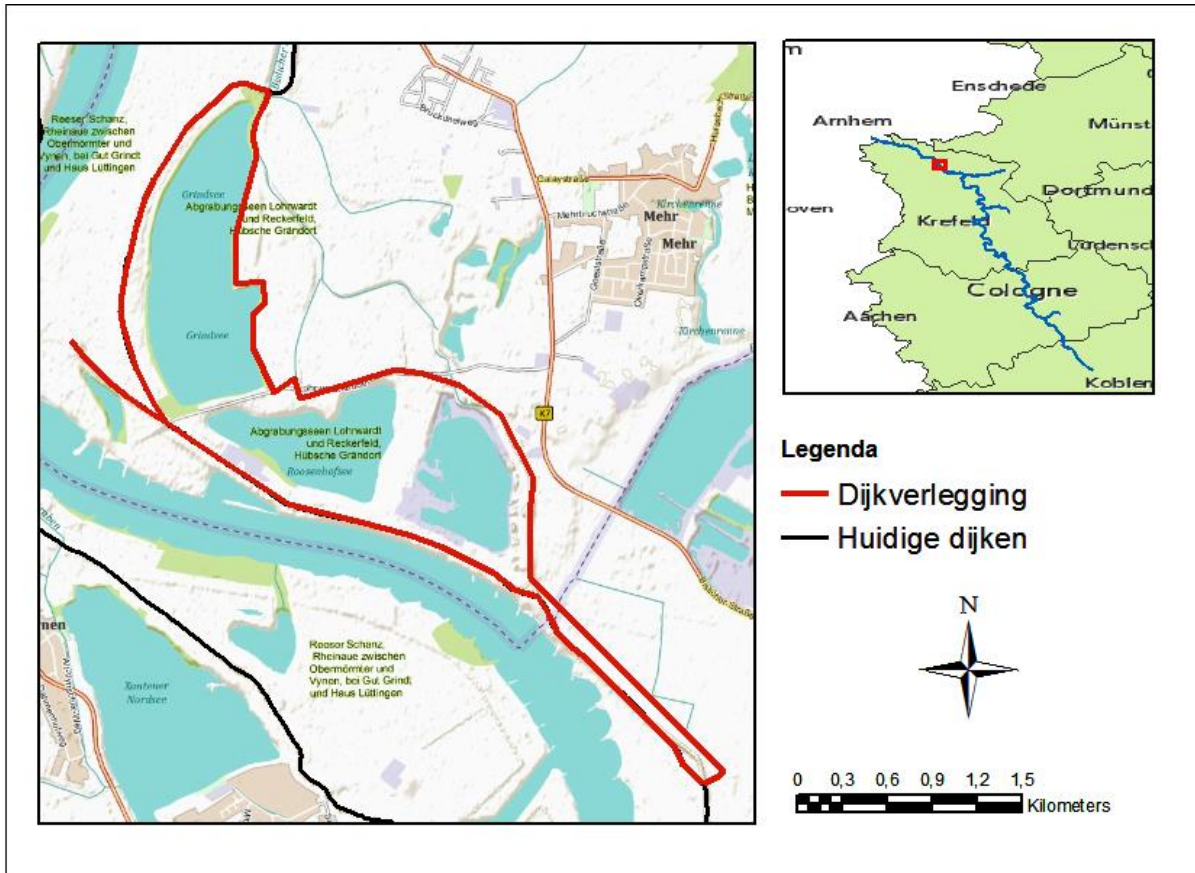
Figuur 47: Retentiegebied IJvericher Bruch

Bij Mündelheim is een dijkverlegging ingezet om de waterstand te verlagen. Deze verlegging levert een oppervlaktewinst op van ongeveer 64 hectare. Deze oppervlakte kan tijdens een hoogwater worden beschouwd als extra meestromend oppervlak.



Figuur 48: Dijkverlegging Mündelheim

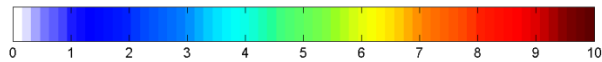
Bij Lohrwardt is eveneens een dijkverlegging gerealiseerd. De oude dijk is echter niet verwijderd, maar verlaagd (tot een hoogte die bij Rijn kilometer 834.2 gelijk is aan 20 m + NAP) en loopt nu parallel aan de waterspiegel. Er wordt een overlaatdrempel gerealiseerd met een hoogte van 19.5 m + NAP. Hierover zal het water het ontstane retentiebekken instromen, tot het waterpeil een hoogte van 20 m + NAP bereikt. Dan stroomt het water over de gehele lengte van de oude dijk het bekken in.



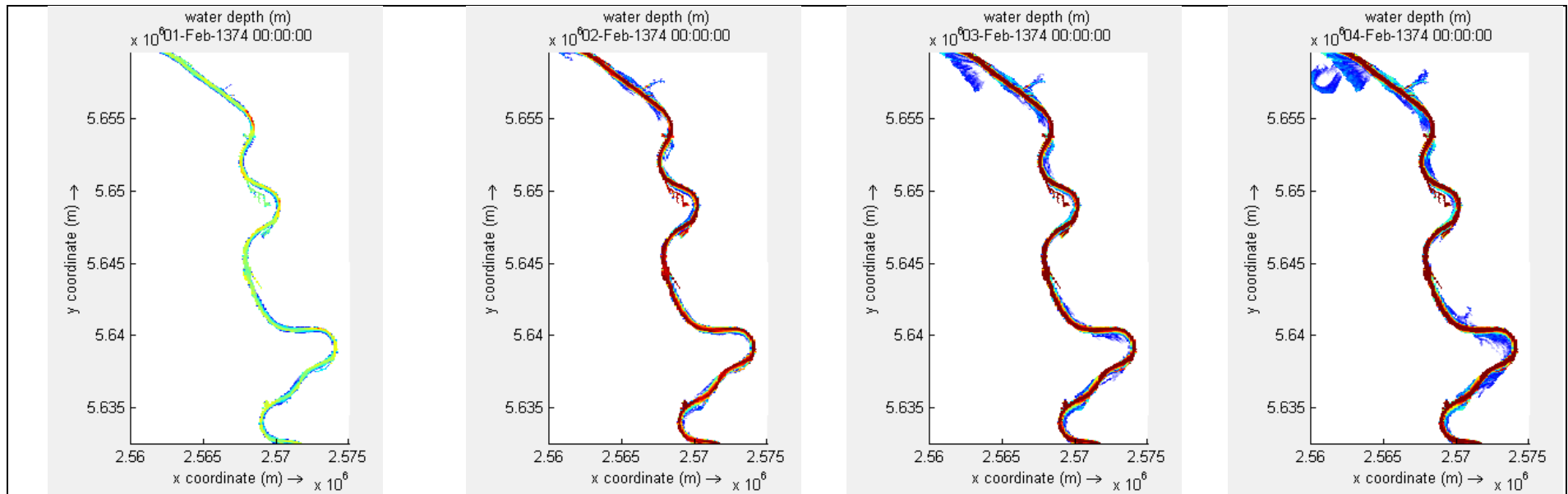
Figuur 49: Dijkverlegging Lohrward

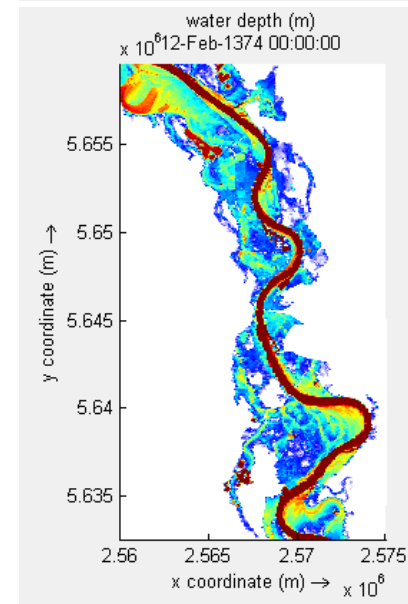
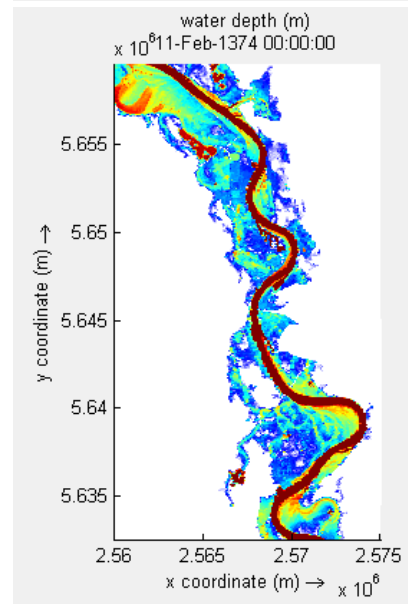
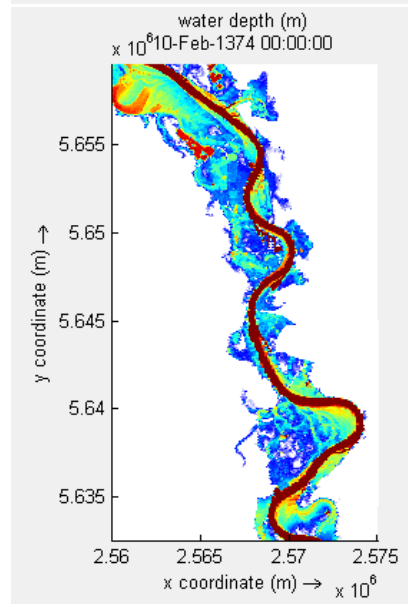
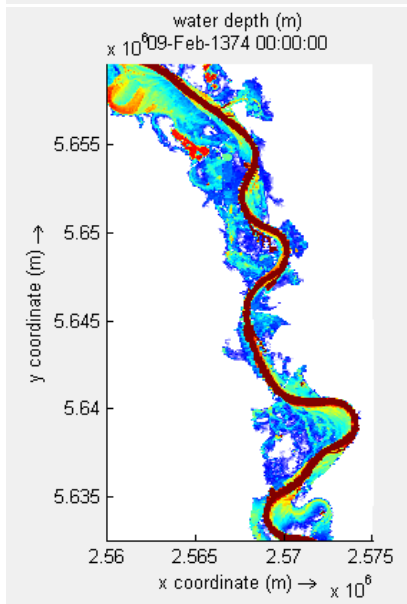
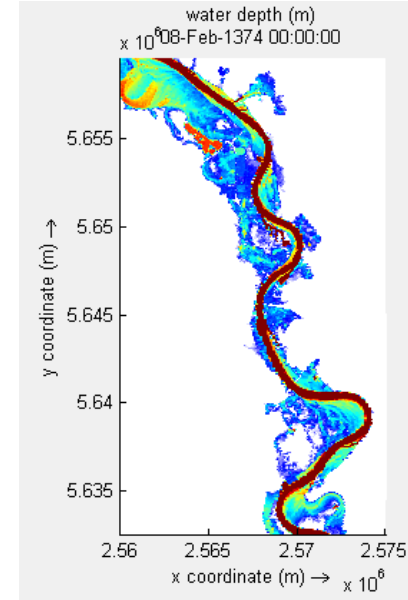
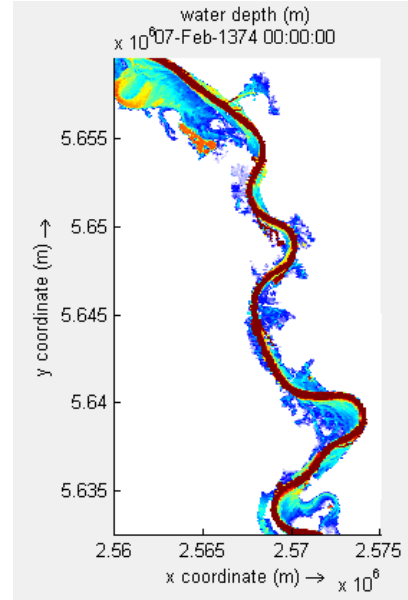
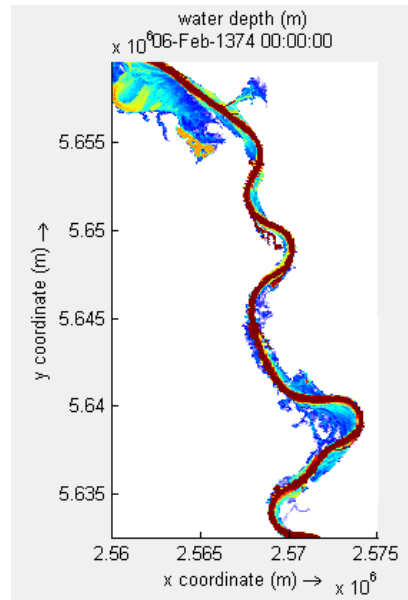
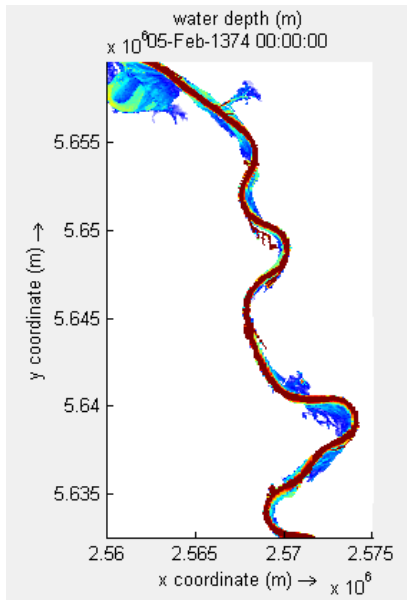
Bijlage F

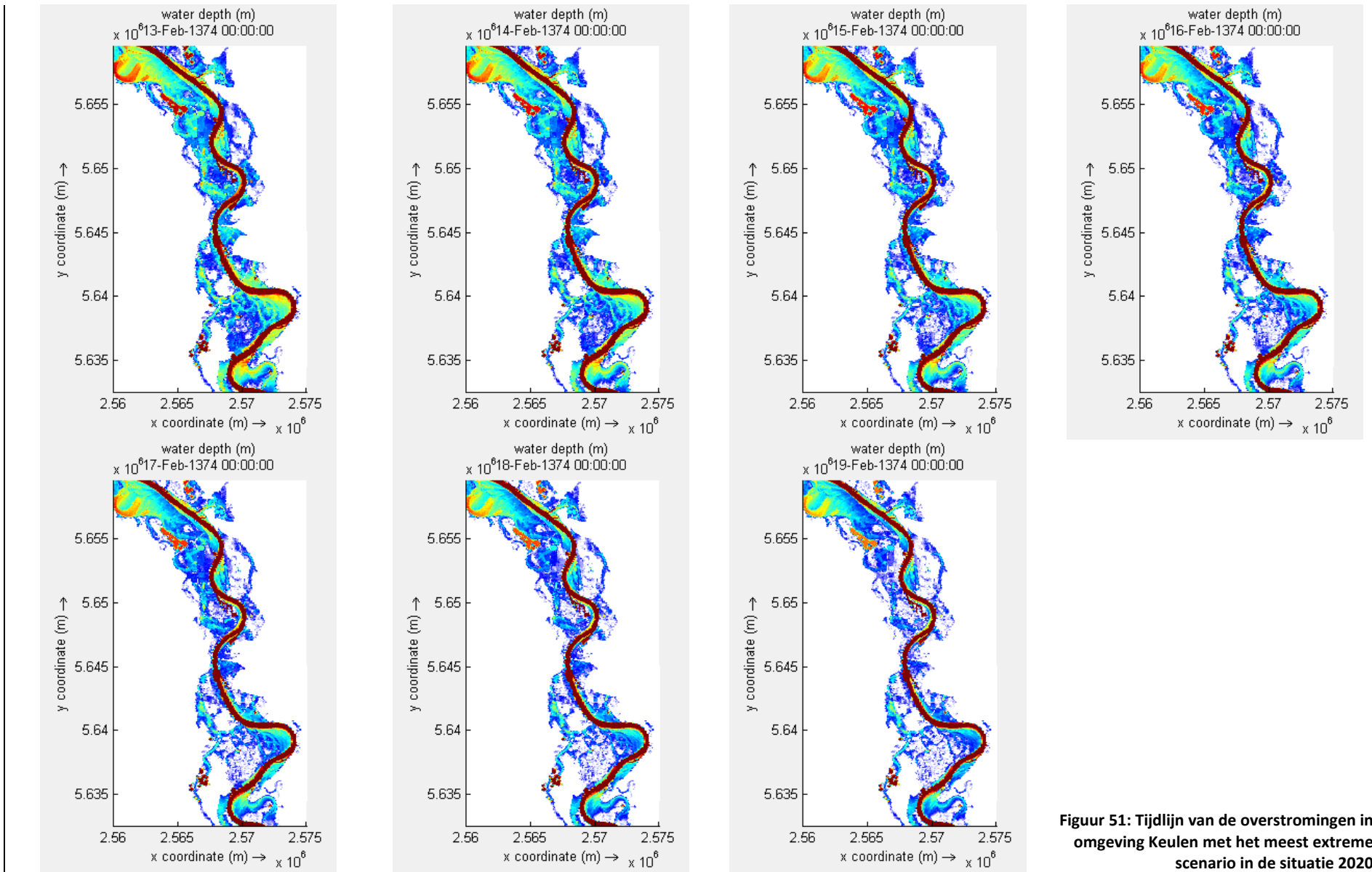
In deze bijlage worden de overstromingen voor het meest extreme (figuur 51) en het minst extreme scenario van het hoogwater 1374 in de omgeving van het huidige Keulen weergegeven. De stappen tussen elke afbeelding zijn 24 uur. De schaalbalk voor alle figuren is dezelfde. Deze is weergegeven in figuur 50.



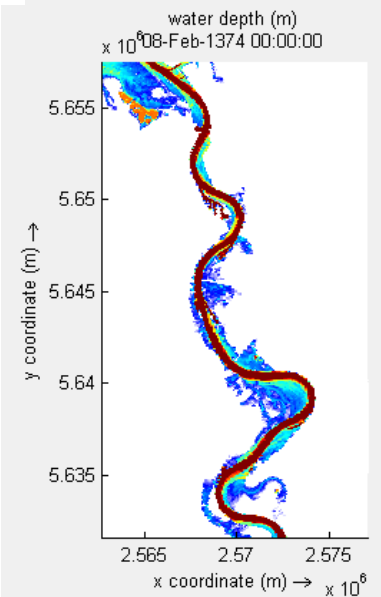
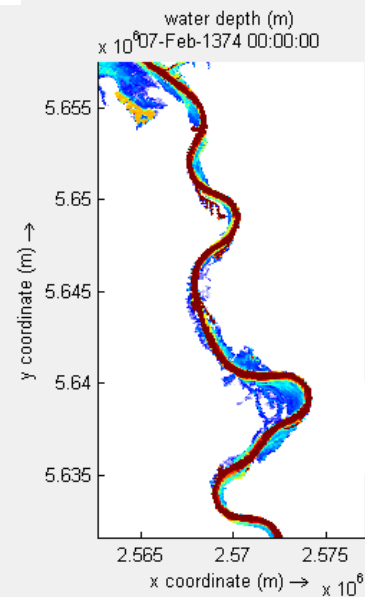
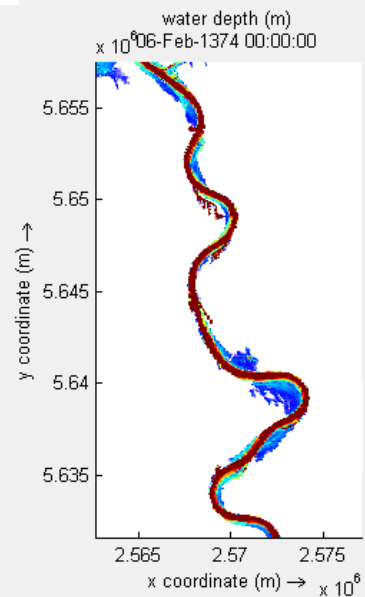
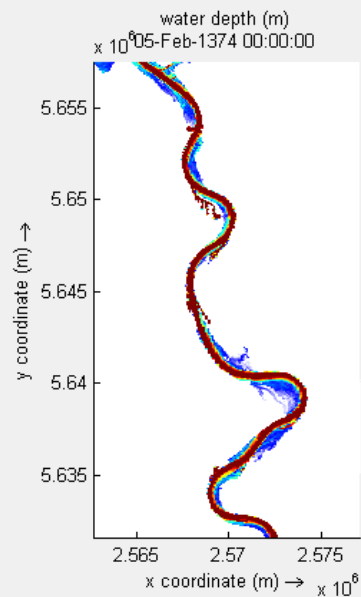
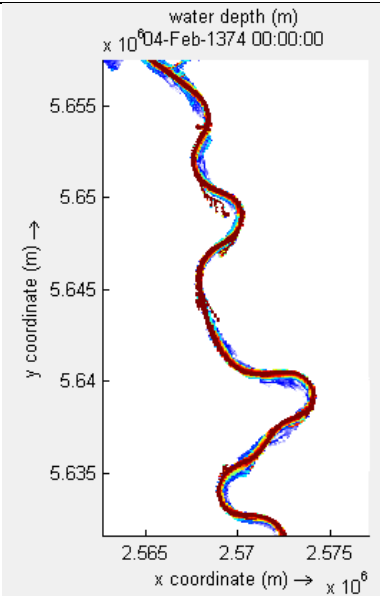
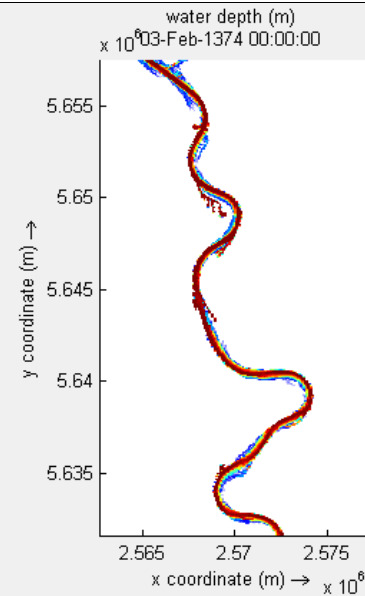
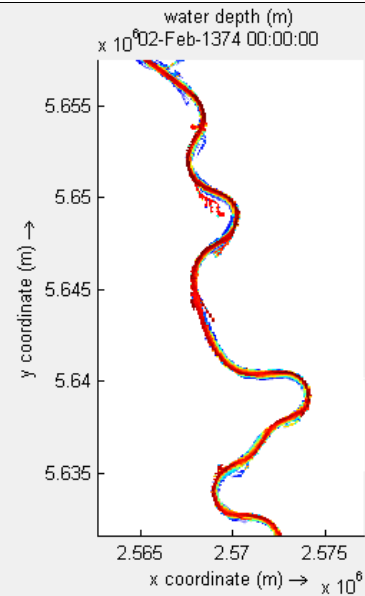
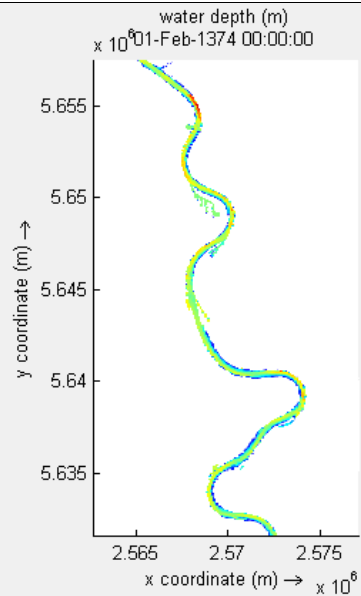
Figuur 50: Schaalbalk figuren

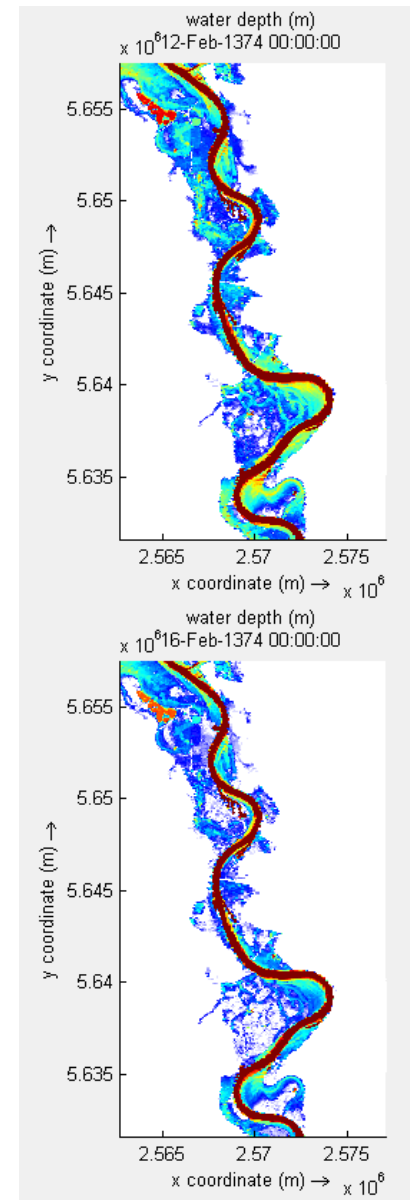
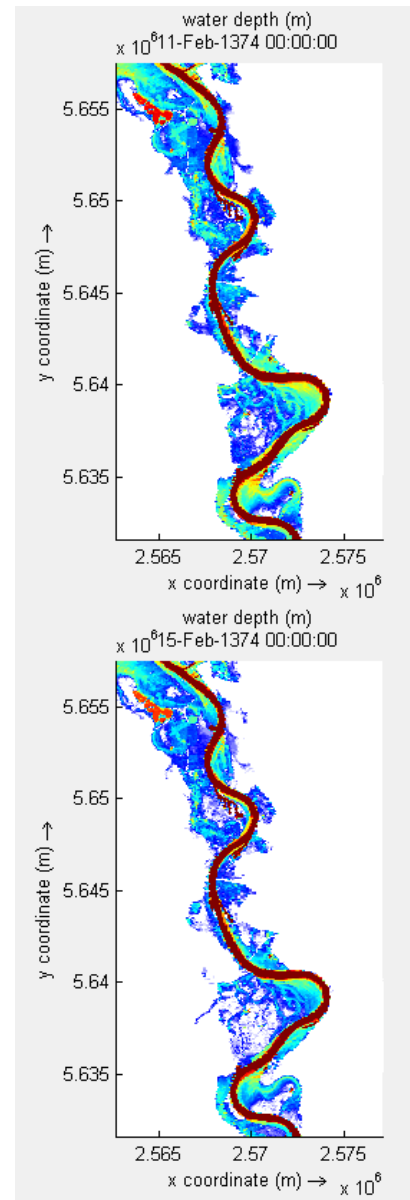
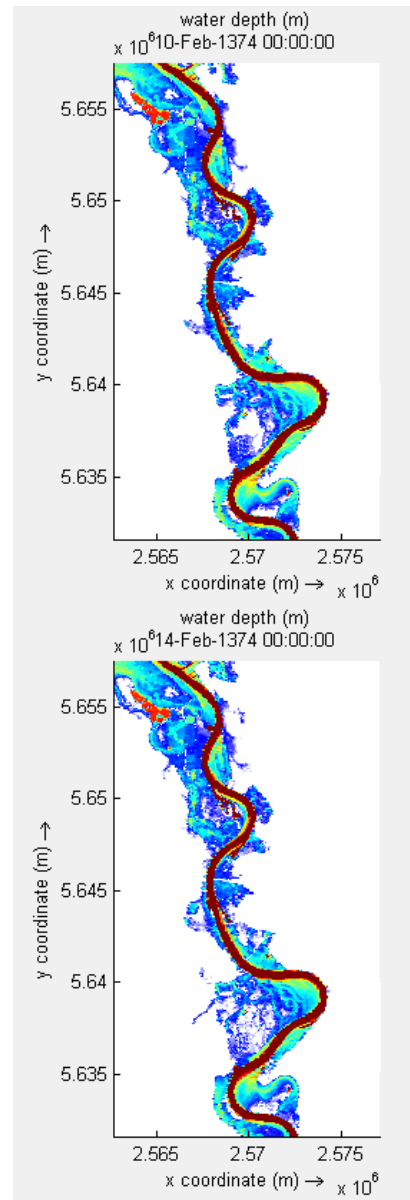
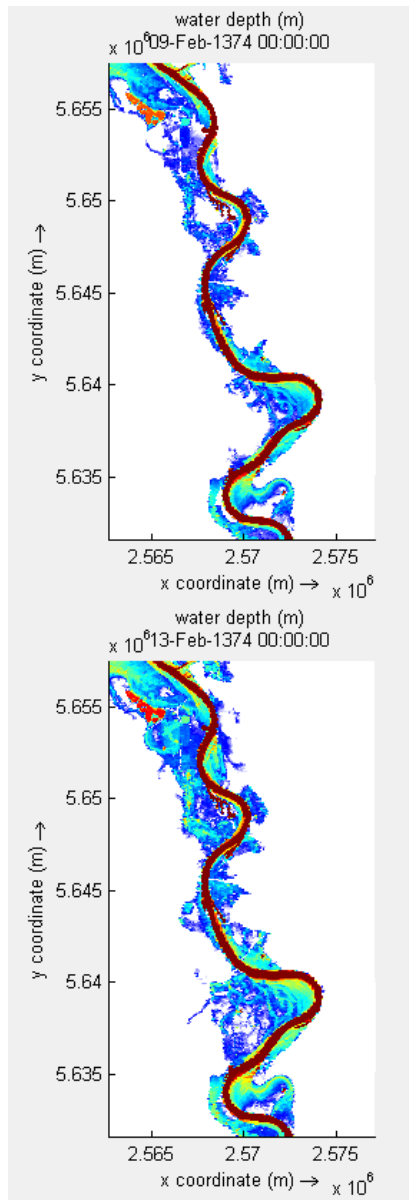


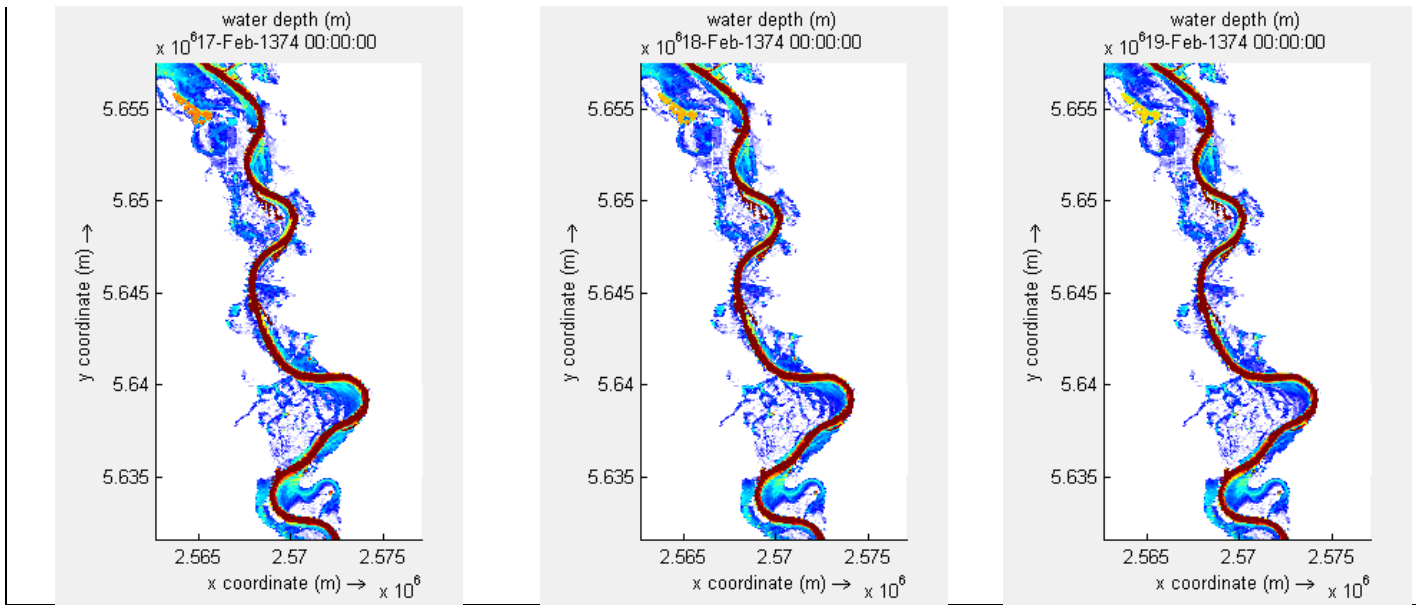




Figuur 51: Tijdlijn van de overstromingen in omgeving Keulen met het meest extreme scenario in de situatie 2020



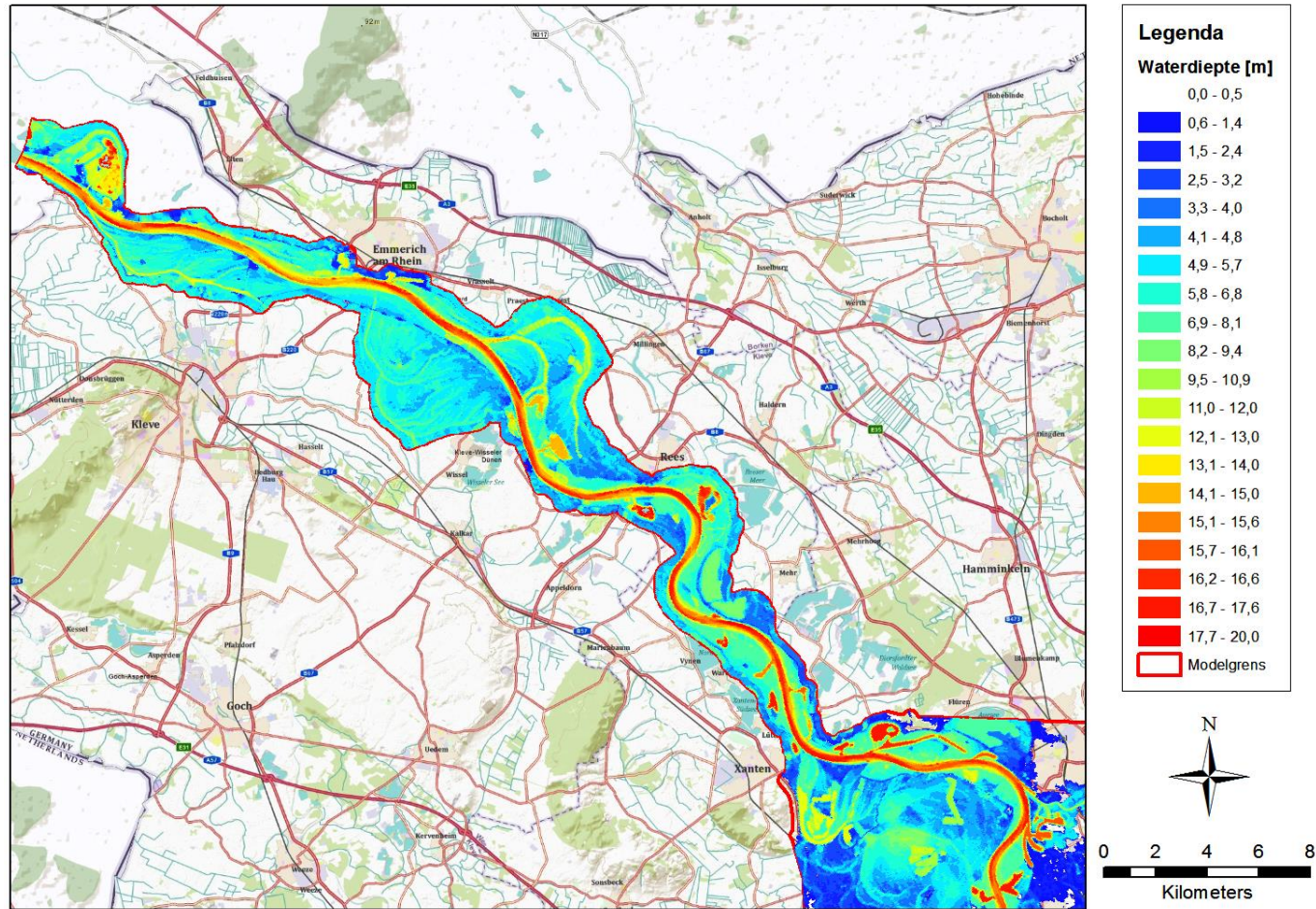




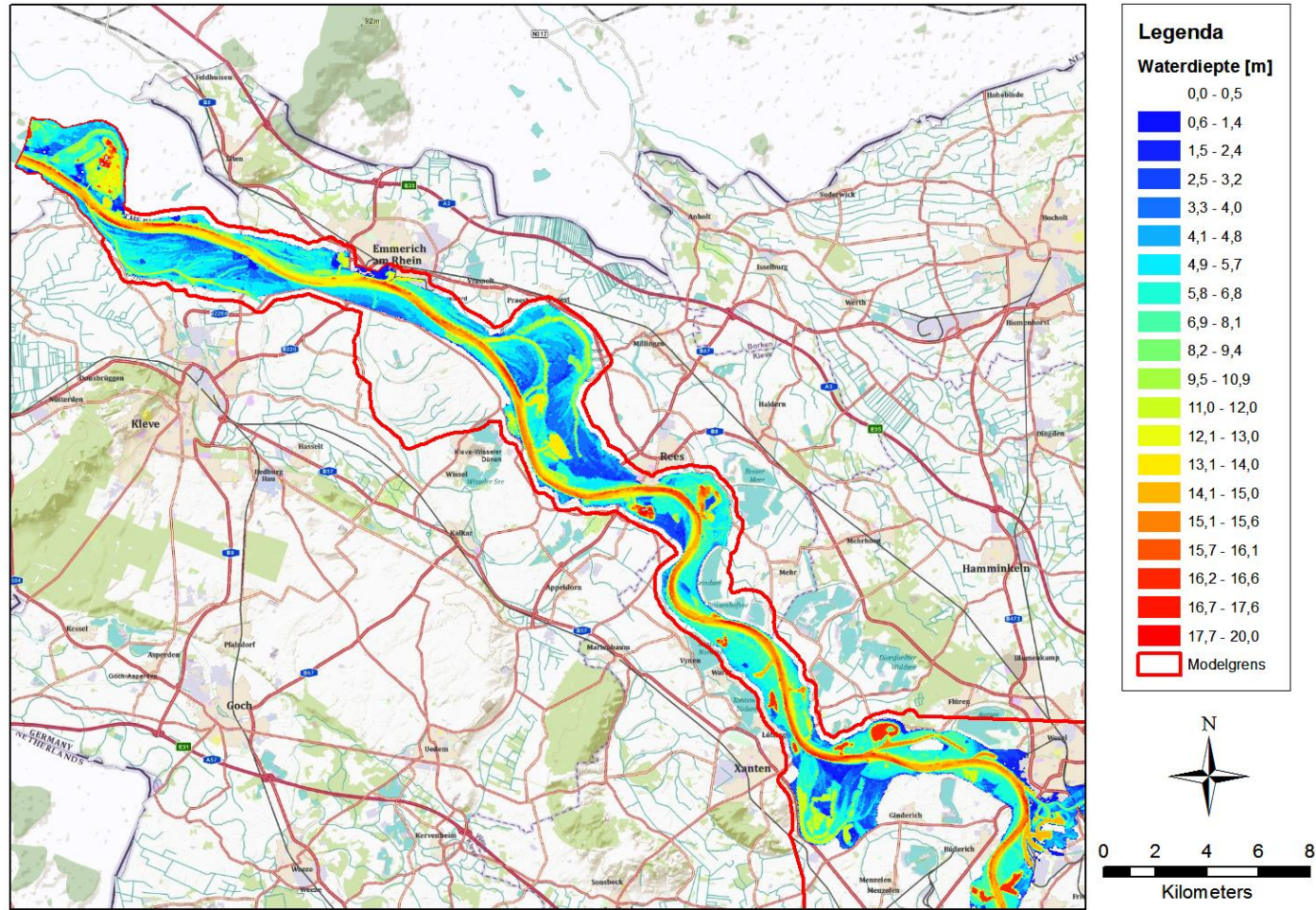
Figuur 52: Tijdlijn van de overstromingen in omgeving Keulen met het minst extreme scenario in de situatie 2020

Bijlage G

In deze bijlage is een kaart zichtbaar waarop de waterdieptes op het traject Wesel-Lobith (situatie 2020) tijdens het meest (figuur 53) en minst (figuur 54) extreme scenario van het hoogwater 1374 zijn weergegeven.



Figuur 53: Overstromingen in de situatie 2020 op het traject Wesel-Lobith tijdens het extreemste scenario



Figuur 54: Overstromingen in de situatie 2020 op het traject Wesel-Lobith tijdens het minst extreme scenario