

AK10456-2 LB

Q2702

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat, Directie Limburg

Meandermigratie en uitschuring van de Roer

Verslag

augustus 2000



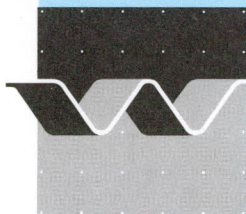
HASKONING

Ingenieurs- en
Architectenbureau

Haskoning Nederland B.V. is a company of



ROYAL HASKONING



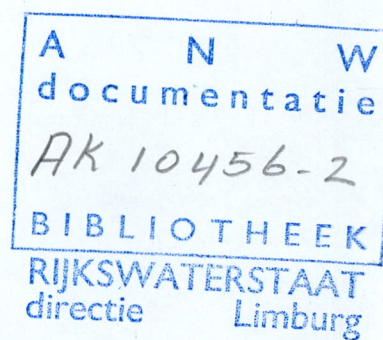
wl | delft hydraulics

DUB 2000

18525

Di: 192349

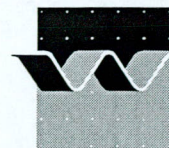
Meandermigratie en uitschuring van de Roer



E. Mosselman, J.J. Flikweert, H.J. Verheij, C. Stolker & G.J. Akkerman

Verslag

augustus 2000



OPDRACHTGEVER: Rijkswaterstaat Directie Limburg
Postbus 25
6200 MA Maastricht

TITEL: Meandermigratie en uitschuring van de Roer

SAMENVATTING:

De geprojecteerde snelweg RW73-zuid zal het Roerdal bij Roermond ondergronds kruisen. De tunnel moet zo diep worden aangelegd dat bodemerosie van de Roer in de komende 100 of 200 jaar niet op de tunnel zal stuiten. Deze diepte geldt voor de zone waarbinnen de meanders van de Roer in die perioden kunnen migreren.

In dit onderzoek wordt voor perioden van 100 en 200 jaar vastgesteld hoe ver de meanders van de Roer kunnen migreren en hoe diep de bodem door grootschalige ontwikkeling, beddingvormen, buitenbochtersie en hoogwatererosie kan uitschuren. Hierbij worden probabilistische technieken toegepast.

De voornaamste conclusie is dat, voor het behalen van de doelstelling, het tunneldak beduidend lager zal moeten liggen dan 14,5 m + NAP.

REFERENTIES: Overeenkomst LB-6224

VER.	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
1.0	dr.ir. E. Mosselman	29 mei 2000		ir. H. Verheij (concept)	prof.ir. E. van Beek
2.0	dr.ir. E. Mosselman	22 augustus 2000		prof.dr.ir. H.J. de Vriend	prof.ir. E. van Beek
PROJECTNUMMER: Q2702					
TREFWOORDEN: meander, erosie, riviermorfologie, Roer					
INHOUD:	TEKST	TABELLEN	FIGUREN	APPENDICES	
STATUS:	<input type="checkbox"/> VOORLOPIG <input type="checkbox"/> CONCEPT <input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF				

Inhoud

Samenvatting

1	Inleiding	1-1
1.1	Aanleiding tot het onderzoek	1-1
1.2	Doelstellingen	1-1
1.3	Aanpak	1-2
1.4	Organisatie	1-3
2	Meanderzone	2-1
2.1	Methode	2-1
2.2	Resultaten	2-2
2.2.1	Kwalitatieve beschouwingen	2-2
2.2.2	Migratiesnelheid	2-4
2.2.3	Mogelijke bochtafsnijdingen	2-7
2.2.4	Afbakening van de zone	2-8
2.3	Discussie	2-9
2.3.1	Tijdschaal en doorkijk naar 400 jaar	2-9
2.3.2	Monitoring	2-9
3	Snelheid en diepte van bodemerrosie	3-1
3.1	Methode	3-1
3.1.1	Algemeen	3-1
3.1.2	SOBEK-model voor grootschalige ontwikkeling en hoogwatererosie	3-1
3.1.3	Formules voor beddingvormen en buitenbochterosie	3-3
3.2	Resultaten	3-5
3.2.1	Waterstand en afvoer met een herhalingsjijd van 200 jaar	3-5
3.2.2	Grootschalige morfologische ontwikkeling	3-6
3.2.3	Beddingvormen	3-8
3.2.4	Buitenbochterosie	3-9
3.2.5	Hoogwatererosie	3-11
3.3	Discussie	3-11
3.3.1	Incidentele en structurele erosie	3-11

	3.3.2 Hydrodynamisch-morfologische effecten van blootlegging tunneldak.....	3-11
4	Risico bij verschillende tunneldiepten.....	4-1
	4.1 Methode.....	4-1
	4.2 Resultaten.....	4-3
	4.3 Discussie.....	4-5
5	Mitigerende maatregelen.....	5-1
	5.1 Probleemanalyse.....	5-1
	5.2 Voorkoming van scherpe bochten nabij het tunneltracé.....	5-2
	5.2.1 Inleiding.....	5-2
	5.2.2 Volledige fixatie van de oever.....	5-2
	5.2.3 Toelaten van beperkte dynamiek.....	5-3
	5.3 Stroomlijning tunnel.....	5-4
6	Conclusies en aanbevelingen.....	6-1
	6.1 Conclusies.....	6-1
	6.2 Aanbevelingen.....	6-1
7	Literatuurverwijzingen.....	7-1

Samenvatting

De geprojecteerde snelweg RW73-zuid zal het Roerdal bij Roermond ondergronds kruisen. De tunnel moet zo diep worden aangelegd dat bodemerosie van de Roer in de komende 100 of 200 jaar niet op de tunnel zal stuiten. Deze diepte geldt voor de zone waarbinnen de meanders van de Roer in die perioden kunnen migreren.

De zone waar de Roermeanders de komende 200 jaar met 90% zekerheid binnen zullen blijven is weergegeven in Figuur 2.7. Deze zone is vastgesteld door middel van een deskundigenoordeel op basis van de beschikbare gegevens. Een statistische analyse van de gegevens biedt namelijk onvoldoende houvast. Enerzijds leidt extrapolatie van de actieve recente oevererosie bij Vlodrop tot een overschatting van de te verwachten meandermigratie. Anderzijds leidt een vergelijking van huidige met historische kaarten tot een onderschatting van de mogelijke meandermigratie, omdat veel oevers voor een onbekend deel van de tijd verdedigd waren.

Uitschuring van de rivierbodem kan het gevolg zijn van (a) grootschalige morfologische ontwikkelingen, (b) beddingvormen, (c) buitenbochtersie, en (d) hoogwatererosie. Het blijkt dat de buitenbochtersie een doorslaggevende rol speelt in de beoordeling van het risico dat de Roer binnen 100 of 200 jaar op het tunneldak stuit. De kans is groot dat de bocht net bovenstrooms van het tunneltracé zich binnen deze termijnen kan ontwikkelen tot een scherpe bocht met een boogstraal van 60 m. Dit zou grote buitenbochtersie veroorzaken en om die reden kan het raadzaam zijn om in te grijpen zodra de boogstraal kleiner wordt dan, bijvoorbeeld, 150 m. Om de invloed van een dergelijke strategie zichtbaar te maken zijn twee scenario's afzonderlijk uitgewerkt. In scenario A ontstaat een scherpe bocht met een boogstraal van 60 m. In scenario B blijft de bocht flauw met een boogstraal van 150 m.

De schaarse gegevens over de tijdsafhankelijke ontwikkeling van de waterstands-afvoerrelatie te Vlodrop suggereren dat daar reeds nu een bodemdaling optreedt met een snelheid van 17,5 mm/jaar (1,75 m/eeuw). Stuweffecten vanuit de Maas zwakken dit ter plaatse van de tunnel af tot een bodemdaling van 4,3 mm/jaar (0,43 m/eeuw). Omdat de gegevens te beperkt zijn voor harde conclusies, zijn ook hier twee scenario's afzonderlijk uitgewerkt. In scenario I wordt de bodemdaling op nul mm/jaar gesteld, in scenario II op 4,3 mm/jaar.

Tabel S.1 geeft een overzicht van de onderzochte scenario's. De resultaten zijn weergegeven in Tabellen S.2 en S.3. Geconcludeerd kan worden dat het tunneldak in ieder geval beduidend lager zal moeten liggen dan 14,5 m + NAP.

		Scenario boogstraal	
		A: 60 m	B: 150 m
Scenario bodemdaling grootschalige ontwikkeling	I: 0 mm/jaar	IA	IB
	II: 4,3 mm/jaar	IIA	IIB

Tabel S.1 Scenario's voor bodemerosie van de Roer.

Niveau van tunneldak (m + NAP)	Kans per scenario dat de Roer binnen 100 jaar op tunneldak stuit (%)				Kans per scenario dat de Roer binnen 200 jaar op tunneldak stuit (%)			
	IA	IB	IIA	IIB	IA	IB	IIA	IIB
16,0	91	82	94	86	92	82	95	89
15,5	84	69	88	75	85	70	91	80
15,0	73	55	78	61	75	56	83	68
14,5	61	40	66	46	63	42	73	55
14,0	47	27	53	32	51	29	61	41
13,5	34	16	40	21	38	19	49	28
13,0	23	10	28	12	27	12	36	18
12,5	15	5	18	7	18	6	26	11
12,0	9	3	11	3	11	3	17	6
11,5	5	1	7	2	7	2	11	3
11,0	3	0	4	1	4	1	6	2
10,5	1	0	2	0	2	0	4	1
10,0	1	0	1	0	1	0	2	0

Tabel S.2 Kansen dat de Roer binnen 100 of 200 jaar op het tunneldak stuit.

Niveau dat met een kans van 1% in 100 jaar door de Roer wordt aangesneden (m + NAP)				Niveau dat met een kans van 1% in 200 jaar door de Roer wordt aangesneden (m + NAP)			
IA	IB	IIA	IIB	IA	IB	IIA	IIB
10,3	11,4	10,1	11,2	10,0	11,2	9,5	10,7

Tabel S.3 Niveaus die met een kans van 1% door de Roer worden aangesneden.

Besluit men om in te grijpen zodra de boogstraal ter plaatse van de tunnel kleiner wordt dan, bijvoorbeeld, 150 m (scenario's B), dan wordt een oplossing aanbevolen waarbij op korte afstand uit de oever een grindkist wordt aangebracht, die enerzijds de natuurlijke oeverdynamiek tot op zekere hoogte toelaat en anderzijds een natuurlijk aanzien aan de oever geeft wanneer de verdediging wordt "aangesproken". In het laatste geval brengt de zich vormende grindoevers de verdere uitbocht tot staan, zodat ook de buitenbochterosie niet toeneemt.

Indien de vereiste diepteligging van de tunnel op economische gronden niet haalbaar blijkt, wordt een aansluitende verdediging aanbevolen die ervoor zorgt dat het blootkomen van de tunnel geen additionele erosie veroorzaakt.

I Inleiding

I.1 Aanleiding tot het onderzoek

Rijkswaterstaat werkt aan het project RW73-zuid. Deze snelweg doorkruist het Roerdal. Om de natuur en het landschap te sparen is gekozen om dit gedeelte van het traject, samen met het deel van de weg dat door Roermond loopt, ondergronds uit te voeren. Binnen Rijkswaterstaat is het projectbureau RW73-zuid bezig met de voorbereiding en planstudie van dit project.

Het Waterschap Roer en Overmaas is bezig met de hermeandering van de Roer. De oeververdediging is op dit traject weggehaald, zodat de Roer weer vrij kan meanderen (in tegenstelling tot de afgelopen 200 jaar). Het waterschap heeft een meanderzone aangewezen in het Roerdal. Hiermee wordt met de bouw van de tunnel in principe rekening gehouden.

Naast de ruimte die de Roer over de breedte van het Roerdal gebruikt, is er ook ruimte in de diepte nodig. Het waterschap schat dat de afstand tussen de tunnel en de Roer over de gehele meanderzone tenminste 1,5 meter moet bedragen om beïnvloeding van de meandering te voorkomen.

Het Waterschap Roer en Overmaas en het projectbureau RW73-zuid wensen nader onderzoek voordat besloten kan worden op welke diepte de tunnel minimaal moet worden aangelegd. Projectbureau RW73-zuid heeft de afdeling ANW gevraagd dit onderzoek uit te voeren of te begeleiden. De betrokkenheid van ANW heeft geleid tot eerste inschattingen voor de meandermigratie en bodemdiepte, met aanbevelingen voor nader onderzoek. Het projectbureau heeft daarop in overleg met het waterschap besloten om een vervolgonderzoek te laten uitvoeren om meer zekerheid over de eerste inschattingen te krijgen.

Het is tegen deze achtergrond dat de Directie Limburg van Rijkswaterstaat offerte heeft gevraagd voor geomorfologisch onderzoek naar de migratie van de Roer. De opdracht is verleend aan de combinatie WL | Delft Hydraulics - HASKONING, die het onderzoek in de periode april-augustus 2000 heeft uitgevoerd.

I.2 Doelstellingen

Het onderzoek heeft de volgende doelstellingen:

1. Bepaling van de migratiesnelheid en migratieontwikkeling van de meanderbochten in de Roer ter plaatse van de tunnel, inclusief de onzekerheidsmarge rond de verwachtingswaarden.

2. Bepaling van de diepte en snelheid van bodemerrosie die in de Roer kunnen optreden ter plaatse van de tunnel, inclusief de onzekerheidsmarge rond de verwachtingswaarden.
3. Bepaling van het risico dat de Roer binnen 200 jaar op het tunneldak stuit, voor verschillende diepteliggingen van de tunnel.
4. Bespreking van mogelijke mitigerende maatregelen.

1.3 Aanpak

De kern van het onderzoek bestaat uit beoordelingen en handberekeningen van meandermigratie en bodemerrosie. Voor de meandermigratie wordt gebruik gemaakt van historische kaarten, recente opnamen van oevererosie, luchtfoto's en aanvullende gegevens uit het veld (Hoofdstuk 2). Voor de bodemerrosie worden de bijdragen van beddingvormen, daling van het bodemlengteprofiel, buitenbochterosie en hoogwatererosie berekend (Hoofdstuk 3). Voor de vaststelling van de onzekerheidsmarges wordt gebruik gemaakt van probabilistisch instrumentarium in het pakket DecisionTools van Haskoning (Hoofdstuk 4).

Ter ondersteuning worden ook berekeningen met het rekenmodel SOBEK gebruikt. Dit is een eendimensionaal modellensysteem dat door WL | Delft Hydraulics in samenwerking met Rijkswaterstaat is ontwikkeld en dat modules bevat om de morfologische ontwikkeling van bodemlengteprofielen van rivieren te berekenen. De berekeningen met SOBEK hebben hier echter slechts het karakter van berekeningen *'op de achterkant van een sigarenkistje'*. Men beschouwe dit als een routinematig gebruik van standaardgereedschap, vergelijkbaar met het gebruik van spreadsheets. In het navolgende wordt gemotiveerd waarom de inzet van rekenmodellen in dit onderzoek beperkt is.

Voor een relatief kleine rivier als de Roer geldt dat de morfologische ontwikkeling sterk beïnvloed wordt door inhomogeniteiten in het rivierdal. Deze inhomogeniteiten betreffen de samenstelling van de ondergrond, maar bijvoorbeeld ook de bomen die op de oevers staan of, na te zijn omgevallen door oevererosie, in de rivier liggen. Nauwkeurige voorspellingen met een rekenmodel vergen daarom een hoge mate van detail. Dit stelt hoge eisen aan de invoergegevens voor ijking, validatie en voorspelling, en vereist bovendien een gedetailleerde modelschematisatie die de rekentijden verlengt. In feite is het daarbij niet realistisch om zeer nauwkeurige resultaten te verwachten. Rekenmodellen geven in deze omstandigheden veeleer globale indicaties van grootte-orden en gevoeligheden. Dat is op zich waardevolle informatie, maar er is dan weinig verschil tussen een gedetailleerde en een meer globale modelschematisatie.

In principe was het voor twee rekenmodellen van WL | Delft Hydraulics denkbaar dat ze bij het project zouden worden ingezet: MIANDRAS en SOBEK. MIANDRAS is een door WL | Delft Hydraulics ontwikkeld model voor meandermigratie. Het onderscheidt zich van andere meandermodellen in de wereld doordat de onderliggende vergelijkingen rekening houden met sedimenttransport. De ervaring is dat het model in de handen van riviermorfologen een goed hulpmiddel is om het gedrag van rivieren te analyseren, maar dat het model niet geschikt is voor nauwkeurige voorspellingen vanwege de erin toegepaste

vereenvoudigingen. Wegens de grote afhankelijkheid van inhomogeniteiten in het terrein geldt bovendien dat een goede weergave van stroming en sedimenttransport, waar de kracht van MIANDRAS ligt, voor lange-termijnvoorspellingen weinig betekenis heeft. Met een deskundigenoordeel op basis van gegevens uit de Roer bereikt men resultaten van een gelijkwaardige kwaliteit zonder uitgebreide modelleerinspanningen. Daarom wordt MIANDRAS hier niet gebruikt. SOBEK wordt wel gebruikt, maar alleen aan de hand van een grove schematisatie voor berekeningen *'op de achterkant van een sigarenkistje'*.

1.4 Organisatie

Het onderzoek is uitgevoerd door WL | Delft Hydraulics (WL) en HASKONING. De betrokken medewerkers van WL waren dr. ir. Erik Mosselman, ir. Henk Verheij en ir. Chris Stolker. Vanuit HASKONING waren ir. Jaap-Jeroen Flikweert en ir. Gert Jan Akkerman betrokken. Erik Mosselman was de projectleider.

De technisch-wetenschappelijke kwaliteit van het rapport is beoordeeld door prof. dr. ir. Huib de Vriend, die de leerstoel Rivierwaterbouwkunde aan de Technische Universiteit Delft bekleedt.

Vanuit de Directie Limburg van Rijkswaterstaat werd het onderzoek ondersteund door Dipl.-Ing Jens Reuber en drs. Alinda van Ankum. Jens Reuber was de projectbegeleider.

Ir. Frank Heijens van het Waterschap Roer en Overmaas leverde gegevens aan en begeleidde het tweede veldbezoek dat in het kader van het project werd uitgevoerd.

Het onderzoek is bij Rijkswaterstaat bekend onder nummer LB-6224 en bij WL | Delft Hydraulics onder nummer Q2702.

2 Meanderzone

2.1 Methode

In twee veldbezoeken zijn de optredende geomorfologische processen bestudeerd en is gesproken met ir. Frank Heijens van het Waterschap Roer en Overmaas en de lokale landeigenaar.

Uit kaarten van verschillende jaren zijn migratiesnelheden M van Roermeanders afgeleid. Tevens zijn uit die kaarten bochtstralen R en rivierbreedten B opgemeten met het doel om een zelfde soort relatie tussen M/B en R/B te vinden als in de studie van Nanson & Hickin (1983). Daarvoor is ook de werkwijze van Nanson & Hickin voor het opmeten van gegevens nagevolgd. De boogstraal is steeds het gemiddelde van twee boogstralen die volgens een voorgeschreven procedure worden bepaald. De straal van de binnenbocht geldt daarbij als de meest representatieve voor de migratie die in de voorafgaande periode heeft plaatsgevonden.

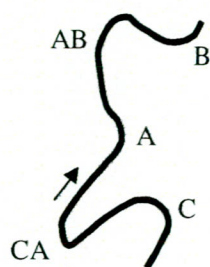
De kaartstudie maakt gebruik van twee soorten data:

1. Oeverlijnenkaart op schaal 1:5.000 van de recente ontwikkeling van Roermeanders tussen Vlodrop en Klein Paarlo in de periode 1984-2000. Hier zijn aan het begin van de periode oeververdedigingen verwijderd en treedt sindsdien zeer actieve oevererosie op.
2. Topografische kaartbladen op schaal 1:25.000 van de Roer tussen Klein Paarlo en de Maas in 1900 en in 1990.

Er waren ook kaarten uit 1850 beschikbaar, maar omdat de schaal daarvan te veel verschilde van de andere schalen is daarvan geen gebruik gemaakt.

Uit een steekproef voor enkele bochten bleek dat boogstralen opgemeten van de topografische kaartbladen op schaal 1:25.000 ongeveer 1,5 maal groter zijn dan boogstralen opgemeten van de oeverlijnenkaart op schaal 1:5.000. Dit is een gevolg van het vereenvoudigen en vergroten van terreinkenmerken wanneer men kaarten verkleint. Die vertekeningen zijn noodzakelijk bij kartografische generalisatie (Ormeling & Kraak, 1987). Alle boogstralen van topografische kaartbladen zijn om deze reden gecorrigeerd met een factor $2/3$.

De in dit onderzoek gehanteerde benamingen voor de bochten in de buurt van het tunneltracé zijn weergegeven in Figuur 2.1.



De bochten A, B en C stemmen overeen met de gelijklopende bochten in eerdere studies. Voor de tussenliggende bochten zijn de benamingen AB en CA toegevoegd. Het tunneltracé kruist de Roer juist benedenstrooms van bocht A. De peilschaal van Lerop bevindt zich in bocht CA.

Figuur 2.1 Benamingen van bochten in de buurt van het tunneltracé

2.2 Resultaten

2.2.1 Kwalitatieve beschouwingen

De eroderende oevers zijn bijna vertikaal. Erosie lijkt vooral het gevolg van afschuiven en afbreken van grondmoten.



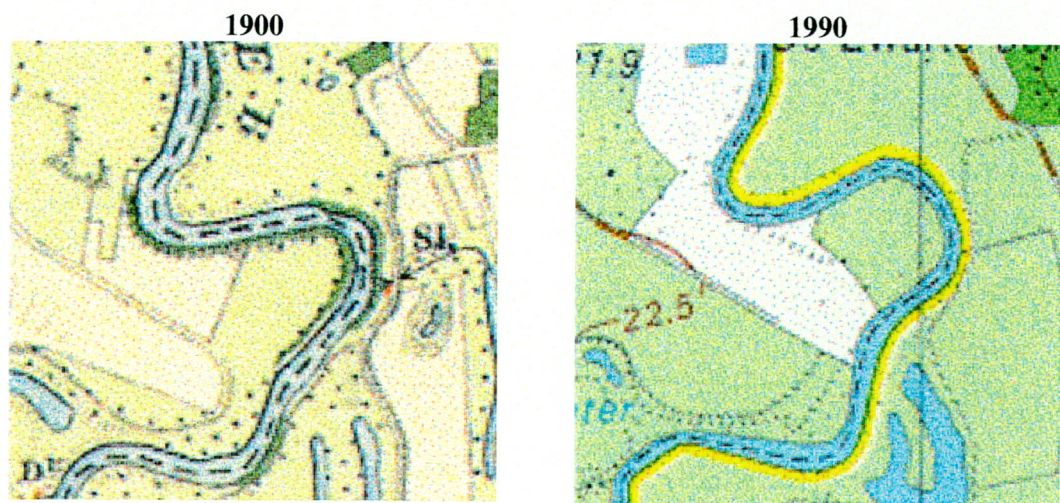
Figuur 2.2 Oevererosie langs de Roer bij Lerop.

In een tamelijk recht traject tussen de bochten C en CA zijn drie stukken rechteroever aan erosie onderhevig. Dit suggereert dat zich in de rechtstand nieuwe bochten kunnen ontwikkelen. De drie stukken oever zijn hoger dan de tussenliggende delen, omdat de oever hier de kronkelwaardruggen van bocht CA doorsnijdt. De erosie kan daarom niet samenhangen met stromingen die hier tijdens een hoogwater uit de hoofdgeul treden. Mogelijke verklaringen kunnen gevonden worden in een waggelende stroomdraad, een bankenpatroon op de bodem of verschillen in samenstelling van de oever. Vertrappen door

vee speelt een rol bij de erosie van het middelste stuk eroderende oever, dat door koeien als drinkplaats gebruikt wordt.

In het Roerdal zijn nog veel oude meanders als hoefijzervormige meertjes en verlande bochten zichtbaar. Dit duidt erop dat in de Roer bochtafsnijdingen voorkomen. Uit de vorm van de meertjes en de verlande meanderbochten valt af te leiden dat een bocht kan worden afgesneden als het bochttracé daardoor minstens 50% à 60% verkort wordt.

Een vergelijking van huidige met historische topografische kaartbladen laat zien dat de scherpte van een bocht in 100 jaar aanzienlijk kan veranderen. Figuur 2.3 geeft hiervan een voorbeeld. Figuur 2.4 laat zien dat zich uit een recht stuk rivier gemakkelijk een nieuwe bocht ontwikkelt. De consequentie van deze veranderlijke boogstralen is dat een relatie als die van Nanson & Hickin (1983) tussen meandermigratie en boogstraal eigenlijk niet zinvol is voor voorspellingen over een periode van 100 of 200 jaar.



Figuur 2.3 Verandering in boogstraal van Roermeander bij De Zwarte Berg (Melick).



Figuur 2.4 Vorming van een nieuwe bocht in de Roer bij 't Hemke (8 km benedenstrooms van Vlodrop).

2.2.2 Migratiesnelheid

De uit kaarten afgeleide gegevens zijn verzameld in de Tabellen 2.1 en 2.2. De lokale landeigenaar verstrekke voor bochten A en AB aanvullende gegevens die zijn opgenomen in Tabel 2.3. Zo kon hij aangeven dat bocht AB in de periode 1950-80 over een afstand van 3 m was teruggeschreden, omdat zijn vader rond 1950 nog met een kar kon passeren tussen de Roer en een boom die dertig jaar later pal op de oever stond. Daarna is bocht AB verdedigd om te voorkomen dat bij voortgaande uitbochting de stabiliteit van de spoordijk bedreigd zou worden.

Overigens verdient de nauwkeurigheid waarmee de gegevens uit kaarten op schaal 1:25.000 worden afgeleid een kanttekening. Voor afzonderlijke afstanden, zoals een breedte of een boogstraal, ligt deze in de orde van 5 à 10 m. Afstanden die verschillen tussen twee kaarten weergeven, zoals de migratie van een bocht, zijn met behulp van transparante overlays gemeten. De nauwkeurigheid daarvan ligt in de orde van 10 à 15 m. De relatieve fout in de metingen is derhalve groot.

Afstand brug Vlodrop (km)	B (m)	R (m)	R/B (-)	Migratie (m)	Tijd (jaar)	M (m/jaar)	M/B (-)	Opmerkingen (L = erosie linker- oever, R = erosie rechteroever)
-1,00	20	51,25	2,6	5	12	0,42	0,021	R
-0,75	22,5	40	1,8	2,5	12	0,21	0,009	L
-0,50	25	50	2,0	20	12	1,67	0,067	R
-0,25	25,5	35	1,4	7,5	4	1,88	0,074	R, oever- verdediging verwijderd in 1991, hoogte Effelder Waldsee
0,50	24,5	60	2,4	2,5	12	0,21	0,009	R, oever- verdediging verwijderd in 1991
1,75	25	32,5	1,3	15	12	1,25	0,050	L
2,00	22,5	60	2,7	10	4	2,50	0,111	R, oever- verdediging verwijderd in 1991
2,25	29	35	1,2	20	4	5,00	0,172	L, oever- verdediging verwijderd in 1991
2,50	29	47,5	1,6	30	12	2,50	0,086	R
2,75	30	88,75	3,0	50	12	4,17	0,139	L
3,00	25	50	2,0	5	12	0,42	0,017	R
3,50	25,5	100	3,9	2,5	1	2,50	0,098	L, oever- verdediging verwijderd in 1994
3,75	25	45	1,8	2,5	1	2,50	0,100	R, oever- verdediging verwijderd in 1994

Tabel 2.1 Geometrische gegevens en migratiesnelheden uit oeverlijnenkaart 1984-2000.

Afstand brug Vlodrop (km)	B (m)	R (m)	R/B (-)	Migratie (m)	Tijd (jaar)	M (m/jaar)	M/B (-)	Opmerkingen (L = erosie linker- oever, R = erosie rechteroever)
8,00	25	50,00	2,0	25	90	0,28	0,011	R
8,25	25	50,00	2,0	25	90	0,28	0,011	L
8,45	25	41,67	1,7	50	90	0,56	0,022	R
8,60	25	45,83	1,8	12,5	90	0,14	0,006	R
8,75	25	54,17	2,2	12,5	90	0,14	0,006	L
9,00	25	33,33	1,3	12,5	90	0,14	0,006	R
9,25	25	33,33	1,3	12,5	90	0,14	0,006	L
9,25	25	179,2	7,2	12,5	90	0,14	0,006	R, ter hoogte van Frymerum
9,75	25	66,67	2,7	37,5	90	0,42	0,017	R, net bovenstrooms van overgang Heinsberger weg
10,25	25	50,00	2,0	25	90	0,28	0,011	L, omslagpunt westelijk naar noordelijke richting
10,75	25	70,83	2,8	25	90	0,28	0,011	R, hoogte Lorberg
11,25	25	162,5	6,5	12,5	90	0,14	0,006	L
13,00	25	41,67	1,7	25	90	0,28	0,011	R
13,75	25	70,83	2,8	12,5	90	0,14	0,006	R
15,25	25	62,50	2,5	12,5	90	0,14	0,006	R, Lerop
17,25	25	112,5	4,5	12,5	90	0,14	0,006	R

Tabel 2.2 Geometrische gegevens en migratiesnelheden uit topografische kaartbladen van 1900 en 1990.

Afstand brug Vlodrop (km)	B (m)	R (m)	R/B (-)	Migratie (m)	Tijd (jaar)	M (m/jaar)	M/B (-)	Opmerkingen (L = erosie linker- oever, R = erosie rechteroever)
15,75	25	50,00	2,0	12,5	90	0,14	0,006	L, bocht CA
16,25	25	150,0	6,0	12,5	70	0,18	0,007	R, bocht A, migratie bekend vanaf 1920, nabij Jongenhof
16,75	25	83,33	3,3	3,0	30	0,42	0,017	L, bocht AB, periode 1950 - 1980, nabij Steenhuis

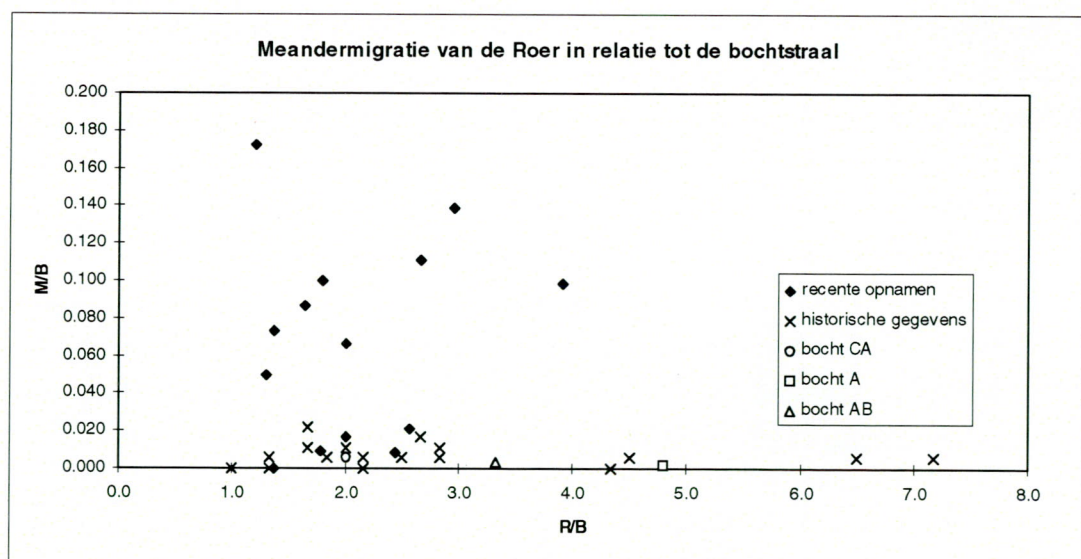
Tabel 2.3 Geometrische gegevens en migratiesnelheden uit luchtfoto's, gesprek met landeigenaar en eigen inschatting in het veld.

De gegevens uit de Tabellen 2.1 tot en met 2.3 zijn grafisch uitgezet in Figuur 2.5. Het blijkt dat de gegevens van de recente opnamen bij Vlodrop tot beduidend hogere migratiesnelheden leiden dan de historische gegevens van de topografische kaarten. Extrapolatie van de gegevens uit de recente opnamen zou tot de conclusie leiden dat meandermigratie de volledige door het waterschap aangegeven meanderzone kan beslaan. Men kan echter gevoegelijk aannemen dat een dergelijke extrapolatie tot overschattingen leidt, omdat zeer actieve erosie gewoonlijk slechts een beperkt aantal jaren op dezelfde plaats aanhoudt.

Dit ervaringsfeit kent in het algemeen de volgende verklaringen:

- Snelle oevererosie verbreedt de rivier wanneer de aangroei van de tegenoverliggende oever de erosie niet bij kan houden. Hierdoor nemen de stroomsnelheden en de oevererosie af. Een actief meanderende rivier is door dit mechanisme breder dan een vastgelegde rivierloop. Worden de oevers van een vastgelegde rivierloop verwijderd dan zal de oevererosie aanvankelijk heviger zijn totdat de rivier haar grotere breedte hervonden heeft.
- Een lokale overmatige toevoer van sediment, bijvoorbeeld afkomstig uit een geërodeerde oever, leidt tot ondieptes die lokaal de stroming versnellen of naar een oever afbuigen. Hierdoor wordt de oevererosie tijdelijk heviger totdat de overmaat aan sediment volledig is afgevoerd.
- Wanneer meanders door actieve oevererosie in korte tijd snel uitbochten, neemt het lokale rivierverhang af. Daardoor verminderen de stroomsnelheden en de oevererosie.
- Meanderbochten verplaatsen zich ook geleidelijk stroomafwaarts. Oevererosie verandert daardoor langs de rivier van plaats.
- Meanders die ver zijn uitgebocht, worden inactief wanneer ze door een kortere loop worden afgesneden. Langs deze meanders treedt dan geen oevererosie meer op.

Tegenover de overschattingen uit de gegevens bij Vlodrop staat dat de gegevens van de recente en historische topografische kaarten leiden tot een onderschatting van de mogelijke meandermigratie, omdat veel oevers voor een onbekend deel van de tijd verdedigd waren. De waarheid zal ergens in het midden liggen, maar deze kan niet eenduidig door een statistische analyse van de gegevens worden afgeleid. Daarom wordt de eindconclusie gebaseerd op een deskundigenoordeel. De grootste migratie die uit de topografische kaarten is afgeleid bedraagt ongeveer 37 m in 90 jaar. Deze migratie trad op bij Sint Odiliënberg op de locatie die is weergegeven in Figuur 2.6. Op basis van de gegevens en persoonlijke ervaring schatten Erik Mosselman en Henk Verheij dat de meandermigratie voor een periode van 100 jaar met 90% zekerheid binnen 50 m blijft, en voor een periode van 200 jaar met 90% zekerheid binnen 100 m.



Figuur 2.5 Relatie tussen migratie en boogstraal van meanders langs de Roer.

Voor de volledigheid kan nog vermeld worden dat de afdeling ANW van Rijkswaterstaat op basis van het werk van de Kramer (1997) als eerste inschatting migratiesnelheden vond van 0,3 tot 0,7 m/jaar. Die eerste schatting was in feite de aanleiding voor nader onderzoek.

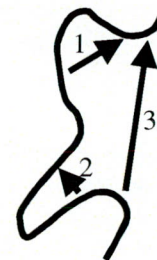


Figuur 2.6 Sterke oevererosie bij Sint Odiliënberg.

2.2.3 Mogelijke bochtafsnijdingen

In principe zou de Roer tijdens een hoogwater een nieuwe loop kunnen uitschuren via een van de routes die in Figuur 2.7 zijn aangegeven.

Een afsnijding van bocht AB via *Route 1* zou het afgesneden traject met 40% verkorten. Volgens Paragraaf 2.2.1 is dat te weinig om een natuurlijke afsnijding te verwachten. Bovendien is dit percentage ook nog aan het afnemen door de huidige trend voor bocht AB om bollier te worden als gevolg van oevererosie juist benedenstrooms van het traject langs de dijk ter bescherming van de spoorlijn.



Figuur 2.7 Denkbare bochtafsnijdingen.

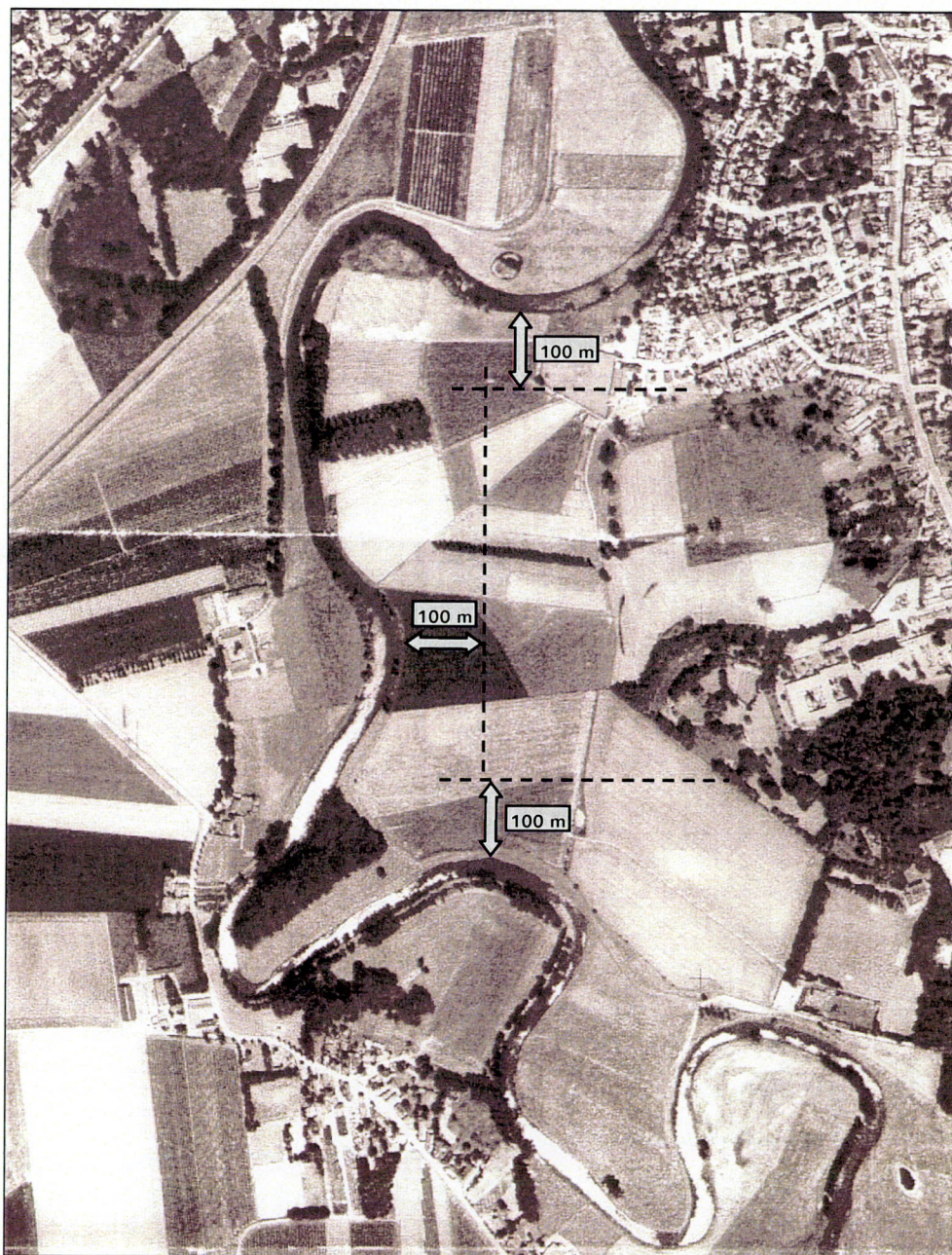
Een afsnijding via *Route 2* zou bocht CA met 70% verkorten. De kans op een bochtafsnijding is dan beduidend groter, hoewel de populieren op de kronkelwaard van bocht CA de vorming van een nieuwe loop hier tegengaan. De populieren zullen worden omgehakt zodra ze kaprijp zijn en het is niet bekend in hoeverre hier ook weer nieuwe bomen geplant zullen worden. Een afsnijding van bocht CA zou overigens leiden tot een tijdelijke versterking van de oevererosie langs bocht A.

Een afsnijding via *Route 3* zou de bochten CA, A en AB met 60% verkorten. Een dergelijke ontwikkeling wordt echter niet waarschijnlijk geacht. Tijdens een hoogwater loopt dit gebied weliswaar onder, maar de aanwezige kades stellen het moment van onderlopen uit en vertragen de stroming, zodat weinig uitschuring te verwachten valt. De kades kunnen wel

door oevererosie worden ondermijnd, maar het Waterschap Roer en Overmaas, dat de kades in beheer heeft, legt ze dan opnieuw aan op iets grotere afstand van de Roer.

2.2.4 Afbakening van de zone

De inschatting dat de migratie voor een periode van 200 jaar met 90% zekerheid binnen 100 m blijft, leidt tot de meanderzone die is aangegeven in Figuur 2.8. Bochtafsnijdingen via Routes 1 en 2 zouden binnen deze zone blijven. Een bochtafsnijding via Route 3 valt buiten de meanderzone maar wordt niet waarschijnlijk geacht.



Figuur 2.8 Meanderzone langs de recheroever van de Roer.

2.3 Discussie

2.3.1 Tijdschaal en doorkijk naar 400 jaar

De periodes van 100 en 200 jaar zijn lang in vergelijking met de tijdschaal van relevante processen. Dat vermindert de betrouwbaarheid van de voorspellingen. Zo wordt het meandergedrag van een kleine rivier als de Roer sterk beïnvloed door bomen op de oevers. De tijdschaal waarop bomen groeien en gekapt worden, en waarop nieuwe bomen ontstaan, ligt in de orde van decennia en is derhalve beduidend kleiner dan de periode waarop dit onderzoek zich richt. Op dit moment valt niet te voorzien waar in het Roerdal over 100 jaar bomen staan.

Voor een doorkijk naar 400 jaar geldt deze overweging des te sterker. Op een dergelijk lange termijn hebben ook extreme gebeurtenissen een hoge kans van voorkomen. Zo kunnen in de omgeving van Roermond aardbevingen optreden. Alkema et al (1994) hebben waargenomen dat de aardbeving van 1992 aardverschuivingen veroorzaakte op de Brunssumerheide, 30 km ten zuiden van Roermond. Door aardbevingen veroorzaakte oevervallen zouden over lange trajecten de breedte, het sedimenttransport en de migratie van de Roer kunnen beïnvloeden.

Ook maatschappelijke ontwikkelingen zijn moeilijk een paar eeuwen vooruit te voorspellen. De druk die nu reeds bestaat om bij Roermond woningen in het rivierbed van de Maas te bouwen, maakt het aannemelijk dat verdere verstedelijkingsdruk uiteindelijk ook zal leiden tot bouwactiviteiten in het Roerdal rond het tunneltracé.

Gezien alle onzekerheden, kan men in een doorkijk naar 400 jaar alleen de gehele meanderzone aanhouden die door het waterschap in de desbetreffende Legger is opgenomen.

2.3.2 Monitoring

Bij een ongunstige ontwikkeling van de rivierplattengrond zou men kunnen ingrijpen met mitigerende maatregelen. Daarvoor is dan een monitoringsprogramma noodzakelijk. De monitoring kan deels plaatsvinden door regelmatig de veldsituatie ter plaatse te beoordelen. Daarbij kan ook de ligging van de bedding boven het tunneldak gemeten worden. Voor de voorspellingen over kortere termijnen die in het kader van monitoring gewenst zullen zijn zou eventueel gebruik gemaakt kunnen worden van een meandermodel als MIANDRAS (Crosato, 1989, 1990). Bedacht dient echter te worden dat het meandergedrag van de Roer sterk afhangt van inhomogeniteiten in het terrein. Een goede weergave van stroming en sedimenttransport, waar de kracht van MIANDRAS ligt, geeft dan eigenlijk maar een beperkte garantie voor nauwkeurige voorspellingen.

Een model als MIANDRAS geeft wel inzicht in de plaats in een bocht waar de grootste oevererosie optreedt als de oevereigenschappen verder homogeen zijn. Deze plaats hangt af van rivierkundige parameters. De Kramer (1997) hanteert hiervoor een empirische regel afgeleid uit de Grensmaas, maar deze plaats is niet voor iedere rivier dezelfde.

3 Snelheid en diepte van bodemerosie

3.1 Methode

3.1.1 Algemeen

De waterstand en de afvoer met een herhalingsjijd van 200 jaar worden afgeleid uit beschikbare hydrologische gegevens. Aanwijzingen voor erosie en sedimentatie worden afgeleid uit de tijdsafhankelijke ontwikkeling van de waterstandsafvoerrelatie ("Q-h-relatie") te Vlodrop.

Uitschuring van de bodem van de Roer kan het gevolg zijn van (a) grootschalige morfologische ontwikkelingen, (b) beddingvormen, (c) buitenbochtersie, en (d) hoogwatererosie. De uitschuring door grootschalige morfologische ontwikkelingen en hoogwatererosie wordt berekend met een SOBEK-model van de Roer. De uitschuring door beddingvormen en de buitenbochtersie worden berekend met eenvoudige formules.

3.1.2 SOBEK-model voor grootschalige ontwikkeling en hoogwatererosie

SOBEK is een eendimensionaal modellensysteem met modules om de morfologische ontwikkeling van bodemlengteprofielen van rivieren te berekenen. Hiermee is een eenvoudig model van de Roer gemaakt. Fijnregeling en een hoge mate van detail zijn niet nagestreefd, zodat berekeningen met dit model het karakter hebben van *'berekeningen op de achterkant van een sigarenkistje'*. De berekeningen richten zich op de grootschalige morfologische ontwikkeling en de hoogwatererosie.

Het SOBEK-model van de Roer is door middel van een conversieprogramma afgeleid van een uit de jaren tachtig stammend WENDY-model, ter beschikking gesteld door het Waterschap Roer en Overmaas. Alle dwarsprofielen alsmede de bodemruwheidsformulering (Chézy-coëfficiënt $C = 30 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$) zijn uit het WENDY-model overgenomen. Hierbij moet de kanttekening gemaakt worden dat een schematisatie die geschikt is voor hydrodynamische berekeningen niet automatisch ook geschikt is voor morfologische berekeningen. Riviersplitsingen zijn in eendimensionale modellen notoire bronnen van problemen. Om die reden zijn de Hambeek en de Stedelijke Roer uit het model verwijderd, evenals de stuwen waarmee de waterverdeling over deze twee riviertakken geregeld kan worden. Deze ingreep beïnvloedt weliswaar de getallen die uit SOBEK komen, maar niet de resultaten van het onderzoek. De benedenrand is gelegd op de plaats waar de Roer zich splitst in de Hambeek en de Stedelijke Roer.

De toegepaste tijdstap bedraagt 1 uur. De stapgrootten liggen in het model rond de 400 m.

De afvoerhydrograaf is geschematiseerd als een reeks die bestaat uit de daggemiddelde afvoeren bij Vlodrop in de jaren 1988, 1993, 1994 en 1995. Deze reeks bevat prominente

hoogwaters. Om de rekentijden te bekorten zijn lage afvoeren waarbij weinig sediment getransporteerd wordt uit de hydrograaf verwijderd.

De sedimenttransporten zijn berekend met de transportformule van Meyer-Peter & Müller (1948), met ijkfactor $TRF = 1$. Voor de korrelverdeling van het sediment is aangehouden dat $D_m = 0,3$ mm en $D_{90} = 0,6$ mm. Deze waarden zijn afgeleid uit boorprofielen van Tukkers (1999). Er waren geen gedetailleerde zeefanalyses van sedimentmonsters beschikbaar.

Aan de benedenstroomse rand is een waterstandsafvoerrelatie ('Q-h relatie') opgegeven die gekalibreerd is op de waterstand bij een bedvullende afvoer van $60 \text{ m}^3/\text{s}$. Deze waterstand is zodanig gekozen dat de bodem van de Roer bij permanente bedvullende afvoer dezelfde ligging behoudt. De kalibratie wordt derhalve niet gebaseerd op een gemeten waterstand maar op het morfologische gedrag.

Aan de bovenstroomse rand is de bodemontwikkeling opgegeven die op indirecte wijze is afgeleid uit tijdsafhankelijke veranderingen in de waterstandsafvoerrelatie ("Q-h-relatie").

Ter controle zijn de met SOBEK berekende waterstanden op meetpunt Lerop (bocht CA) vergeleken met de waterstanden die IWACO (1999) hiervoor geeft op basis van berekeningen met een eendimensionaal rekenmodel, uitgaande van een gemeten waterstand bij een afvoer van $103 \text{ m}^3/\text{s}$. Deze controle is weergegeven in Tabel 3.1. De waarden zijn niet in strijd met elkaar, al suggereren de IWACO-gegevens een sterkere toename van de waterstanden bij hogere afvoeren dan het SOBEK-model.

Afvoer (m^3/s)	Waterstand (m + NAP)	
	IWACO (1999)	SOBEK-model
100	-	21,2
103 (= hoogste afvoer 1995)	21,25	21,2
140	21,1 à 22,1	21,5
180	21,6 à 22,6	21,8

Tabel 3.1 Controle van waterstanden bij Lerop.

Tabel 3.2 geeft een overzicht van de morfologische berekeningen die met het SOBEK-model van de Roer zijn uitgevoerd. De resultaten hiervan volgen in Paragraaf 3.2.2. Uit praktische overwegingen is voor het effect van de Maaswerken in berekening 2 slechts een enkele constante waterstandsverlaging genomen, zonder afvoerafhankelijke variaties. De waarde van 0,2 m is daarbij gekozen op basis van de volgende overwegingen:

- Het zomerbed van de Maas wordt nabij de monding van de Roer 0,7 m verlaagd. Deze verlaging beïnvloedt de waterstanden tijdens hoogwaters als de stuwen getrokken zijn. Omdat een deel van het water dan over het winterbed stroomt, is de resulterende waterstandsverlaging dan minder dan de zomerbedverlaging.
- Bij lagere afvoeren worden de waterstanden juist hoger wegens de peilopzet bij de stuwen.

Omdat in Paragraaf 3.2 blijkt dat de invloed van waterstandsveranderingen door de Maaswerken op de bodemerosie in de Roer gering zijn in vergelijking tot de invloed van buitenbochterosie, is een verfijning ten opzichte van de constante waarde van 0,2 m achterwege gelaten.

Nr	Naam	Omschrijving
1	Referentieberekening	-
2	Maaswerken	na uitvoering van de Maaswerken, waarbij de benedenstroomse waterstand 0,2 m zal zakken
3	Verhoogde hoogwatergolf	vijf dagen uit afvoerhydrograaf vervangen door hypothetische afvoergolf met piek van 350 m ³ /s
4	Verhoogde hoogwaterpiek	hoogste afvoer van 120 m ³ /s in afvoerhydrograaf verhoogd naar 350 m ³ /s
5	Gladdere bedding	Chézy-coëfficiënt 20% hoger
6	Ruwere bedding	Chézy-coëfficiënt 20% lager
7	Fijner sediment	D _m = 0,2 mm, D ₉₀ = 0,4 mm
8	Grover sediment	D _m = 0,4 mm, D ₉₀ = 0,8 mm
9	Detail van gemeten hoogwatergolf	gedetailleerde uitvoer voor 2,5 dag uit de afvoerhydrograaf waarin de grootste afvoer van 112 m ³ /s uit de meetreeks voorkomt

Tabel 3.2 Morfologische berekeningen met SOBEK.

Tijdens de stijging van een hoogwater erodeert de rivierbedding omdat het bijbehorende grotere waterspiegelverhang een gradiënt in de sedimenttransportcapaciteit creëert. Tegelijkertijd treden lokaal ook aanzandingen in de hoofdgeul op op plaatsen waar water de uiterwaarden in stroomt. Deze aanzandingen veroorzaken ondiepten die tijdens en na de val van het hoogwater door erosie weer worden opgeruimd. De grootte van de hoogwatererosie wordt afgeleid uit de berekeningen 3 (grootste afvoer 350 m³/s) en 9 (grootste afvoer 112 m³/s). De resultaten hiervan volgen in Paragraaf 3.2.5.

3.1.3 Formules voor beddingvormen en buitenbochtersie

Beddingvormen laten zich kenmerken door duinlengte, duinhoogte en de steilheid van het duinfront aan de lijzijde. Hier is alleen de duinhoogte relevant. Bekende duinhoogtevoorspellers zijn de formules van Yalin (1964), Gill (1971) en Van Rijn (1984). De formule van Van Rijn is in principe het meest geschikt, want deze formule is theoretisch onderbouwd, het meest recent en gebaseerd op zeer veel data. De voorspeller is een functie van de verhouding tussen de mediane korrelgrootte D₅₀ en de waterdiepte h, alsmede van de transportparameter T, die op zijn beurt afhangt van een verhouding van schuifspanningen.

Julien en Klaassen (1995) hebben de formule van Van Rijn kritisch gezien, getoetst aan nieuwe data en een vereenvoudigde relatie afgeleid die niet langer afhankelijk is van de parameter T. De duinhoogte Δ_d wordt daarbij gegeven door

$$\frac{\Delta_d}{h_{\max}} = \xi \left(\frac{D_{50}}{h_{\max}} \right)^{0,3} \quad (3.1)$$

Hierin is h_{max} de grootste diepte van een dwarsprofiel. Voor de parameter ξ geldt, bij een normale verdeling, een gemiddelde μ(ξ) van 2,5 waarbij 90% van alle waarnemingen valt in het interval 0,8 tot 8,0 (Julien & Klaassen, 1995). Hieruit is een standaardafwijking σ(ξ) af

te leiden van 2,2. De waarde van ξ mag echter niet kleiner worden dan 0 en daarom wordt een lognormale verdeling aangehouden. De parameters hiervan zijn:

$$\begin{aligned}\mu(\xi) &= 0,92 \\ \sigma(\xi) &= 0,65\end{aligned}$$

De uit de data gebleken onafhankelijkheid van T betekent dat een vergelijkbare term ook zou moeten wegvallen uit de voorspellers volgens Yalin en Gill. De voorspeller volgens Yalin gaat dan over in een constante verhouding tussen duinhoogte en waterdiepte: $\Delta_d/h = 0,16$. Julien en Klaassen hebben ook aangetoond dat er geen Froude-afhankelijkheid is, zoals Gill veronderstelde. Ook de voorspeller van Gill gaat dan over in een constante verhouding tussen duinhoogte en waterdiepte.

Op basis van deze overwegingen is Formule 3.1 gekozen als de meest geschikte duinhoogte-voorspeller. De bijbehorende erosie Δz_d ten opzichte van de bodemligging bij maximale waterdiepte is gelijk aan de halve duinhoogte:

$$\Delta z_d = 0,5 \xi \left(\frac{D_{50}}{h_{\max}} \right)^{0,3} h_{\max} \quad (3.2)$$

De statistische eigenschappen van de parameters in de formule worden uit gegevens van de Roer afgeleid. De resultaten hiervan volgen in Paragraaf 3.2.3.

Voor *buitenbochtersie* zijn de formules van Thorne (1988) en Maynard (1996) in beschouwing genomen. De formule van Thorne luidt

$$\frac{h_b}{h_{\text{gem}}} = 2,07 - 0,19 \log \left(\frac{R}{B} - 2 \right) \quad (3.3)$$

Hierin is h_b de grootste waterdiepte in de buitenbocht, h_{gem} de breedtegemiddelde waterdiepte in een raai bovenstrooms van de desbetreffende bocht, R de boogstraal van de bocht en B de waterbreedte. De formule is geldig voor zowel onverdedigde als verdedigde bochten. Thorne publiceerde ook nog een formule die uitsluitend voor verdedigde bochten geldt, maar in een latere publicatie (Thorne et al, 1995) stelt hij dat deze formule geen betere voorspellingen geeft.

De formule van Maynard (1996) luidt

$$\frac{h_b}{h_{\text{gem}}} = 1,8 - 0,051 \frac{R}{B} + 0,0084 \frac{B}{h_{\text{gem}}} \quad (3.4)$$

Het voordeel van deze formule ten opzichte van die van Thorne is dat rekening wordt gehouden met het reducerende effect van de kleinere breedte-diepte-verhouding B/h_{gem} in kleinere rivieren als de Roer. Ook Maynard noemt deze term vooral bij kleine rivieren van belang. Overigens geeft Maynard een goed overzicht van bestaande formules, waaronder die

van Watanabe et al (1990). Het nadeel van deze laatste formule is echter dat niet is gedefinieerd ten opzichte van welke waterdiepte de bochterosie is vergeleken. De nauwkeurigheid van de formule van Watanabe lijkt desondanks hoog en de formule bevat ook de breedte-diepteverhouding B/h_{gem} .

Op grond van het rekening houden met de breedte-diepteverhouding B/h_{gem} wordt de formule van Maynard gekozen, maar wel inclusief veiligheidsfactor s_f :

$$\frac{h_b}{h_{\text{gem}}} = s_f \left(1,8 - 0,051 \frac{R}{B} + 0,0084 \frac{B}{h_{\text{gem}}} \right) \quad (3.5)$$

Maynard beveelt een veiligheidsfactor aan die gerelateerd is aan een betrouwbaarheidsinterval. Zijn Tabel 4 laat zien dat bij een veiligheidsfactor 1,2 slechts 2% van de gemeten waarden groter zal zijn dan de berekende waarden. Bij een factor 1,0 zijn 25% van de gemeten waarden groter dan de berekende, hetgeen inhoudt dat de verwachtingswaarde gevonden wordt bij een veiligheidsfactor die kleiner is dan 1,0. Uit de gegevens is voor s_f af te leiden:

$$\begin{aligned} \mu(s_f) &= 0,9 \\ \sigma(s_f) &= 0,15 \end{aligned}$$

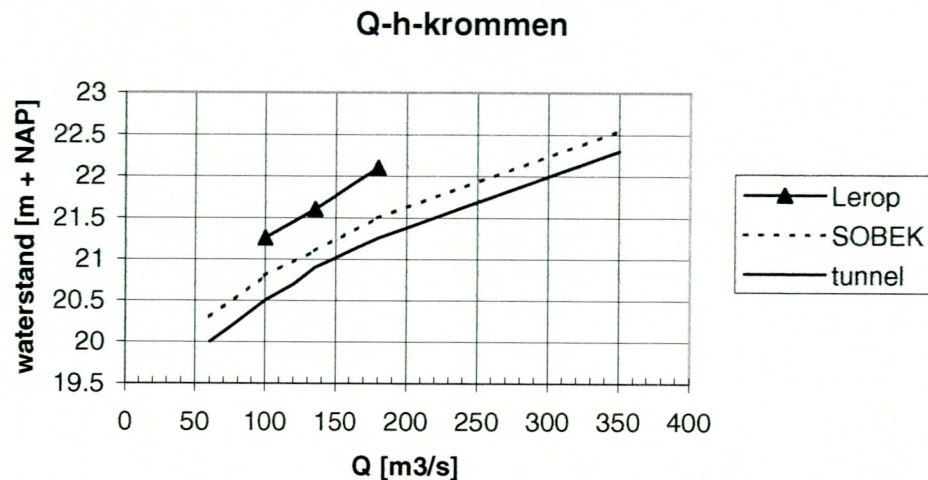
De statistische eigenschappen van de overige parameters in de formule worden afgeleid uit gegevens van de Roer. De resultaten hiervan volgen in Paragraaf 3.2.4.

3.2 Resultaten

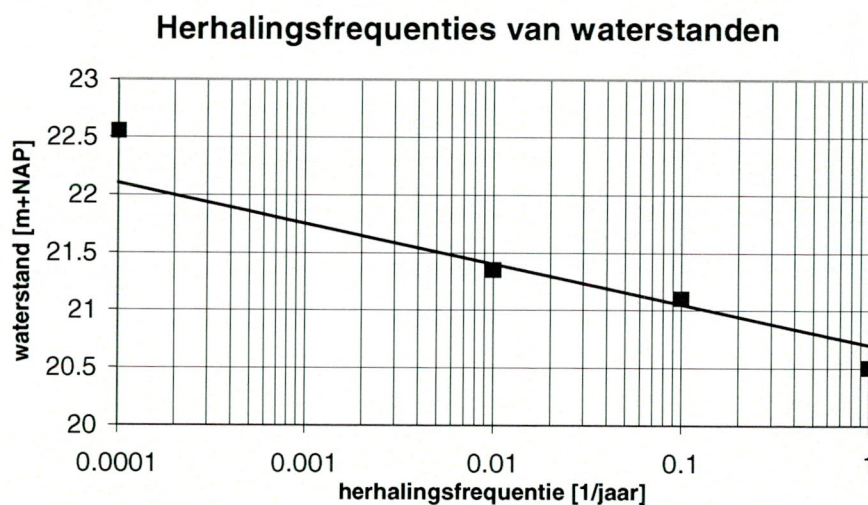
3.2.1 Waterstand en afvoer met een herhalingsstijd van 200 jaar

De waterstandsafvoerrelatie te Lerop is afgeleid uit de beschikbare waarden voor Q_{100} , Q_{10} en Q_1 met bijbehorende waterstanden. Tabel 3.1 laat zien dat de SOBEK-berekeningen ter plaatse van Lerop vergelijkbare resultaten geven. Vervolgens zijn bij verschillende afvoeren de waterstanden bij het tunneltracé met SOBEK berekend. Het blijkt dat deze ongeveer 0,5 m lager liggen dan de met SOBEK berekende waterstanden te Lerop. Gegeven is verder dat de waterstand ter plaatse van het tunneltracé bij een bedvullende afvoer van $60 \text{ m}^3/\text{s}$ ligt op 20,00 m + NAP. Uitgaande van deze waterstand is evenwijdig aan de SOBEK-kromme een “werkelijke” Q-h-kromme bepaald. Deze werkwijze is weergegeven in Figuur 3.1.

Vervolgens wordt in Figuur 3.2 op extreme-waardenpapier de waterstand met een herhalingsstijd van 200 jaar afgelezen, aannemende dat een afvoer van $350 \text{ m}^3/\text{s}$ een herhalingsstijd van 10 000 jaar heeft en aannemende dat het verband tussen waterstand en herhalingsfrequentie hier een rechte lijn is die het beste strookt met de bij Q_{10000} , Q_{100} , Q_{10} en Q_1 behorende punten. Uit de Q-h-relatie volgt dat de bijbehorende afvoer met een herhalingsstijd van 200 jaar dan $210 \text{ m}^3/\text{s}$ bedraagt.



Figuur 3.1 Bepaling van Q-h-kromme ter plaatse van tunneltracé ("tunnel"), uit Q-h-kromme te Lerop ("Lerop"), SOBEK-resultaten voor de locatie van het tunneltracé ("SOBEK") en de waterstand bij bedvullende afvoer (20,0 m + NAP bij 60 m³/s).

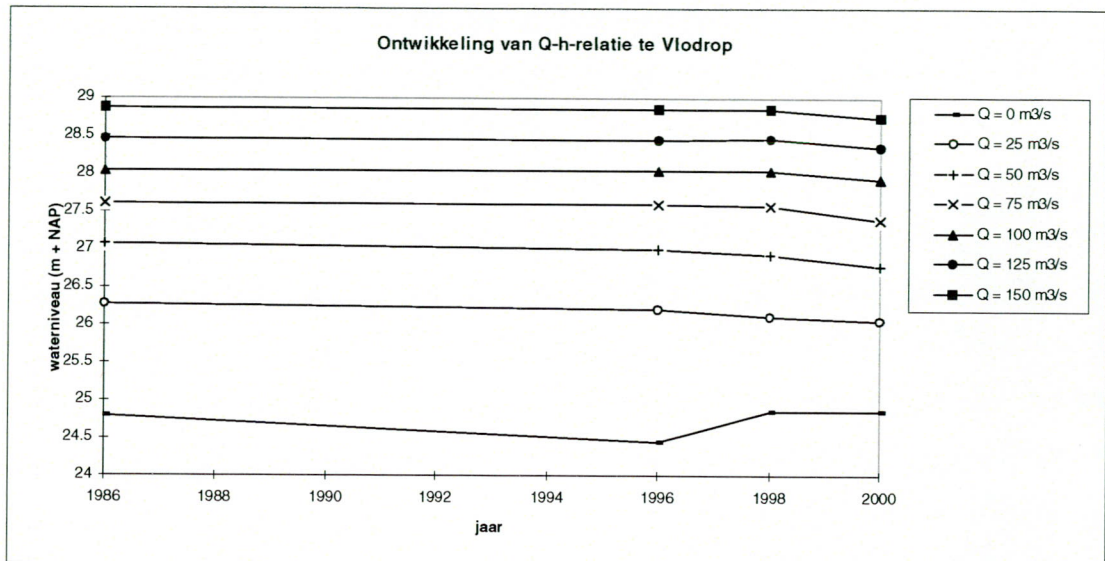


Figuur 3.2 Statistiek van extreme waterstanden ter plaatse van de tunnel.

3.2.2 Grootschalige morfologische ontwikkeling

De tijdsafhankelijke ontwikkeling van de waterstandsafvoerrelatie ("Q-h-relatie") bij het meetstation De Drie Bogen te Vlodrop is weergegeven in Figuur 3.3. De afvoer van 50 m³/s ligt nog juist beneden de bedvullende afvoer en geeft daarom het beste inzicht in de ontwikkeling van het laagwaterbed van de Roer. Voor deze afvoer wordt een dalende trend gevonden met een snelheid van 17,5 mm/jaar (1,75 m/eeuw). De lijn voor 0 m³/s zegt mogelijk iets over de ligging van de thalweg binnen het laagwaterbed, maar heeft verder geen praktische betekenis. De dalende trend bij 50 m³/s zou in principe ook door een verbreding van de bedding veroorzaakt kunnen worden, maar de situatie ter plaatse van de peilschaal te Vlodrop wijst er niet op dat een dergelijke verbreding is opgetreden.

Een berekening met SOBEK wijst uit dat de dalende trend van 17,5 mm/jaar bij Vlodrop door stuweffecten wordt afgezwakt tot een bodemdaling van 4,3 mm/jaar (0,43 m/eeuw) ter plaatse van het tunneltracé. De gegevens in Figuur 3.3 zijn echter te beperkt voor harde conclusies. Daarom worden in het vervolg twee scenario's afzonderlijk uitgewerkt. In scenario I wordt de bodemdaling die samenhangt met de grootschalige morfologische ontwikkeling op nul mm/jaar gesteld, in scenario II op 4,3 mm/jaar.



Figuur 3.3 Tijdsafhankelijke ontwikkeling van waterstandsafvoerrelatie te Vlodrop.

Nr	Naam	Simulatie-duur (jaar)	Grootste verandering in bodemligging gedurende simulatieduur (m)	
			t.o.v. bodemligging bij aanvang	t.o.v. grootste verandering in referentieberekening
1	Referentieberekening	200	-0,31	0,00
2	Maaswerken	200	-0,43	-0,12
3	Verhoogde hoogwatergolf	200	-0,57	-0,26
4	Verhoogde hoogwaterpiek	200	-0,35	-0,04
5	Gladdere bedding	200	+0,05	+0,36
6	Ruwere bedding	200	-0,69	-0,38
7	Fijner sediment	200	-0,31	0,00
8	Grover sediment	200	-0,33	-0,02
9	Detail van gemeten hoogwatergolf	0,007	-0,17	-

Tabel 3.3 Resultaten van berekeningen met SOBEK.

Tabel 3.3 geeft de resultaten van de berekeningen met SOBEK. Deze wijzen uit dat de bodemerosie na 200 jaar kan variëren tussen 0 en 0,60 m. De grootste invloed heeft de onzekerheid in de waarde van de Chézy-coëfficiënt voor hydraulische ruwheid. Aannemende dat de variaties normaal verdeeld zijn en dat 90% van de bodemerosie binnen het genoemde bereik valt¹, kan de standaardafwijking worden gesteld op 0,10 m.

¹ De keuze voor een 90% of een 95% betrouwbaarheidsinterval hangt samen met een subjectieve schatting van de spreiding op basis van een deskundigenoordeel.

3.2.3 Beddingvormen

Ijking van Formule 3.1 aan veldgegevens blijkt niet mogelijk door het ontbreken van gegevens uit de Roer. Verondersteld wordt daarom dat de formule zonder verdere aanpassing op de Roer toepasbaar is. Wel zijn de statistische eigenschappen van de parameters h_{\max} en D_{50} in Formule 3.1 uit veldgegevens afgeleid. De statistische eigenschappen van ξ zijn reeds in Paragraaf 3.1.3 aangegeven.

De gemiddelde waterdiepte in rechtstanden van de Roer varieert bij een bedvullende afvoer van $60 \text{ m}^3/\text{s}$ tussen 2,2 m en 2,4 m. Bij een afvoer van $210 \text{ m}^3/\text{s}$ (herhalingstijd 200 jaar) bedraagt de gemiddelde waterstand 21,50 m + NAP bij een breedte-gemiddelde bodemligging van 17,70 m + NAP. Dit leidt tot een gemiddelde waterdiepte van 3,8 m met een veronderstelde marge van 0,10 m. Onder de aanname van een 95% betrouwbaarheidsinterval en een normale verdeling resulteert dit in een standaardafwijking van 0,1 m. De volledige verdeling wordt dan:

$$\mu(h_{\text{gem}}) = 3,8 \text{ m}$$

$$\sigma(h_{\text{gem}}) = 0,1 \text{ m}$$

Het diepste punt in het huidige dwarsprofiel ligt op 16,50 m + NAP. De maximale waterdiepte is dus 5,0 m. Voor de relatie tussen gemiddelde en maximale waterdiepte betekent dit

$$h_{\max} = \beta h_{\text{gem}} \quad (3.6)$$

met $\beta = 1,3$ voor een frequentie van $0,5 \cdot 10^{-2}$ per jaar. Voor de parameter β wordt een normale verdeling aangehouden met

$$\mu(\beta) = 1,3$$

$$\sigma(\beta) = 0,06$$

De karakteristieke korreldiameter is afgeleid uit boringen in de rivieras uitgevoerd door Tukkers Milieu-onderzoek (Tukkers, 1999). Uit de boringen 606 (in het tunneltracé) en 609 (juist bovenstrooms van het tracé) is af te leiden dat de mediane korrelgrootte D_{50} ligt tussen 0,21 mm en 0,42 mm. Voor de verdere berekeningen is uitgegaan van een gemiddelde van 0,3 mm met als uitersten 0,2 mm en 0,4 mm. Voor een 95% betrouwbaarheidsinterval betekent dit

$$\mu(D_{50}) = 0,3 \text{ mm}$$

$$\sigma(D_{50}) = 0,05 \text{ mm}$$

Het gaat hier om een ruimtelijke verdeling van korrelgrootten.

De bodemdaling in de troggen tussen de beddingvormen kan nu worden berekend door substitutie van $h_{\text{gem}} = 2,3 \text{ m}$ ($Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$) en $h_{\text{gem}} = 3,8 \text{ m}$ ($Q = 210 \text{ m}^3/\text{s}$), $D_{50} = 0,3 \text{ mm}$ en $\xi = 2,5$ (volgens normale verdeling) in Formules 3.2 en 3.6. Dit geeft $\Delta z_d = 0,23$ à $0,34 \text{ m}$.

In het kader van dit onderzoek zijn ook de door Moll et al (1987) uitgevoerde statistische analyses van beddingvormen bestudeerd. Deze analyses richten zich vooral op de lengte en vorm van beddingvormen in samenhang met de daardoor geleverde stromingsweerstand. Voor de huidige studie werden de bevindingen daarvan verder niet relevant geacht.

3.2.4 Buitenbochtersie

Aan de hand van door de opdrachtgever ter beschikking gestelde tekeningen (Waterschap Roer en Overmaas, 1982) is nagegaan in hoeverre de bochtdiepte volgens Formule 3.5 overeenstemt met diepten in bochten van de Roer. Hiertoe is de formule getoetst aan bocht CA bij Lerop, bovenstrooms van het tunneltracé. Deze bocht heeft een boogstraal R gelijk aan 50 m en een breedte B van 25 m, dus $R/B = 2$. Verder geldt voor de gemiddelde waterdiepte bij bedvallende afvoer een waarde van 2,3 m. Substitutie in Formule 3.5 met $s_f = 0,9$ levert een dimensieloze bochtdiepte op van $h_b/h_{gem} = 1,6$. Uit de dwarsprofielen DP84 en DP85 volgt $h_b/h_{gem} = 1,5$ à $2,5$, zodat de gemiddelde bochtdiepte gesteld kan worden op $h_b/h_{gem} = 2,0$.

Door toevoeging van een ijkfactor α_b kan Formule 3.5 gekalibreerd worden:

$$\frac{h_b}{h_{gem}} = \alpha_b s_f \left(1,8 - 0,051 \frac{R}{B} + 0,0084 \frac{B}{h_{gem}} \right) \quad (3.7)$$

De grootte van de ijkfactor α_b is gelijk aan

$$\begin{aligned} \mu(\alpha_b) &= 1,25 \\ \sigma(\alpha_b) &= 0,15 \end{aligned}$$

Ter validatie is voor het dwarsprofiel DP87 ter plaatse van het tunneltracé een toetsing uitgevoerd. De bochtstraal is gelijk verondersteld aan die van de juist bovenstrooms gelegen bocht A, dus $R = 150$ m. Formule 3.7 geeft $h_b/h_{gem} = 1,8$. Omdat het dwarsprofiel zich in de benedenstroomse uitloop van de bocht bevindt, valt te verwachten dat R feitelijk groter is en h_b/h_{gem} derhalve lager. Uit het gemeten dwarsprofiel volgt $h_b/h_{gem} = 1,5$ (Tukkers, 1999), zodat men mag concluderen dat de gekalibreerde formule waarden voorspelt die redelijk overeenkomen met gemeten waarden. Daarmee is de gekalibreerde formule tevens voor een locatie getoetst.

De bijbehorende bodemdaling volgt uit de formule

$$\Delta z_b = h_b - h_{\max} = \alpha_b s_f \left(1,8 - 0,051 \frac{R}{B} + 0,0084 \frac{B}{h_{\text{gem}}} \right) h_{\text{gem}} - \beta h_{\text{gem}} \quad (3.8)$$

waarmee overigens verdisconteerd wordt dat ook het verschil tussen h_{gem} en h_{\max} door bochteffecten veroorzaakt kan zijn.

De statistische eigenschappen van bochtstralen in de Roer zijn afgeleid uit de gegevens van Hoofdstuk 2. De boogstraal bedraagt gemiddeld 60 m en heeft een bereik dat ligt tussen 30 en 90 m. Aannemende dat 95% van de boogstralen R binnen dit bereik liggen, vindt men bij een normale verdeling

$$\mu(R) = 60 \text{ m}$$

$$\sigma(R) = 15 \text{ m}$$

De in Hoofdstuk 2 onderzochte meandermigratie van de Roer leert dat de nu nog tamelijk flauwe bocht A zich heel goed binnen 100 of 200 jaar kan ontwikkelen tot een scherpe bocht waarvoor deze waarden een realistische karakterisering zijn. Het gevolg is een grote buitenbochterosie en om die reden kan het raadzaam zijn om in te grijpen zodra de boogstraal kleiner wordt dan, bijvoorbeeld, 150 m. Een dergelijke strategie vergt systematische monitoring en geschikte mitigerende maatregelen. De bijbehorende waarden voor de normale verdeling van R zijn

$$\mu(R) = 150 \text{ m}$$

$$\sigma(R) = 15 \text{ m}$$

De situaties met $\mu(R) = 60 \text{ m}$ en $\mu(R) = 150 \text{ m}$ worden als afzonderlijke scenario's geanalyseerd.

De breedte van de Roer varieert tussen 20 en 30 m met een gemiddelde waarde van 25 m. Bij een normale verdeling en een 95% betrouwbaarheidsinterval betekent dit

$$\mu(B) = 25 \text{ m}$$

$$\sigma(B) = 2,5 \text{ m}$$

Ook in dit geval is er sprake van een ruimtelijk verdeelde grootheid.

Een indicatie van de buitenbochterosie verkrijgt men door de gemiddelde waarden bij de afvoer met een herhalingsstijd van 200 jaar in te vullen in Formule 3.8. Dit geeft voor $R = 150 \text{ m}$ een bodemdaling $\Delta z_b = 1,6 \text{ m}$ en voor $R = 60 \text{ m}$ een bodemdaling $\Delta z_b = 2,4 \text{ m}$.

3.2.5 Hoogwatererosie

In de SOBEK-berekeningen 3 en 9 varieert de maximale bodemdaling $\Delta z_{hw,max}$ ten gevolge van hoogwaters tussen 0,17 m en 0,57 m. Aannemende dat 90% van de bodemdalingen binnen dit bereik ligt, vindt men bij een normale verdeling:

$$\mu(\Delta z_{hw,max}) = 0,35 \text{ m}$$

$$\sigma(\Delta z_{hw,max}) = 0,1 \text{ m}$$

Deze variabiliteit ligt binnen de marges van de grootschalige morfologische ontwikkeling. Ze treedt slechts incidenteel op, waarna de bedding door natuurlijke processen weer hersteld wordt (Mosselman & Verheij, 2000). Omdat hoogwatererosie bovendien niet op dezelfde tijd en dezelfde plaats optreedt als de grootste buitenbochtersie, wordt zij in de probabilistische bepaling van het risico dat de Roer op de tunnel stuit verder niet meer als afzonderlijk mechanisme meegenomen.

3.3 Discussie

3.3.1 Incidentele en structurele erosie

Als de Roerbedding het tunneldak raakt door *incidentele* hoogwatererosie of een enkele wat diep uitgevallen trog tussen beddingvormen, zal het blootgekomen tunneldak in de regel weer vanzelf met sediment worden afgedekt. Wordt het tunneldak echter aangesneden door *structurele* erosie, dan treden verschillende hydrodynamisch-morfologische effecten op die in de volgende subparagraaf nader besproken worden.

3.3.2 Hydrodynamisch-morfologische effecten van blootlegging tunneldak

Als de Roerbedding het tunneldak raakt, ontstaat een traject met een vaste laag ("*niet-alluviale*" bodem). Een bekledingsconstructie om de bodem te beschermen heeft hetzelfde effect. Over deze vaste laag wordt nog wel zand getransporteerd in de vorm van geïsoleerde ribbels of duinen (van der Zwaard, 1974; Raudkivi & Witte, 1990; Kleijwegt, 1992), maar de stromingsweerstand van de bedding en de capaciteit om zand te transporteren voldoen dan niet meer aan standaard formules voor de voorspelling van alluviale ruwheid en zandtransport. Struiksma (1999) geeft een methode voor de berekening van het sedimenttransport over vaste lagen die in morfologische modellen als SOBEK en Delft3D geïmplementeerd is.

Benedenstrooms van de vaste laag treden door verhoogde turbulentie of te gering aanbod van sediment ontgrondingen op. Bij zich nog verder ontwikkelende erosie zal de vaste laag een drempel gaan vormen in het bodemlengteprofiel, hetgeen bovenstrooms aanzandingen en benedenstrooms uitschuringen zal veroorzaken.

Tenslotte valt op te merken dat de teen van een oeerverdediging minder stabiel kan zijn wanneer deze op het tunneldak rust. Met deze problematiek hebben Franse ingenieurs

bijvoorbeeld ervaring opgedaan bij de aanleg van oeververdedigingen boven de rotsachtige ondergrond van de rivier de Durance.

4 Risico bij verschillende tunneldiepten

4.1 Methode

De formules voor de mechanismen die bijdrage aan de totale bodemerrosie zijn samengevat in Tabel 4.1. Hierin is γ de snelheid van bodemdaling volgens de grootschalige ontwikkeling, t de tijd en δ de onzekerheid in de grootschalige ontwikkeling. Hoogwatererosie is op grond van de overwegingen in Paragraaf 3.2.4 niet meer als afzonderlijk mechanisme meegenomen.

Mechanisme	Formule	Formulenummers in Hoofdstuk 3
grootschalige ontwikkeling	$\Delta z_{go} = \gamma t + \delta$	–
beddingvormen	$\Delta z_d = 0,5 \xi \left(\frac{D_{50}}{\beta h_{gem}} \right)^{0,3} \beta h_{gem}$	3.2 3.6
buitenbochtersie	$\Delta z_b = h_b - h_{max} = \alpha_b s_f \left(1,8 - 0,051 \frac{R}{B} + 0,0084 \frac{B}{h_{gem}} \right) h_{gem} - \beta h_{gem}$	3.8
hoogwatererosie	verwerkt in grootschalige ontwikkeling	

Tabel 4.1 Formules voor mechanismen van bodemerrosie.

Voor de statistische analyse van de bodemerrosie is gebruik gemaakt van het computerprogramma @RISK, onderdeel van het pakket Decision Tools. Dit pakket werkt als een add-in-module van standaard spreadsheetprogramma's. De formules uit Tabel 4.1 en de manier waarop de mechanismen worden geïntegreerd, zijn verwerkt in een eenvoudig, deterministisch spreadsheetmodel. Het programma @RISK biedt vervolgens de mogelijkheid om de invoerparameters te beschrijven in de vorm van kansverdelingen met de bijbehorende parameters. Als bijvoorbeeld de ijkfactor α_b normaal verdeeld is met een verwachtingswaarde van 1,25 en een standaardafwijking van 0,15, dan wordt α_b in het spreadsheet beschreven als RISKNORMAL(B17,C17). In cel B17 staat de verwachtingswaarde 1,25 en in cel C17 de standaardafwijking 0,15.

Vervolgens zijn met @RISK simulaties uitgevoerd voor de in Tabel 4.2 gedefinieerde scenario's IA, IB, IIA en IIB. De daarbij gebruikte statistische eigenschappen van de parameters zijn weergegeven in Tabel 4.3.

		Scenario boogstraal	
		A: 60 m	B: 150 m
Scenario bodemdaling grootschalige ontwikkeling	I: 0 mm/jaar	IA	IB
	II: 4,3 mm/jaar	IIA	IIB

Tabel 4.2 Scenario's voor bodemerrosie van de Roer.

Parameter	Eenheid	Type verdeling	minimum	maximum	gemiddelde μ	standaard afwijking σ
Snelheid van bodemerosie door grootschalige ontwikkeling γ	m/eeuw	uniform	0	I: 0 II: 0,43	-	-
Onzekerheid grootschalige ontwikkeling δ	m	normaal	-	-	0	0,10
Breedte-gemiddelde waterdiepte h_{gem}	m	normaal	-	-	3,8	0,1
Verhouding van maximale tot breedte-gemiddelde waterdiepte β	-	normaal	-	-	1,3	0,06
Mediane korreldiameter van bedmateriaal D_{50}	mm	normaal	-	-	0,3	0,05
Bochtstraal R	m	normaal	-	-	A: 60 B: 150	15
Waterbreedte B	m	normaal	-	-	25	2,5
Modelparameter ξ	-	lognormaal	-	-	0,92	0,65
IJkfactor α_b	-	normaal	-	-	1,25	0,15
Veiligheidsfactor s_f	-	normaal	-	-	0,9	0,15

Tabel 4.3 Statistische eigenschappen van parameters voor bodemerosie.

Elke simulatie bestaat uit een groot aantal trekkingen (orde 100.000). In elke trekking kiest het programma een waarde voor elke invoerparameter en rekt met die set invoerparameters een waarde uit voor de resulterende bodemdaling. Het resultaat van de simulatie is een dataset met resulterende bodemliggingen (orde 100.000). Deze datasets worden vervolgens door het programma statistisch geanalyseerd. Door de grote omvang van de datasets komen de statistische kenmerken goed overeen met de werkelijke statistische kenmerken van de bodemerosie.

Een bekende simulatiemethode is de Monte-Carlo-methode. Hierbij wordt elke trekking volkomen willekeurig verricht. In dit onderzoek is echter gebruik gemaakt van de recenter ontwikkelde Latin-Hypercube-methode. Deze methode leidt in principe tot hetzelfde resultaat, maar werkt efficiënter, omdat de trekkingen niet volkomen willekeurig worden verricht. De cumulatieve kansverdelingsfuncties worden namelijk eerst verdeeld in klassen, en daarna worden uit alle klassen willekeurige trekkingen verricht.

Voor elk scenario wordt de kansdichtheidsfunctie berekend van de bodemligging na 100 jaar en na 200 jaar. Daaruit wordt voor verschillende niveaus van het tunneldak berekend wat de kans is dat de Roer op de tunnel stuit.

4.2 Resultaten

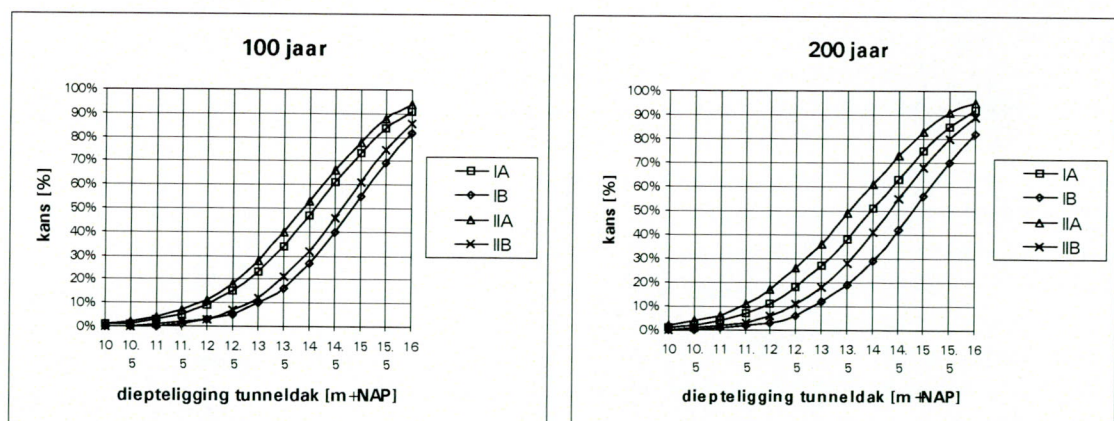
De resultaten van de scenario's zijn weergegeven in de Tabellen 4.4 en 4.5 en de Figuur 4.1. Daarbij is er van uitgegaan dat de huidige bodem op 16,50 m + NAP ligt. De bijbehorende kansdichtheidsfuncties zijn weergegeven in Figuur 4.2. Geconcludeerd kan worden dat het tunneldak in ieder geval beduidend lager zal moeten liggen dan 14,5 m + NAP.

Niveau van tunneldak (m + NAP)	Kans per scenario dat de Roer binnen 100 jaar op tunneldak stuit (%)				Kans per scenario dat de Roer binnen 200 jaar op tunneldak stuit (%)			
	IA	IB	IIA	IIB	IA	IB	IIA	IIB
16,0	91	82	94	86	92	82	95	89
15,5	84	69	88	75	85	70	91	80
15,0	73	55	78	61	75	56	83	68
14,5	61	40	66	46	63	42	73	55
14,0	47	27	53	32	51	29	61	41
13,5	34	16	40	21	38	19	49	28
13,0	23	10	28	12	27	12	36	18
12,5	15	5	18	7	18	6	26	11
12,0	9	3	11	3	11	3	17	6
11,5	5	1	7	2	7	2	11	3
11,0	3	0	4	1	4	1	6	2
10,5	1	0	2	0	2	0	4	1
10,0	1	0	1	0	1	0	2	0

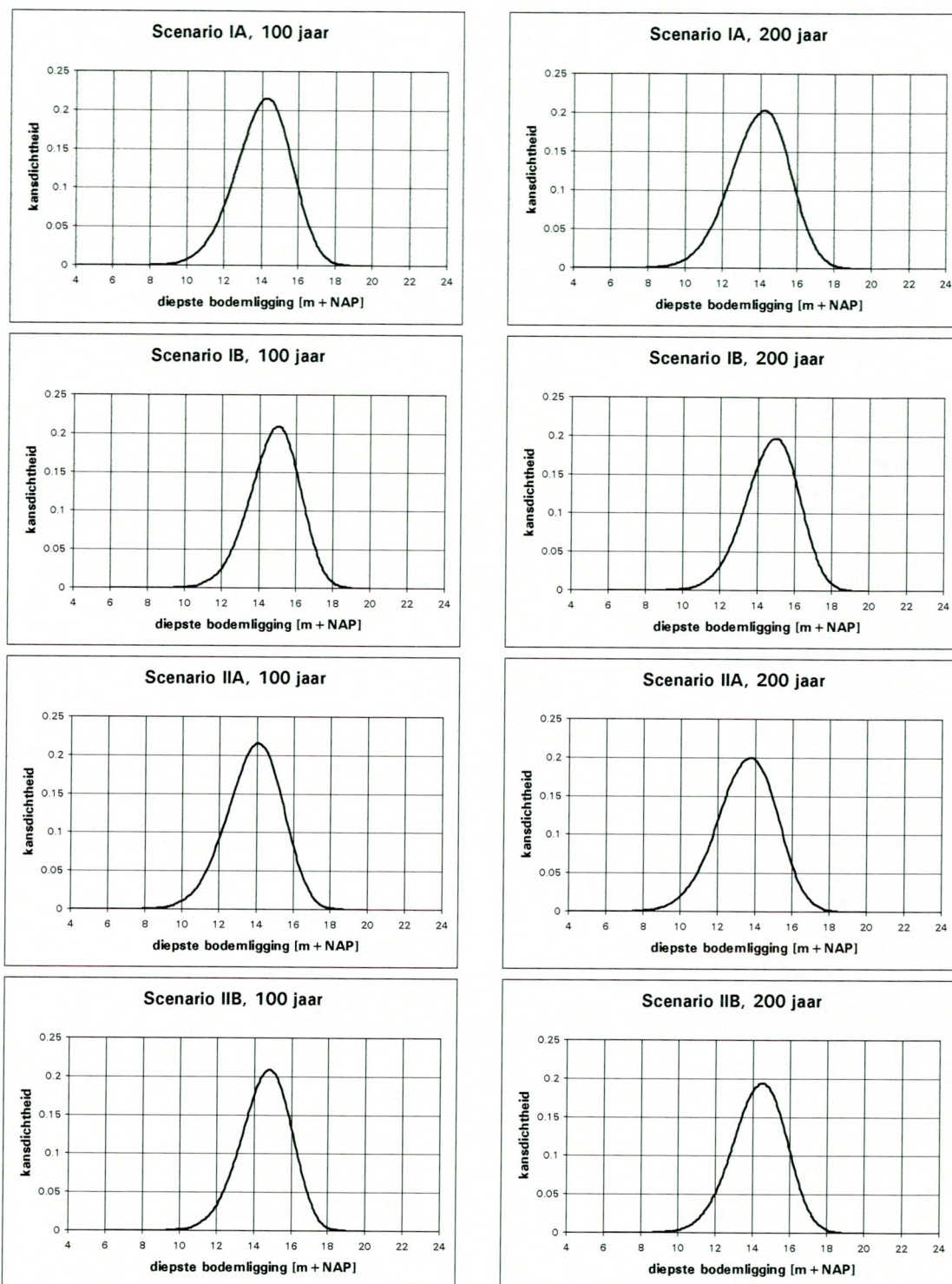
Tabel 4.4 Kansen dat de Roer binnen 100 of 200 jaar op het tunneldak stuit.

Niveau dat met een kans van 1% in 100 jaar door de Roer wordt aangesneden (m + NAP)				Niveau dat met een kans van 1% in 200 jaar door de Roer wordt aangesneden (m + NAP)			
IA	IB	IIA	IIB	IA	IB	IIA	IIB
10,3	11,4	10,1	11,2	10,0	11,2	9,5	10,7

Tabel 4.5 Niveaus die met een kans van 1% door de Roer worden aangesneden.



Figuur 4.1 Cumulatieve verdelingen voor de kansen dat de Roer binnen 100 of 200 jaar op het tunneldak stuit.



Figuur 4.2 Kansdichtheidsfuncties van diepste bodemligging na 100 en 200 jaar voor scenario's IA, IB, IIA en IIB.

Figuur 4.1 laat zien dat, bijvoorbeeld, scenario IIA na 200 jaar een verwachtingswaarde heeft van ongeveer 13,5 m + NAP met een 90% betrouwbaarheidsinterval dat loopt van 11 tot 16 m + NAP. Uit de figuur is tevens af te lezen hoe de kans dat de tunnel wordt aangesneden afneemt wanneer men, uitgaande van een bepaald niveau, de tunnel 1,5 m dieper legt. Dit geeft kwantitatieve informatie over de extra veiligheid die men introduceert wanneer men

naast de hier berekende diepteligging ook nog de 1,5 m marge hanteert die door het Waterschap Roer en Overmaas wordt aangegeven.

De figuren laten zien dat er weinig verschil is tussen de situaties na 100 jaar en na 200 jaar. Dit komt doordat het effect van bochterosie in de resultaten overheerst.

4.3 Discussie

In de simulaties is aangenomen dat alle maximale uitschuringen tegelijkertijd en op dezelfde plaats optreden. De uitkomsten zijn daardoor conservatief. Een nadere aanscherping is op basis van de beschikbare gegevens echter niet goed mogelijk. Wel zou met behulp van een gevoeligheidsanalyse meer inzicht kunnen worden verkregen in de mate waarin de resultaten hiervan afhangen. Een dergelijke analyse valt echter buiten het bestek van dit onderzoek.

Overigens zijn de hoogten van beddingvormen en de buitenbochterosie maximaal tijdens hoogwaters, dus enige correlatie bestaat er wel.

5 Mitigerende maatregelen

5.1 Probleemanalyse

De resultaten van de erosieberekeningen geven een zeer grote potentiële uitschuring aan, waarbij een praktische oplossing moet worden gezocht. Daarbij blijkt buitenbochtersie veruit de grootste invloed te hebben. Hoewel het uitgangspunt is dat de tunnel de Roer niet mag beïnvloeden, is het denkbaar dat de progressief toenemende kosten bij het dieper leggen van de tunnel mitigerende maatregelen noodzakelijk maken. Daarbij ligt het voor de hand om te proberen die maatregelen te realiseren waarbij enerzijds het meandergedrag zo weinig mogelijk wordt beïnvloed en anderzijds aanzienlijk minder erosie zal optreden. Het ligt dus voor de hand om primair te trachten de buitenbochtersie te beïnvloeden.

Daarnaast blijft de mogelijkheid bestaan dat de Roer door meandermigratie of bocht-afsnijding haar bedding zodanig zal verleggen dat deze buiten de beschikbare meanderzone komt. Stelt men ter plaatse van de tunnelkruising mitigerende maatregelen voor waarbij de huidige ligging van de Roer uitgangspunt is, dan dient een grootschalige verlegging van de rivier te worden voorkomen. Verwacht wordt dat een dergelijke ontwikkeling geleidelijk zal gaan. Daarbij liggen de bochten CA en AB nagenoeg vast doordat daar harde infrastructuur aanwezig is. Gezien de lage verwachte migratiesnelheden kan een dergelijke ontwikkeling door monitoring goed worden gevolgd en zonodig tijdig tot staan worden gebracht.

Een belangrijke parameter bij het uitwerken van mitigerende maatregelen is de optredende stroomsnelheid. De SOBEK-berekeningen suggereren dat verder bovenstrooms maximale profielgemiddelde stroomsnelheden tot 2,0 m/s mogelijk zijn, maar dat de maximale profielgemiddelde stroomsnelheden rond het tunneltracé ongeveer 1,6 m/s bedragen. Daar staat tegenover dat in buitenbochten de stroomsnelheid hoger is dan de gemiddelde stroomsnelheid. De mogelijk optredende maximale stroomsnelheid zal daarmee tot 2,0 m/s kunnen bedragen. Dit ligt in lijn met de waarde van circa 1,5 m/s die in de jaren tachtig voor het gebied van het tunneltracé is berekend met het tweedimensionale model WAQUA. Voor de eventuele dimensionering van oever- en bodemverdedigingen wordt hier uitgegaan van een maximale lokale stroomsnelheid van 2,0 m/s.

Vastlegging van de huidige bodem ter hoogte van het tunneltracé is geen goede maatregel, omdat door meandering vervolgens een naastliggend onbedekt bodemdeel kan worden blootgesteld aan de eroderende werking van de stroming.

Op basis van deze overwegingen worden in de volgende paragrafen twee mitigerende maatregelen uitgewerkt:

- Primaire maatregel is het voorkomen van scherpe bochten en daarmee het voorkomen van de buitenbochtersie (Paragraaf 5.2);
- Secundaire maatregel is het stroomlijnen van de tunnel voor het geval dat de bodem toch tot onder het tunneldakniveau komt. Dit kan worden bereikt door de tunnel “in te

pakken”. De noodzaak voor deze bescherming hangt af van het te kiezen niveau van de tunnel (Paragraaf 5.3).

Daarnaast kan nog gewezen worden op andere maatregelen die in de toekomst eventueel overwogen zouden kunnen worden. Met de benedenstroomse stuwen zou men tijdens hogere afvoeren de sedimentatie bovenstrooms kunnen versterken, waardoor een grootschalige bodemdaling kan worden afgezwakt. Een dreigende bochtafsnijding zou men kunnen tegengaan door in de kronkelwaard een kade aan te leggen die een kortsluitende stroming afremt of blokkeert. Dichtbij Roermond bevindt zich een soortgelijke oplossing in de Maasbocht bij Linne.

5.2 Voorkoming van scherpe bochten nabij het tunneltracé

5.2.1 Inleiding

Het optreden van diepe bochterosie ter hoogte van het tunneltracé kan worden tegengegaan door de vorming van scherpe bochten tegen te gaan. Thans is sprake van een redelijk rechte rivierloop, met een zeer flauwe rechterbocht aan de bovenstroomse zijde. Gezien de mogelijke uitbochting van de meanderbocht A in de loop van de tijd, is het scherper worden van de flauwe rechterbocht niet ondenkbeeldig.

Er zijn in principe twee mogelijkheden om dit tegen te gaan:

- Volledige fixatie van de oevers ter plaatse;
- Toelaten van beperkte dynamiek, op een dusdanige wijze dat geen scherpe bochten ontstaan. Hierbij kan enige oeverafkalving en –versteiling worden toegestaan, maar migratie van de oeverlijn zal zeer beperkt dienen te blijven.

5.2.2 Volledige fixatie van de oever

Door de relatief lage stroomsnelheden kan een volledige oeverfixatie op een relatief natuurvriendelijke wijze plaatsvinden. Daarbij kan worden gedacht aan een goede, gesloten grasmat of een driedimensionale structuurmat. Deze verdedigingen zijn niet toepasbaar op het onderwatergedeelte (onderste 2 tot 3 meter van de oever), omdat dat niet goed begroeid zal raken. Op dat gedeelte zal daarom een aanvullende verdediging nodig zijn met klei of grind en dergelijke.

Een goede *grasmat* kan stroomsnelheden weerstaan tot ruim 2 m/s. Een gemiddelde normale grasmat weerstaat stroomsnelheden tot 1,5 m/s gedurende zeker 100 uur. De grasmat moet dan wel aan een aantal voorwaarden voldoen die beschreven zijn in diverse TAW-publicaties (TAW, 1998, 1999) en in handboeken (Pilarczyk, 1998). De ervaringen langs de grote rivieren strekken hierbij tot voorbeeld.

De toelaatbare stroomsnelheid kan worden berekend met (BD, 1990):

$$\text{goede grasmatt: } u = \frac{5,35}{t} + 2,3 \quad (5.1)$$

$$\text{normale grasmatt: } u = \frac{4,41}{t} + 1,7 \quad (5.2)$$

waarin u de stroomsnelheid in m/s is en t de tijd in uren. De ontwerpwaarde van 2 m/s voor de stroomsnelheid ligt onder de drempelwaarde voor een goede grasmatt. Die zal dus zeker voldoen. Een normale grasmatt voldoet als de tijdsduur van de belasting beperkt is tot zo'n 14 uur. Ingeschat wordt dat de tijdsduur van Roerhoogwaters langer zal zijn. Er zal dus minimaal een goede grasmatt nodig zijn.

Als een grasmatt toch onvoldoende mocht blijken, kan een *driedimensionale structuurmatt* worden overwogen. Dit is een geokunststof met een zekere dikte. In de gaasachtige structuur kan grond worden aangebracht en kan vegetatie zich ontwikkelen. Op diverse plaatsen (onder andere langs de Maas bij Venlo) zijn rivieroeveren hiermee beschermd tegen de erosieve kracht van langsstromend water. Pilarczyk (1998) en BD (1990) geven meer informatie. Ook structuurmatten zullen alleen worden toegepast in het gedeelte waar begroeiing wordt verwacht.

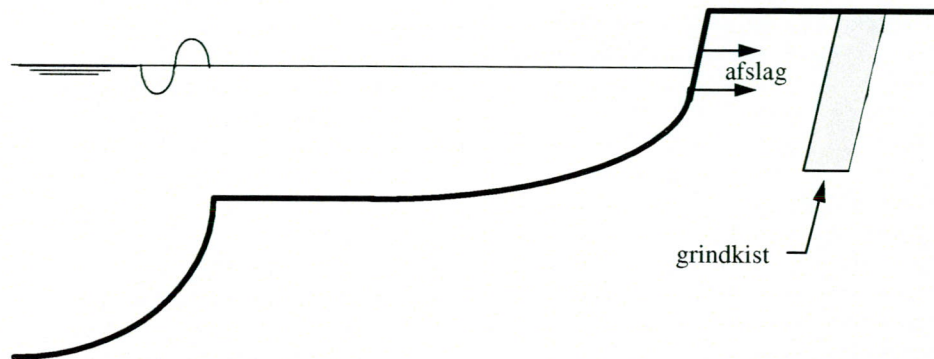
Het gedeelte *onder water* zou voor volledige fixatie moeten worden beschermd met klei of grind.

De oeververdedigingen hoeven niet direct te worden aangelegd. De ontwikkelingen kunnen worden gemonitord en als blijkt dat versterkte bochtvorming optreedt, kan de oever verdedigd worden.

5.2.3 Toelaten van beperkte dynamiek

Het toelaten van enige dynamiek is te verkiezen boven volledige fixatie omdat dit optimale condities voor een natuurlijke ontwikkeling creëert. Dit betekent dat in de oeverzone zelf geen maatregelen worden gerealiseerd, maar dat een preventieve verdediging wordt aangebracht op enige afstand uit de oever. Gezien de relatief lage stroomsnelheden kan hierbij worden volstaan met een grindkist, evenwijdig aan de oever op circa 5 m uit de kruin van de huidige oeverlijn (Figuur 5.1). De grindkist kan bestaan uit toutvenant grind dat uit de Grensmaas afkomstig is (circa 0-60 mm) met een dikte van circa 0,5 m en een diepte tot circa 0,5 m onder het huidige diepste bodemniveau van 16,5 m + NAP in rechte riviergedeelten. Door dit grind "oevervolgend" aan te brengen vanaf halverwege meanderbocht A tot juist benedenstrooms van de tunnel, wordt de beoogde inperking van de meandering verkregen. Daarbij hoeft de kist alleen aan de buitenzijde van de meanderbocht en de tegenbocht te worden gelegd. De grindkist functioneert als een oeverbescherming die pas zijn werk gaat doen op het moment dat deze wordt "aangesproken", dat wil zeggen wanneer de oever dusdanig is ingesneden dat deze de grindkist bereikt, waarna een stabiele oever zal ontstaan (na enige aanpassing van het grindtalud). Daarbij vormt het voorgestelde

toutvenant een natuurlijk substraat waarin redelijke vegetatieontwikkeling (zoals bij de Grensmaas) mogelijk is, zodat ook dan de oever een natuurlijk aanzien zal behouden.



Figuur 5.1 Principe van oeververdediging met een vooraf ingegraven grindkist.

5.3 Stroomlijning tunnel

Als bochterosie wordt tegengegaan door voorgaande maatregelen blijft erosie redelijk beperkt. Afhankelijk van de te realiseren hoogteligging van de tunnel zal het mogelijk kunnen zijn dat desondanks de rivierbedding en het tunneldak elkaar zullen raken. Voor de sterkte van het tunneldak zelf is dit geen probleem, maar de tunnel kan als een obstakel gaan fungeren, dat wil zeggen als een ongestroomlijnde drempel in de rivierbedding.

De stroomkrachten kunnen lokaal dan groot worden en er kan versterkte erosie en sedimentatie als gevolg van deze obstructie optreden. Dit is rivierkundig ongewenst, maar kan er bovendien toe leiden dat de tunnel grotendeels bloot komt te liggen. Dit dient te worden voorkomen door middel van een preventieve bodemverdediging aan de bovenstroomse en aan de benedenstroomse zijde van de tunnel. Daarbij wordt de tunnel als het ware “ingepakt” waarbij het tunneldak onbeschermd kan blijven. Dit laatste is echter wel afhankelijk van de eventuele dekking die op de tunnel benodigd is om opdrijven te voorkomen. Hier is ervan uitgegaan dat geen dekking nodig is gezien de korte tunnellengete die blootkomt. De bovenstroomse helling dient circa 1:4 te bedragen vanaf het tunneldak tot een niveau van circa 14 m + NAP. Om ontgronding aan de benedenstroomse zijde te voorkomen wordt eveneens tot hetzelfde niveau een bodemverdediging aanbevolen, maar met een helling 1:8. Het materiaal voor deze verdediging kan eveneens bestaan uit toutvenant grind uit de Grensmaas (0-60 mm). Het voordeel hiervan is dat dit goedkoop is en dat er tevens van een goede filterwerking sprake is wanneer deze in een laagdikte van circa 0,3 m wordt aangebracht.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

De zone waar de Roermeanders de komende 200 jaar met 90% zekerheid binnen zullen blijven is weergegeven in Figuur 2.7. Deze zone is vastgesteld door middel van een deskundigenoordeel op basis van de beschikbare gegevens. Een statistische analyse van de gegevens biedt namelijk onvoldoende houvast. Enerzijds leidt extrapolatie van de actieve recente oevererosie bij Vlodrop tot een overschatting van de te verwachten meandermigratie. Anderzijds leidt een vergelijking van huidige met historische kaarten tot een onderschatting van de mogelijke meandermigratie, omdat veel oevers voor een onbekend deel van de tijd verdedigd waren.

Uitschuring van de rivierbodem kan het gevolg zijn van (a) grootschalige morfologische ontwikkelingen, (b) beddingvormen, (c) buitenbochtersie, en (d) hoogwatererosie. Het blijkt dat de buitenbochtersie een doorslaggevende rol speelt in de beoordeling van het risico dat de Roer binnen 100 of 200 jaar op het tunneldak stuit. De kans is groot dat de bocht net bovenstrooms van het tunneltracé zich binnen deze termijnen kan ontwikkelen tot een scherpe bocht met een boogstraal van 60 m. Dit zou grote buitenbochtersie veroorzaken en om die reden kan het raadzaam zijn om in te grijpen zodra de boogstraal kleiner wordt dan, bijvoorbeeld, 150 m. Om de invloed van een dergelijke strategie zichtbaar te maken zijn twee scenario's afzonderlijk uitgewerkt. In scenario A ontstaat een scherpe bocht met een boogstraal van 60 m. In scenario B blijft de bocht flauw met een boogstraal van 150 m.

De schaarse gegevens over de tijdsafhankelijke ontwikkeling van de waterstands-afvoerrelatie te Vlodrop suggereren dat daar reeds nu een bodemdaling optreedt met een snelheid van 17,5 mm/jaar (1,75 m/eeuw). Stuweffecten vanuit de Maas zwakken dit ter plaatse van de tunnel af tot een bodemdaling van 4,3 mm/jaar (0,43 m/eeuw). Omdat de gegevens te beperkt zijn voor harde conclusies, zijn ook hier twee scenario's afzonderlijk uitgewerkt. In scenario I wordt de bodemdaling op nul mm/jaar gesteld, in scenario II op 4,3 mm/jaar.

Uit de resultaten voor de verschillende scenario's kan geconcludeerd worden dat het tunneldak in ieder geval beduidend lager zal moeten liggen dan 14,5 m + NAP.

6.2 Aanbevelingen

Aanbevolen wordt om scenario IIA aan te houden zolang er geen sprake is van mitigerende maatregelen en zolang er geen betere gegevens beschikbaar zijn over thans optredende grootschalige morfologische ontwikkelingen.

Besluit men om in te grijpen zodra de boogstraal ter plaatse van de tunnel kleiner wordt dan, bijvoorbeeld, 150 m (scenario IIB), dan wordt een oplossing aanbevolen waarbij op korte

afstand uit de oever een grindkist wordt aangebracht, die enerzijds de natuurlijke oeverdynamiek tot op zekere hoogte toelaat en anderzijds een natuurlijk aanzien aan de oever geeft wanneer de verdediging wordt “aangesproken”. In het laatste geval brengt de zich vormende grindoever de verdere uitbochting tot staan, zodat ook de buitenbochterosie niet toeneemt.

Indien de vereiste diepteligging van de tunnel op economische gronden niet haalbaar blijkt, wordt een aansluitende verdediging aanbevolen, die ervoor zorgt dat het blootkomen van de tunnel geen additionele erosie veroorzaakt.

Aanbevolen wordt om een programma op te stellen voor het monitoren van de morfologische ontwikkeling van de Roer. Allereerst verkrijgt men hiermee betere basisgegevens, zoals bijvoorbeeld de tijdsafhankelijke ontwikkeling van waterstandsafvoerrelaties (“Q-h-relaties”). Daarnaast is de monitoring echter ook noodzakelijk om met mitigerende maatregelen te kunnen ingrijpen wanneer de Roer zich ongunstig ontwikkelt.

De monitoring kan worden ondersteund met een eendimensionaal morfologisch model. Daarbij dient bedacht te worden dat de schematisatie voor een eendimensionaal hydrodynamisch model niet automatisch ook geschikt is voor morfologische berekeningen. Het is raadzaam om een morfologisch model van de grond af aan nieuw op te zetten, met een op morfologische processen toegespitste schematisatie. Overigens geldt voor een relatief kleine rivier als de Roer dat de morfologische ontwikkeling sterk beïnvloed wordt door inhomogeniteiten in het rivierdal. Deze inhomogeniteiten betreffen de samenstelling van de ondergrond, maar bijvoorbeeld ook de bomen die op de oevers staan of, na te zijn omgevallen door oevererosie, in de rivier liggen. Hiermee zal men bij de modellering en bij de interpretatie van rekenresultaten rekening moeten houden.

Om beter zicht te krijgen op de grootschalige morfologische ontwikkeling, zou men op meerdere locaties langs de Roer de tijdsafhankelijke ontwikkeling van waterstandsafvoerrelaties (“Q-h-relaties”) moeten meten. Daartoe zou men jaarlijks ter plaatse van de meetstations bij meerdere afvoeren de dwarsprofielen moeten peilen en op meerdere plaatsen in die profielen de stroomsnelheden moeten meten. Voor morfologische berekeningen met SOBEK zou men op meerdere locaties langs de Roer de sedimenteigenschappen moeten bepalen. Men zou ook sedimenttransporten rechtstreeks kunnen meten, maar vaak is het betrouwbaarder om een sedimenttransportformule af te leiden uit de tijdsafhankelijke ontwikkeling van een in de bedding aangebrachte lokale verdieping.

De resultaten van de probabilistische berekeningen zijn conservatief omdat is aangenomen dat verschillende maximale uitschuringen tegelijkertijd en op dezelfde plaats optreden. Aanbevolen wordt om een gevoeligheidsanalyse uit te voeren om inzicht te verkrijgen in de mate waarin de resultaten hiervan afhangen.

7 Literatuurverwijzingen

- Alkema, D., M. Mosselman & I. Paulussen (1994), Earthquake-triggered landslides at the Brunssummerheide, Limburg, the Netherlands: preliminary studies following the 1992 Roermond earthquake. *Geologie en Mijnbouw*, Vol.73, pp.387-391.
- BD (1990), Rekenregels voor waterbouwkundig ontwerpen. Rijkswaterstaat, Directie Sluizen en Stuwen, Utrecht.
- Crosato, A. (1989), Meander migration prediction. *Excerpta, GNI*, Vol.4, Libreria Progetto, Padova, pp.169-198.
- Crosato, A. (1990), Simulation of meandering river processes. *Communications on Hydr. and Geotech. Engrg.*, No.90-3, Delft Univ. of Technol., ISSN 0169-6548.
- Gill, M.A. (1971), Height of sand dunes in open channel flows. *J. Hydr. Div., ASCE*, Vol.97, No.HY12, pp.2067-2074.
- IWACO (1999), Hydrologisch onderzoek tracé RW-73 zuid nabij Roermond. Notitie voor Rijkswaterstaat Limburg, conceptversie 8 oktober 1999.
- Julien, P.Y. & G.J. Klaassen (1995), Sand-dune geometry of large rivers during floods. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, Vol.121, No.9, pp.657-663.
- Kleijwegt, R.A. (1992), Development of bed features (discussion). *J. Hydr. Engrg., ASCE*, Vol.118, No.4, pp.650-655.
- Kramer, J. de (1997), Oevererosie in de Grensmaas in het heden, verleden en de toekomst. Vakgroep Fysische Geografie, Universiteit Utrecht, stageverslag Rijkswaterstaat, Directie Limburg.
- Maynord, S.T. (1996), Toe-scour estimation in stabilized bendways. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, Vol.122, No.8, pp.460-464.
- Meyer-Peter, E. & R. Müller (1948), Formulas for bed-load transport. *Proc. 2nd Congress IAHR*, Stockholm, Paper No.2, pp.39-64.
- Moll, J.R., T. Schilperoort & A.J. de Leeuw (1987), Stochastic analysis of bedform dimensions. *J. Hydr. Res., IAHR*, Vol.25, No.4, pp.465-479.
- Mosselman, E. & H.J. Verheij (2000), Experimental study on scour rate and river bed inertia. Discussie geaccepteerd voor publicatie in *J. Hydr. Res., IAHR*.
- Nanson, G.C. & E.J. Hickin (1983), Channel migration and incision on the Beatton River. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, Vol.109, No.3, pp.327-337.
- Ormeling, F.J. & M.J. Kraak (1987), Kartografie; Ontwerp, productie en gebruik van kaarten. Delftse Universitaire Pers.
- Pilarczyk, K.W. (1998), Dikes and revetments - Design, maintenance and safety assessment. Balkema, Rotterdam.
- Raudkivi, A.J. & H.-H. Witte (1990), Development of bed features. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, Vol.116, No.9, pp.1063-1079.
- Rijn, L.C. van (1984), Sediment transport, Part III: bed forms and alluvial roughness. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, Vol.110, No.12, pp.1733-1754.
- Struiksmā, N. (1999), Mathematical modelling of bedload transport over non-erodible layers. *Proc. IAHR Symp. River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, Genova, 6-10 Sept. 1999, Vol. I, pp.89-98.
- TAW (1998), Technisch rapport erosiebestendigheid van grasland als dijkbekleding. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Delft.
- TAW (1999), Grasmāt als dijkbekleding. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Delft.
- Thorne, C.R. (1988), Bank processes on the Red River between Index, Arkansas and Shreveport, Louisiana. Final report to US Army European Research Office, Dept. Geography, Queen Mary College, London.
- Thorne, C.R., S.R. Abt & S.T. Maynord (1995), Prediction of near-bank velocity and scour depth in meander bends for design of riprap revetments. In: *River, coastal and shoreline protection; Erosion control using riprap and armourstone*, Eds. C.R. Thorne, S.R. Abt, F.B.J. Barends, S.T. Maynord & K.W. Pilarczyk, Wiley, pp.115-133.



wL | delft hydraulics

Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon 015 285 85 85
telefax 015 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

Rotterdamseweg 185
p.o. box 177
2600 MH Delft
The Netherlands
telephone +31 15 285 85 85
telefax +31 15 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

