

Kribben en ijsdammen

**Henk Verheij, Erik Mosselman,
Chris Stolker**

april 2004

Inhoud

1	Inleiding	1—1
1.1	Opdracht	1—1
1.2	Doelstelling	1—1
1.3	Opzet studie	1—2
2	Uitgangspunten en randvoorwaarden.....	2—1
2.1	IJsvorming	2—1
2.2	Krib en kribveld layout	2—2
3	Vormgeving van kribben versus ijsdammen en ijsafvoer	3—1
3.1	Inleiding	3—1
3.2	Ontstaan van ijsdammen	3—2
3.3	Beïnvloeding ijsdammen door kribben	3—4
3.4	Conclusies en kennisleemten	3—6
4	Effecten van ijsdammen op rivierafvoer en morfologie	4—1
4.1	Inleiding	4—1
4.2	Vloeistofeigenschappen van water nabij het vriespunt	4—1
4.3	Invloed van ijsdammen op waterbeweging	4—2
4.4	Invloed van ijsdammen op sedimenttransport en morfologie	4—5
4.5	Conclusies	4—9
5	Belastingen op kribben door ijs	5—1
5.1	Inleiding	5—1
5.2	Onderverdeling ijsbelasting op toplagen van kribben	5—2
5.3	Krachten door bewegend ijs op een toplaag	5—3
5.4	Krachten van een tegen een krib aanstotende ijsplaat	5—9

5.5	Krachten door verticale beweging van een aan de toplaag vastgevroren ijslaag.....	5—10
5.6	Thermische ijskrachten	5—14
5.7	Conclusies en kennisleemten	5—15
6	Gevolgen voor beheer, onderhoud en monitoren	6—1
6.1	Inleiding.....	6—1
6.2	Consequenties voor het ontwerp.....	6—2
6.3	Consequenties voor beheer, onderhoud en monitoren	6—4
7	Conclusies en aanbevelingen.....	7—1
	Literatuur	
A	Enkele uitgebreide abstracts.....	A—4

I Inleiding

I.1 Opdracht

Vormgeving, onderhoud en instandhouding van kribben is bij Rijkswaterstaat al enige jaren een aandachtspunt. Centraal daarbij staat dat de functionaliteit van kribben gegarandeerd dient te blijven, waarbij de functionaliteit betrekking heeft op de scheepvaartfunctie (bevaarbaar houden van de rivier en vermijden van ondieptes) en de afvoerfunctie (bevorderen afvoer van water en ijs om opstuwing van water en vorming van ijsdammen te voorkomen). Recent zijn diverse studies uitgevoerd naar de functionaliteit gekoppeld aan de scheepvaart (Verheij, 1997)(van Heereveld, 2002). De afvoer van ijs en de interactie met vorm en dimensies van kribben, waterafvoer en morfologie van de (lokale) rivierbodem vormen onderwerp van deze studie, waarbij het uiteindelijke doel is (i) het duiden van onderhoudsrichtlijnen die beheerders kunnen hanteren bij de afweging of onderhoud aan een krib nodig is en (ii) geven van ontwerprijtlijnen.

De onderhavige studie is uitgevoerd naar aanleiding van een offerteaanvraag d.d. 22 oktober 2003 met kenmerk AB034501 van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van RWS. Opdracht is verleend per brief d.d. 12 november 2003 met kenmerk AB034932 op basis van de door WL | Delft Hydraulics opgestelde offerte van 29 oktober 2003 met kenmerk ZWS2634/Q3630.95/mh.

De studie is uitgevoerd door ir. H.J. Verheij, dr.ir. E. Mosselman en ir. C. Stolker, waarbij eerstgenoemde tevens als projectleider fungeerde. De kwaliteitsborging is door ir. F.C.M. van der Knaap uitgevoerd.

Van de zijde van de opdrachtgever is de studie begeleid door mw.dr.ir. J.M.T. Stam van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van RWS.

I.2 Doelstelling

In relatie tot ijsdammen leven er een aantal concrete vragen:

- Hoe wordt ijsafvoer door kribben beïnvloed en wat zijn de morfologische gevolgen van ijsopstuwing?
- Kunnen we de vormgeving van kribben aanpassen om de opstuwing van waterstand en de vorming van ijsdammen te voorkomen?
- Welke belasting op de kribben door ijsvorming is maatgevend voor het ontwerp van toplagen van kribben?

Om antwoorden te vinden op deze vragen, zodat beheerders in de toekomst kunnen beschikken over richtlijnen voor het ontwerp, het beheer en onderhoud en het monitoren van kribben, is de onderhavige studie uitgevoerd. De doelstelling van het onderzoek is dan ook als volgt geformuleerd:

Opstellen van praktische richtlijnen voor de vormgeving van kribben in relatie tot ijsafvoer. De richtlijnen moeten in eerste instantie de relatie weergeven tussen de te handhaven kribdimensies, morfologie van de rivier en de (ijs)afvoer. De studie moet uitmonden in aanbevelingen welke onderdelen van de krib moeten worden gemonitord.

De studie heeft een sterk oriënterend karakter en is grotendeels gebaseerd op de beschikbare literatuur. Voor zover mogelijk zijn concrete richtlijnen opgesteld.

1.3 Opzet studie

Gegeven de doelstelling en de daaraan gerelateerde vragen is de studie in drie onderdelen verdeeld:

1. Vormgeving van kribben om ijsdammen te voorkomen en maximale (ijs)afvoer te garanderen;
2. Effecten van ijsdammen op rivierafvoer en morfologie;
3. Hydraulische belastingen op kribben door ijs.

Deze 3 onderdelen zijn bestudeerd op basis van een combinatie van beperkt literatuuronderzoek en kwalitatieve beschouwingen en komen aan de orde in respectievelijk de hoofdstukken 3, 4 en 5. Daaraan voorafgaand wordt in hoofdstuk 2 ingegaan op ijsvorming en uitgangspunten bij het onderzoek ten aanzien van vormgeving kribben en layout kribvakken.

In hoofdstuk 6 worden de gevolgen voor het beheer en onderhoud en voor de monitoren van kribben besproken. Tenslotte worden in hoofdstuk 7 de conclusies en aanbevelingen gepresenteerd.

Bij de literatuur wordt onderscheid gemaakt in referenties waarnaar wordt verwezen en in literatuur die wel is signaleerd, maar niet is gebruikt.

2 Uitgangspunten en randvoorwaarden

In dit hoofdstuk wordt een aantal aspecten behandeld van meer algemene aard. Het gaat dan om ijsvorming, beschouwde krib en kribveld lay-out.

2.1 Ijsvorming

Ijsdammen kunnen ontstaan zodra in de rivier ijsvorming optreedt. Rondom het vriespunt zal zich naast randijs ook zweefijs over de hele rivierbreedte vormen. Dit zweefijs kan aan de bodem vastvriezen waardoor grondijs ontstaat. Bij toenemend volume kan het grondijs losraken en gaan zweven en samen met het al aanwezige zweefijs ijsschollen gaan vormen die door de stroming worden getransporteerd totdat zij tegen een obstakel of in een vernauwing terecht komen. Hierdoor ontstaat een opeenstapeling die aan elkaar vriest en een vast ijsdek vormt. De aangroei kan oplopen tot 1 km/uur (Termes & Boogaard, 1991). De ruwheid bedraagt 75 à 90% van de Chézy-ruwheid zonder ijs.

Een ijsdam kan ontstaan op 2 manieren (Frankenstein & Wuebben, 1992):

1. doordat steeds meer ijs onder het vaste ijsdek komt vast te zitten: zgn. “freeze-up jam”
2. tijdens een dooiperiode waarbij het vaste ijsdek wordt opgebroken en komt vast te zitten bij vernauwingen, zgn. “break-up jam”.

Het break-up type zorgt doorgaans voor meer problemen dan het freeze-up type, omdat tijdens een dooiperiode veelal ook de rivierafvoer aan het toenemen is. Voor het freeze-up type is het Nederlandse klimaat echter zodanig dat de kou vaak niet intens en langdurig genoeg is om een erg dikke en compacte ijsplaat te vormen. Break-up jams komen meer voor in bredere rivieren en deze ijsdammen zijn ook massiever.

Volgens de Commissie “Toetsing Uitgangspunten Rivierdijkversterkingen”, ook wel naar haar voorzitter Commissie Boertien genoemd, komen ijsdammen nog voor met een frequentie van eens per 9 jaar en zijn van het type freeze-up (WL/RAND, 1993). Het break-up type wordt niet meer verwacht, omdat de afvoer sterk is verbeterd.

Ook wordt aangegeven dat de kans op een vast ijsdek ongeveer 1x per 16,5 jaar is en dus is de kans op een ijsdam kleiner dan 1x per 16,5 jaar.

In het Boertien onderzoek (WL/RAND, 1993) en de studie van Termes & Boogaard (1991) is veel informatie te vinden over ijsvorming.

Ter afsluiting van dit aspect is nog te vermelden dat Klaassen (1976) in WL verslag R1104 heeft aangetoond dat tegen de tijd dat een hoogwatergolf in Nederland arriveert de ijsbezetting als gevolg van dooi voldoende is afgenomen om problemen te voorkomen. Tegenwoordig vindt er echter een snellere afstroming plaats dan destijds, dus in hoeverre deze constatering nog altijd juist is, is onduidelijk. In het kader van deze studie is dit niet nader onderzocht, maar in relatie tot de hoogwaterproblematiek verdient het aanbeveling dit te onderzoeken.

Tot slot van deze beknopte beschouwing enige terminologie. In de literatuur wordt veel gesproken over ice jam en frazil ice. Wij hebben dit als volgt vertaald: ijsdam (strikt

genomen wordt hiermee een opeenhoping van ijs bedoeld) respectievelijk sponsijs of heusijs. Verder wordt onder “kruien” verstaan het over elkaar heen schuiven van ijsschotsen waardoor een opeenstapeling ontstaat (voorafgaand aan kruien moet een ijsdam of ijsplaat overigens wel eerst breken voordat ijsschotsen over elkaar heen kunnen schuiven). In plaats van kruien zullen de termen “schuiven” en “opstapelen” worden gebruikt, omdat deze eenduidiger de beide afzonderlijke processen aanduiden.

2.2 Krib en kribveld layout

Kribben zijn aangelegd in het kader van de normalisatie van de rivieren en hebben betrekking op de afvoerfuncties en de scheepvaartfunctie bij laag water. Daarnaast kunnen kribben ook andere functies vervullen, zoals: natuurfunctie, recreatieve functie.

Een krib staat loodrecht of schuin op de oever en heeft als taak om de positie van de hoofdstroom van een rivier op te leggen. Tevens kan de vaardiepte worden beïnvloed.

Bij de normalisering is gekozen voor een trapeziumvormige dwarsdoorsnede van het zomerbed, het zogenaamde normalisatieprofiel. Dit betekent dat de insteek vast ligt en impliciet ook een aantal kribparameters (lengte en hoogte van de krib). Verder worden min of meer standaardkribben toegepast met vaste geometrie. Van de volgende kribparameters kan daarom worden gesteld dat deze min of meer vaststaan (zie Figuur 2.1):

- Helling α_{kop} van de kribkop (1 : 3,5)
- Lengte b_k van de krib (50 à 100 m)
- Hoogte z_k van de krib gedefinieerd op de overgang van kribkop en kriblichaam (afhankelijk van de locatie)
- Helling β_{kruin} van de kruin (1 : 100)

Een aantal andere kribparameters heeft geen relatie met het normalisatieprofiel en ligt dus niet vast, maar ook hier worden in Nederland min of meer vaste waarden voor gehanteerd:

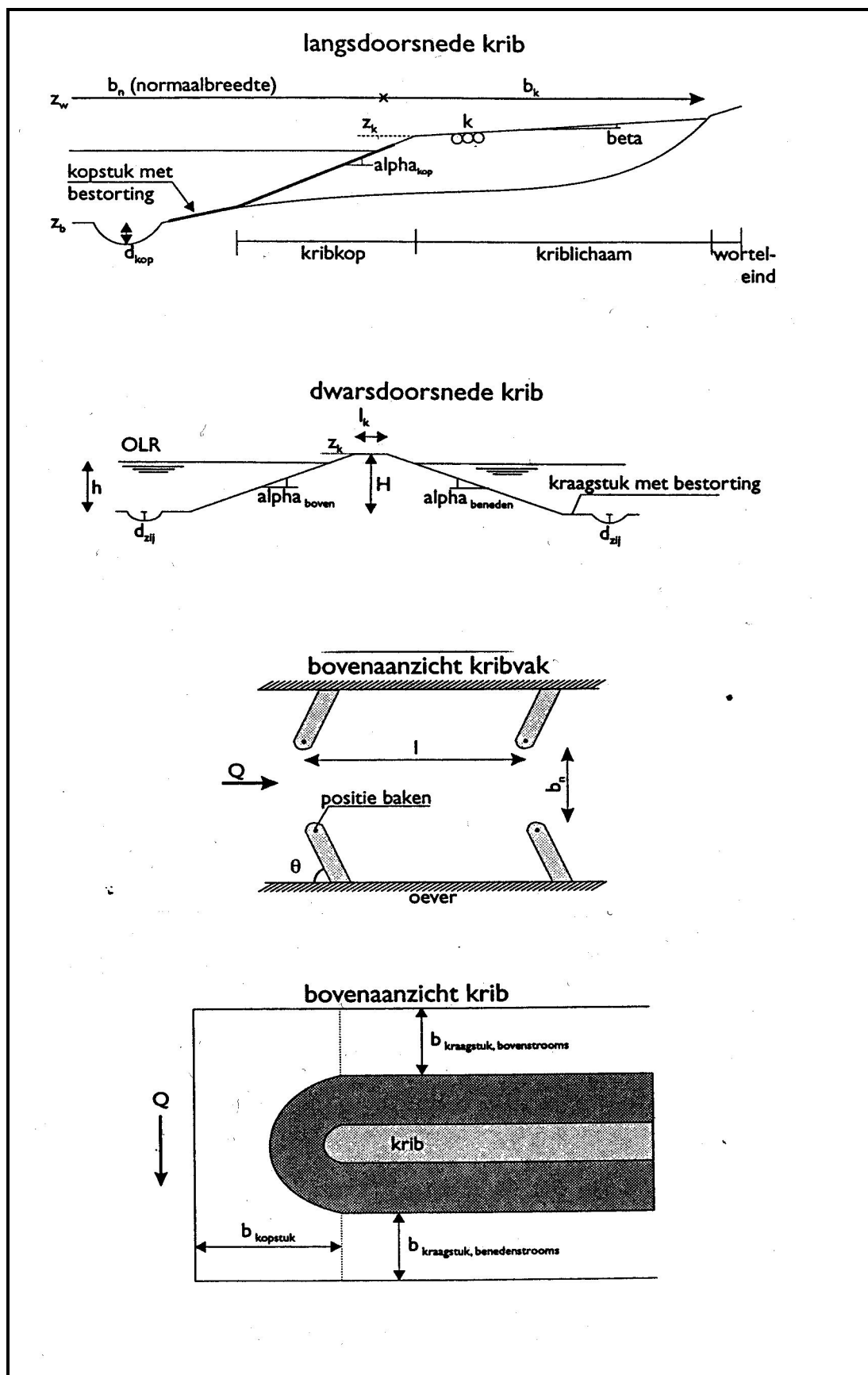
- Bovenstroomse helling $\alpha_{\text{bovenstrooms}}$ van het kriblichaam (1 : 2,5 à 3,5)
- Benedenstroomse helling $\alpha_{\text{benedenstrooms}}$ van het kriblichaam (1 : 2,5 à 3,5)
- Breedte l_k van het kriblichaam (2 m)
- Afmetingen kop- en kraagstuk: b_{kopstuk} , $b_{\text{kraagstuk, bovenstrooms}}$, $b_{\text{kraagstuk, benedenstrooms}}$ (variabel)
- Ruwheid k van de krib (variabel)

Andere parameters zijn:

- Diepte d_{kop} van de ontgrondingskuil
- Diepte d_{zij} van de boven- en benedenstroomse ontgrondingskuil

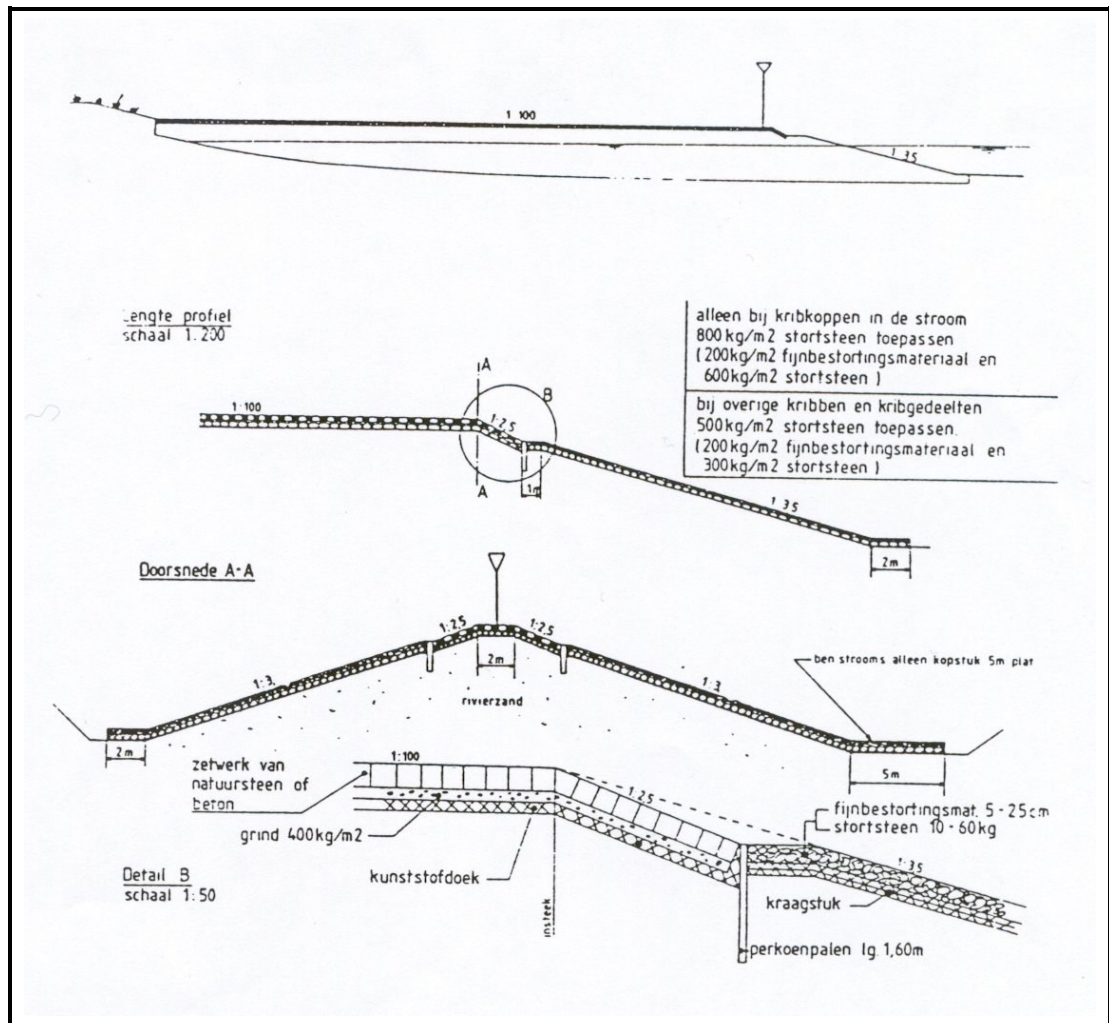
NB: Normaalbreedte is gedefinieerd als de breedte tussen de tegenover elkaar liggende kribkoppen op de waterlijn bij de Middelbare Rivierstand. De kriblengte b_k is gerelateerd aan de normaalbreedte en gelijk aan de afstand tussen oeverlijn (= worteleind) en de waterlijn op MR.

In dit verslag staat de ligging van de kribben niet ter discussie. Dit betekent dat aan de onderlinge afstand L en de hoek θ ten opzichte van de stroming niet wordt getornd. Ook wordt als vaststaand aangenomen de ligging ten opzichte van de tegenoverliggende krib.

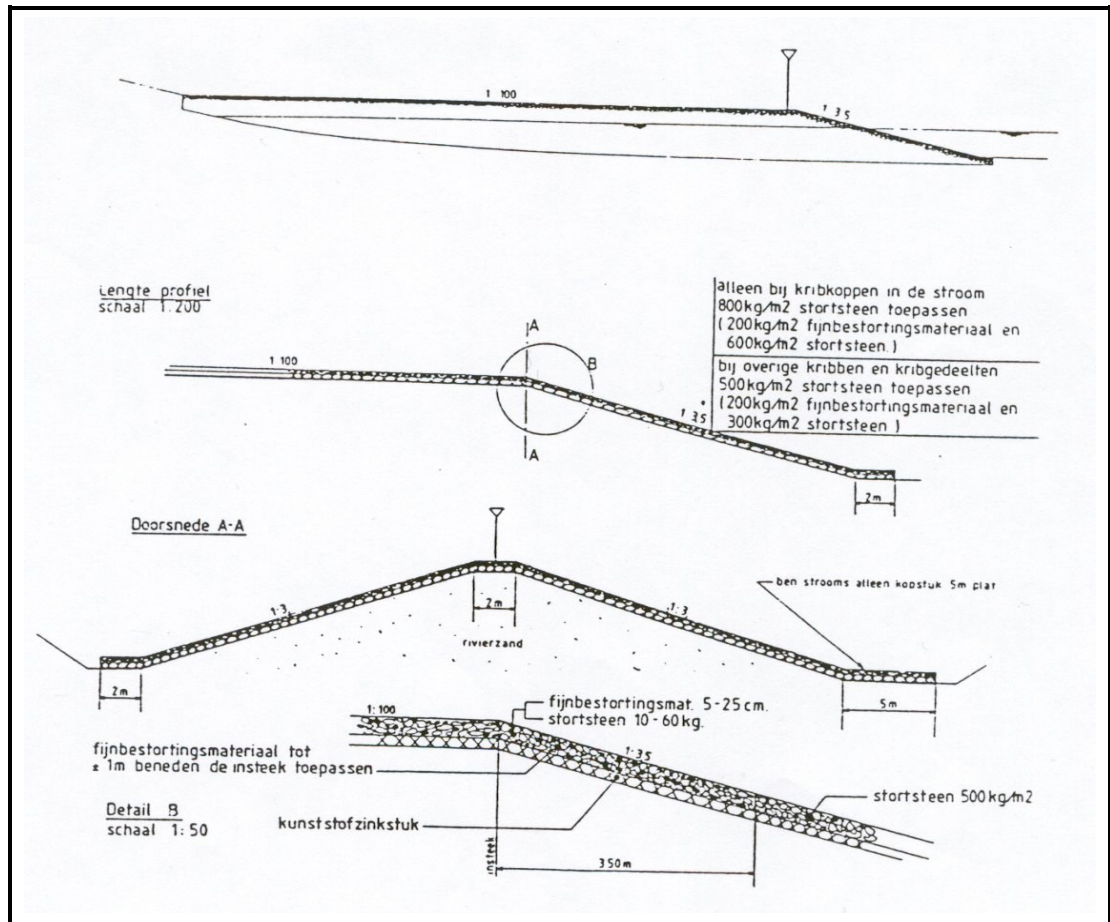


Figuur 2.1 Definitieschetsen

In de figuren 2.2 en 2.3 zijn schematisch doorsneden getoond van een stortkrib en een zetkrib. De werkelijke afmetingen kunnen afwijken van de maten in deze figuren. Innovatieve kribontwerpen zoals palenrijen zijn in het kader van deze studie niet beschouwd. Bij een ontwerp van een palenrij kan de ijsbelasting maatgevend zijn. Soms wordt aangenomen dat de frequentie van voorkomen van een maatgevende ijsbelasting zo klein is dat eventuele schade door ijsbelastingen wordt geaccepteerd.



Figuur 2.2 Principe zetkrib



Figuur 2.3 Principe stortkrib

3 Vormgeving van kribben versus ijsdammen en ijsafvoer

3.1 Inleiding

De vorming van ijsdammen in rivieren kan leiden tot een significante verhoging van de waterspiegel door opstuwing. Enerzijds wordt dit veroorzaakt door verhoging van de hydraulische ruwheid (de verlaagde Chézy-waarde bedraagt circa 75 à 90% van de ruwheid zonder ijs). Anderzijds, speelt ook de afname van de hydraulische straal een belangrijke rol. Deze kan immers orde 2 maal zo klein worden met als gevolg dat bij gelijkblijvend debiet het verhang over een ijsdam sterk toeneemt. De opstuwing kan 1 tot 2 meter bedragen, en in Nederland is een maximale opstuwing van 4 m waargenomen.

Het is dus zaak de vorming van ijsdammen in de Nederlandse rivieren tegen te gaan. De invloed die kribben hierop kan spelen is onderwerp van dit hoofdstuk. De belasting door ijs op een krib komt in hoofdstuk 5 aan de orde.



Figuur 3.1 Ijs op de Maas nabij Hedel, scheepvaart is niet meer mogelijk (januari 1997)

3.2 Ontstaan van ijsdammen

Afvoer van ijsschollen is een belangrijke voorwaarde om ijsdammen te voorkomen. Uit de literatuur blijkt dat locaties waar ijsdammen optreden als gemeenschappelijk kenmerk hebben de reductie van het ijstransporterend vermogen van de rivier. Ijsschotsen hebben de neiging te accumuleren in gebieden waar het waterspiegelverhang in lengterichting afneemt en waar dus de stroomsnelheid afneemt (Frankenstein en Wuebben, 1992). Dit zijn gebieden waar de rivier een grotere rivier of een meer instroomt, in getijdengebieden, voor (gesloten) stuwen, bij sterke rivierbochten of ter plaatse van riviersplitsingen of nevengeulen. In (sterke) rivierbochten speelt dan de middelpuntvliedende kracht ook een rol: het ijs wordt de buitenbocht in gedwongen en kan daar accumuleren, aangezien de effectieve transporterende breedte vermindert (Zufelt & Sun Zhao-Chu, 1988).

Locaties waar zich obstakels in de rivier bevinden (brugpijlers, zandbanken, zomerkades, kribben etc) reduceren ook de ijsafvoer (Termes & Boogaard, 1991). Merk hierbij op dat dit een zichzelf versterkend proces is, immers het “obstakel” wordt groter naarmate er meer ijs op vastloopt.

Ook op plaatsen waar sterke gradiënten/variëaties in dwarsprofiel dimensies (breedte en diepte) aanwezig zijn kan ijsdamvorming optreden; bijvoorbeeld: profielvernauwingen (obstakels) en profielverbredingen (stroomsnelheidsafname) (Frankenstein en Wuebben, 1992).

Vervolgens zijn potentiële ijsdam locaties die plaatsen waar grote hoeveelheden drijfijz op de rivier aanwezig zijn. Als de ijsconcentratie (= bezetting van het wateroppervlak door ijs) groter is dan 80% raakt drijfijz vast en ontstaat er een stagnant dek.

Tenslotte is een ijsdam snel gevormd op plaatsen waar het water ondiep is (Zongfu, 1992). In de Nederlandse situatie betekent dit in het hart van een kribvak.

Bij het ontstaan van ijsdammen spelen de volgende aspecten ook een belangrijke rol (Termes & Boogaard, 1991):

- windinvloed: Wind heeft grote invloed op het transport en richting van het drijfijz. In stromende delen zal de stroming dominant zijn, maar in meer stroomluwe delen zal de invloed van wind de overhand krijgen. Als de wind tegen de stromingsrichting in beweegt dan is een ijsdam snel gevormd (Zongfu, 1992).
- normalisatie/regulering: Normalisatie en regulering heeft er toe geleid dat veel obstakels en onregelmatigheden in de rivier zijn verwijderd, waardoor variaties in de afvoercapaciteit van drijfijz sterk zijn gereduceerd.
- verhoging temperatuur: Niet uniforme dooi, bijvoorbeeld door lokale toevoer van warm (koel)water of op grotere schaal door geografische temperatuursverschillen, kan lokaal eerder tot ijsopbreken leiden.
- capaciteit zomerbed: Als vorst optreedt wanneer de uiterwaarden onder water staan dan zal er veel meer ijs worden gevormd dan wanneer het water alleen in het zomerbed staat.
- Froude-getal: Gebaseerd op een studie van Kivisild in 1959 en op empirische gegevens blijken ijsdammen te ontstaan bij een Froude-getal ($Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}}$) tussen 0,05 en 0,15 en

gemiddeld bij ongeveer 0,08 (zie ook Maas & Roukema, 1991). Als een ijsdam ontstaat dan is het Froude-getal een maat voor de ontwikkeling van een ijsdam. Bij een Froude-getal kleiner dan 0,08 dan groeit de ijsdam in stroomopwaartse richting doordat drijfijis tegen de dam tot stilstand komt. Drijfijis wordt grotendeels onder een ijsdam door getransporteerd als het Froude-getal groter is dan 0,08. In het geval dat drijfijis onder een ijsdam vastraakt (geschiedt ook als het Froude-getal ongeveer 0,08 is) dan neemt het doorstroomprofiel verder af.

- Ontstaanssituatie: Als ijs wordt gevormd bij lage afvoeren dan zal het eerder breken als de afvoeren toenemen. Als ijs wordt gevormd bij hoge afvoeren dan wordt het ijsoppervlak niet snel opengebroken (Zongfu, 1992).
- Ijsruwheid: als de ruwheid van het ijs hoog is dan neemt de stroomweerstand toe en een ijsdam is dan snel gevormd (Zongfu, 1992).

Samenvattend kan uit het bovenstaande worden geconcludeerd dat een over grote afstand gelijkblijvende, enkelvoudige rivierdoorsnede zonder bochten en zonder obstakels zoals bijvoorbeeld brugpijlers, optimaal is voor de afvoer van ijs. Helaas voldoen de Nederlandse Rijntakken hier niet aan, maar kan gegeven de bestaande situatie wel gekeken worden waar knelpunten zich voordoen en of daarvoor een oplossing is.



Figuur 3.2 Ijs op een krib langs de Lek bij Krimpen a/d Lek, januari 1996

3.3 Beïnvloeding ijsdammen door kribben

Op basis van de processen die leiden tot het ontstaan van ijsdammen, kunnen kwalitatieve relaties tussen ijsdammen en kribben worden gelegd. Dit wordt gedaan aan de hand van krib eigenschappen. Het principe hierbij is dat geen stroomvertraging mag optreden of dat er obstakels worden gecreëerd.

De volgende kribparameters zijn relevant (zie ook Figuur 2.1):

- Kriblengte
- Kribhoogte
- Kribkopsteilheid
- Steilheid bovenstrooms talud
- Achterloopsheid
- Ruwheid

Als kribben zijn overstroomd dan zullen andere krib eigenschappen belangrijker zijn dan in de situatie dat kribben niet zijn overstroomd. Beide situaties worden gezamenlijk bekeken. Bij het toenemen van de waterdiepte boven de kribben zal de invloed van de kribben op de ijsafvoer uiteraard afnemen.

Vooraf wordt opgemerkt dat de kribspacing (= afstand tussen kribben) en de hoek die kribben maken met de rivieras relatief grote invloed hebben op de ijsafvoer. Beide parameters worden echter niet verder beschouwd, omdat deze als vaststaand zijn aangenomen.

Kriblengte

Een uitstekende krib, maar ook een te korte krib draagt niet bij aan een gelijkblijvende doorsnede en is als zodanig dus minder gunstig. Een uitstekende krib beïnvloedt ook de lokale morfologie, en kan zorgen voor sterke ontgrondingen rond de kribkop. Deze sterke dieptegradiënten zijn ongewenst, omdat daardoor de kribkop kan versteilen en uiteindelijk schade kan ontstaan.

Door het goed uitlijnen van kribben/kribkoppen wordt een hoofdgeul gerealiseerd die uniform van breedte is.

Hoewel dus de kribafstand niet ter discussie staat wordt wel opgemerkt dat een te grote afstand leidt tot sterke uitwaaiering van de scheidingsstroomlijn en de introductie van sterke breedtegradiënten. De onderlinge kribafstand dient ook uniform te zijn.

In buitenbochten zou de kribafstand kleiner moeten zijn of de kribvakken zouden door langsdammen volledig moeten worden dichtgezet om accumulatie van schotsen te voorkomen. Ook kan het verflauwen van een rivierbocht, bijvoorbeeld door het verkorten van de kribben in de binnenbocht en verlengen van de kribben in de buitenbocht, zorgen voor minder sterk naar buiten gerichte radiale krachten en vergroting van de effectieve ijstransporterende breedte.

Tenslotte wordt voor de volledigheid opgemerkt dat kribben die niet haaks op de stroming staan, maar iets in de stroomrichting zijn gelegd de uitstroom van water bevorderen en dus ook de uitstroming van in het kribvak geaccumuleerde ijsschotsen.

Kribkopsteilheid

Het streven naar een uniforme rivierbreedte om de kans op ijsdamvorming tegen te gaan houdt ook in dat de steilheid van de kribkoppen uniform in langsrichting behoort te zijn en gehandhaafd dient te worden. De vraag is dan of de huidige kribkophelling daarbij de meest optimale is.

In WL verslag Q2360 (Verheij, 1997) is bepaald dat bij een flauwere kribkophelling de ontgrondingen rond de kribkop afnemen en dat bij een kribkophelling van 1:10 er (vrijwel) geen ontgrondingen meer zullen plaatsvinden. Een flauwere kribkophelling zal derhalve sterke dieptegradiënten verminderen en de kans op ijsdammen verminderen. Dit is dus gunstig.

Dit is van belang omdat in het kader van Ruimte voor de Rivier één van de ideeën is de kribkoppen te verflauwen, zodat de MHW waterstanden lager worden, en dit komt dus tegemoet aan die gunstige werking. Echter, ook zal de intensiteit van de menglaag rond de kribkoppen afnemen en dus ook de turbulentiegraad van het water aldaar. Dit kan juist mogelijk de vorming van ijs op deze locaties versnellen. Door de turbulente stroming zullen ijsschotsen vermoedelijk een meer chaotische weg afleggen. Het verminderen van de turbulentie kan daardoor ook leiden tot een soepelere afvoer van ijsschotsen.

In rivierbochten neemt de effectieve transporterende breedte af doordat ijsschotsen door de spiraalstroming de buitenbocht in worden geduwd. Het verflauwen van het kribkoptalud in de buitenbocht zonder het dwarsprofieloppervlak te wijzigen, leidt tot een grotere breedte op het waterniveau. Dit kan het transport van ijsschotsen in bochten verbeteren.

Kribniveau

Het kribniveau speelt alleen een rol bij afvoeren boven kruinniveau. Dan geldt dat de hoogte van achtereenvolgende kribben gestroomlijnd moet zijn, dwz: de lijn door de kruinhoogten van opeenvolgende kribben moet ongeveer evenwijdig lopen aan de gemiddelde bodemhelling van de rivier in langsrichting. Sterke gradiënten in hoogte moeten dus worden vermeden. Dit wil zeggen dat ook in het verticale vlak kribben dienen te worden uitgelijnd. Tevens houdt dit in dat te grote schade aan individuele kribben vermeden moet worden.

Hellingshoek bovenstrooms talud

De bovenstroomse hellingshoek van het kriblichaam kan een obstructie zijn voor de afvoer van ijs. Een flauwer talud zal zorgen voor een vloeiende stroomgeleiding. Ook een geleidelijke versteiling van het bovenstroomse talud, of toepassing van een berm waardoor een overgang ontstaat van een horizontaal deel naar een talud, is minder gunstig voor de afvoer van ijs.

In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op belastingen op kribben door ijs en wordt vermeld dat onregelmatige en steile hellingen de neiging versterken tot ophopen (pile-up) van ijsschotsen die over het talud schuiven. Dit pleit voor een flauw en egaal boven- en benedenstrooms talud. Hoewel dit het schuiven van ijsschotsen over het talud vereenvoudigt, is het verminderen van de kans op een ophoping belangrijker om de kans op vorming van de ijsdammen te verminderen dan de kans op schade (die namelijk groot is als ijsschotsen worden gedwongen onder een ophoping hun weg te vervolgen).

Ruwheid kriboppervlak

Een gladde krib kent een relatief lage hydraulische ruwheid. Hierdoor ondervindt de stroming minder weerstand en daardoor vermindert de kans op ijsdamvorming. Een zetkrib is in dit verband gunstiger dan een stortkrib.

Zo weinig mogelijk vegetatie is dus gunstig, maar strijdig met een eventuele natuurfunctie.

Echter, Sodhi et.al (1983) concludeert op basis van proeven dat het schuiven van ijs op een helling wordt bevorderd door een glad oppervlak, omdat dan de benodigde krachten laag zijn voor een continue opwaartse beweging van een ijsplaat. Bij een ruw oppervlak zijn juist grote krachten nodig en zal eerder ophopen optreden. Het vermijden van een ruw oppervlak lijkt dus gunstig.

Achterloopsheid

Optimaal voor de rivierafvoer is een enkelvoudige geul. Bij achterloopsheid van een krib kan zich een nieuwe geul ontwikkelen en is dus niet langer sprake van een enkelvoudig geulsysteem. Overigens wordt de kans vrijwel uitgesloten geacht dat in de Nederlandse situatie zich daadwerkelijk een geul ontwikkelt. Een dergelijke geul bij het worteleind van de krib kan worden vergeleken met een nevengeul. Door Wijbenga (1993) is onderzocht wat de relatie is tussen nevengeulen en ijs. Hij concludeert dat nevengeulen niet resulteren in een grotere kans op de vorming van ijsdammen.



Figuur 3.3 Kruiend ijs op de Noorder IJ- en Zeedijk nabij Edam, december 1996

3.4 Conclusies en kennisleemten

Voor zover bekend komt in de literatuur de relatie tussen kribben en ijsafvoer c.q. ijsdamvorming niet aan de orde anders dan in algemene zin dat een enkelvoudige, gestroomlijnde geul moet worden nagestreefd. Algemene overzichten van de relevante

processen worden al in literatuur gepresenteerd vanaf jaren '60 in de vorige eeuw. De nieuwere literatuur voegt hier nauwelijks iets aan toe.

Gegeven deze beperkte literatuur informatie is daarom nagegaan welke kribparameters een rol spelen bij de afvoer van ijs. Dit zijn:

- Kriblengte
- Kribkopsteilheid
- Kribhoogte
- Ruwheid
- Steilheid bovenstrooms talud
- Achterloopsheid

Voorkomen moet worden dat het ijstransporterend vermogen van de rivier afneemt en dat betekent: geen afname waterspiegelverhang (want afname van de stroomsnelheid), geen sterke rivierbochten, geen obstakels in de rivier en geen sterke gradiënten/variaties in dwarsprofiel (breedte en diepte). Op het moment dat kribben bijdragen aan bovenstaande situaties wordt de kans op het vormen van ijsdammen gereduceerd.

De volgende aspecten in relatie tot kribparameters zijn dan van belang:

- Correcte lengte kribben: uitlijnen (met andere kribben) en voorkomen van uitstekende of terugliggende kribben;
- zo laag mogelijke kribhoogte, kribhoogte uitlijnen (met andere kribben) en schade aan kribben voorkomen.
- Zo flauw mogelijke kribkop, schade aan de kribkop voorkomen en de helling van de kribkoppen aan één oever zo min mogelijk variëren.
- Zo flauw mogelijk bovenstrooms kribtalud.
- zo laag mogelijke ruwheid kriboppervlak (verwijderen vegetatie en andere obstakels op de krib).

Voor de volledigheid wordt vermeld dat ook positief bijdragen:

- kribben meer in de richting van de stroming leggen;
- voorkomen van grote onderlinge lengteverschillen van kribvakken;
- kribafstand in de buitenbocht verkorten.

Zoals uit het bovenstaande blijkt is er geen kwantitatieve informatie beschikbaar. Duidelijke kennisleemten zijn:

- Wijze waarop ijsschotsen zich in een kribvak verplaatsen en het kribvak weer verlaten.
- Interactie tussen ijs in de hoofdgeul en in kribvakken (kribvak te beschouwen als een soort nevengeul?).
- Wijze waarop kribben kunnen bijdragen aan ijsdamvorming in scherpe rivierbochten, aangezien veel ijsdammen in rivierbochten ontstaan.
- Optimale steilheid (dwz hoe flauw) van kribkoptaluds.

Om hier inzicht in te krijgen kan worden overwogen om met een meerdimensionale berekening (WAQUA, DELFT2D) de stroomsnelheidsgradiënten in kaart te brengen en op basis daarvan potentiële knelpunten voor het vormen van ijsdammen in kaart te brengen. Deze gegevens kunnen ook worden gekoppeld aan historische observaties en leiden tot een dieper inzicht in het ontstaan van ijsdammen.

Wat betreft de steilheid van het kribkoptalud zal een detailmodel noodzakelijk zijn.

Ervaring met ijs en ijsdammen in rivieren is vooral te vinden in Noord-Scandinavië, Canada en Oost-Europa. Voorzover vergelijkbare omstandigheden optreden kan overwogen worden contact te leggen met de belangrijkste onderzoeksinstanties daar. Voor de Nederlandse rivieren zijn de ervaringen met schade door ijs aan kribben misschien beschikbaar bij de regionale beheerder. In het kader van deze studie is hier geen navraag naar gedaan. Wel beschikbaar zijn een aantal foto's en daaruit blijkt dat schade door ijs optreedt.

Op basis van het voorgaande wordt geconcludeerd dat de huidige vormgeving van kribben verbeterd kan worden gezien het optreden van schade, maar dat het belang daarvan beperkt is in het licht van de frequentie van voorkomen van ijs en ijsdammen (orde 1x per 16 jaar).

4 Effecten van ijsdammen op rivieraafvoer en morfologie

4.1 Inleiding

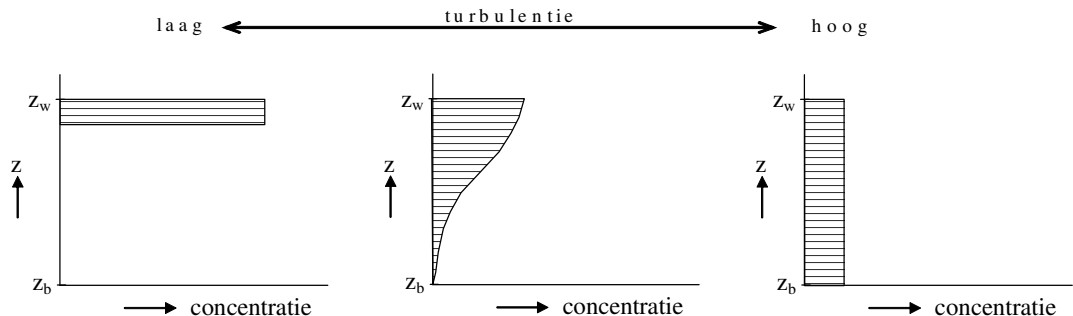
Ondanks alle voorzorgen om de vorming van ijsdammen te voorkomen, kan toch een ijsdam ontstaan. Het voorliggende hoofdstuk verkent de invloed van een ijsdam op de afvoer van water en het gedrag van de bodem (sedimentatie en erosie). Daartoe gaat Paragraaf 4.2 eerst in op de vloeistofeigenschappen van het water nabij het vriespunt. Vervolgens behandelt Paragraaf 4.3 de waterbeweging en Paragraaf 4.4 het sedimenttransport en de morfologische veranderingen. In Paragraaf 4.5 worden tenslotte de resterende kennisleemten samengevat.

4.2 Vloeistofeigenschappen van water nabij het vriespunt

De waterbeweging en het sedimenttransport worden beïnvloed door vloeistofeigenschappen als massadichtheid en viscositeit. Wanneer water afkoelt, neemt de massadichtheid enigszins toe. Beneden 4°C zet het water echter juist weer uit, waardoor de massadichtheid bij afkoeling juist afneemt. Ook is de massadichtheid van ijs door zijn kristalstructuur kleiner dan die van water. Daardoor zinkt ijs niet naar de bodem, maar drijft het op het wateroppervlak. Dit drijven is op zich van groot belang, maar verder zijn de verschillen in massadichtheid slechts gering. De verschillen in kinematische viscositeit zijn veel groter. Bij een temperatuur van 20°C bedraagt de kinematische viscositeit van water $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, terwijl deze bij een temperatuur van 0°C wel $1,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ bedraagt. Rond het vriespunt zijn waarden van het Reynoldsgetal derhalve slechts circa 55% van de waarden bij 20°C . Koud water is daardoor minder turbulent. Ook zijn daardoor de valsnelheden van de fijnere sedimentdeeltjes, waarvoor de formule van Stokes geldt, rond het vriespunt slechts 55% van de valsnelheden bij 20°C .

De vloeistofeigenschappen worden ook beïnvloed door zwevend heusijs of sponsijs (*frazil ice*). Dit ontstaat door de vorming van ijskristallen rond zwevend transport, in beginsel over de hele diepte van de rivier. Omdat het lichter is dan vloeibaar water, heeft het de neiging naar het oppervlak te bewegen. Dit wordt echter tegengewerkt door de turbulentie, die de neiging heeft het sponsijs gelijkmatig over de hele diepte te verdelen. De resulterende verdeling over de verticaal hangt daardoor af van de mate van turbulentie in de rivier. Figuur 4.1 illustreert dit. In stilstaand water drijft het sponsijs aan de oppervlakte. Bij toenemende turbulentie wordt het sponsijs steeds gelijkmatiger over de verticaal verdeeld. Er is in feite een analogie met de verdeling van zwevend sedimenttransport over de verticaal, met het verschil dat de grootste concentratie sponsijs niet aan de bodem maar aan het wateroppervlak optreedt. Tsang (1988) presenteert een theorie waarmee de concentratieverdeling van sponsijs bepaald kan worden. Hammar (1994) presenteert een 2-DV numeriek model voor de ontwikkeling van sponsijs in open waterlopen, met een k - ϵ formulering voor de turbulentie. Shen et al (1988) beschrijven de vorming van een ijsdek wiskundig aan de hand van de uitwisseling tussen het ijsdek en een onderliggende laag

geaccumuleerd sponsijs. Het is aannemelijk dat langs de bodem meegevoerd sponsijs invloed heeft op het bodemtransport en de vorming van ribbels en duinen, maar daarover is verder weinig bekend.



Figuur 4.1: Verticale concentratieverdeling van sponsijs bij verschillende mate van turbulentie.

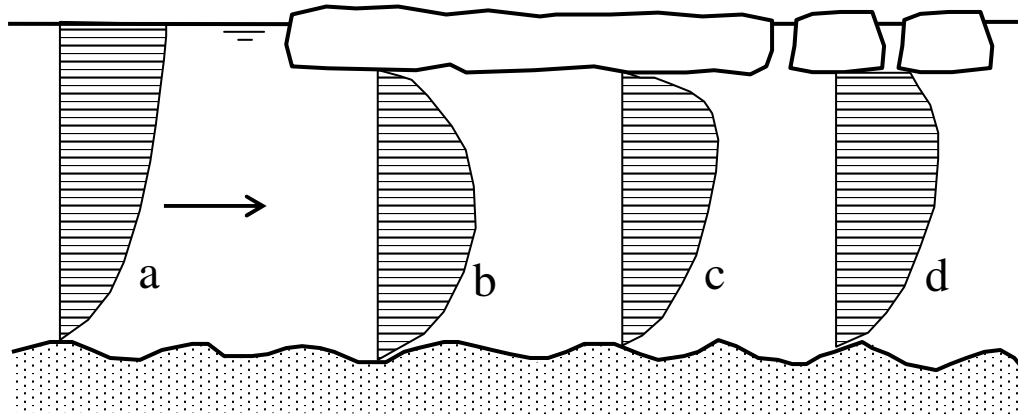
4.3 Invloed van ijsdammen op waterbeweging

Een ijsdek of een ijsdam heeft in beginsel twee effecten op de waterbeweging. Het verkleint het doorstroomprofiel door een deel van de waterdiepte in beslag te nemen en het levert een extra weerstand tegen de stroming door wrijving aan de bovenzijde van de waterkolom. Voor lokale stromingen onder ijs is de verkleining van het doorstroomprofiel het dominante effect. De wrijving is dan te verwaarlozen. De stroming onder een plaatselijk ijsdek kan worden behandeld analoog aan de stroming door een kunstwerk met onderafvoer, met het verschil dat ijs door de werking van de stroming in de loop van de tijd een andere vorm kan aannemen.

Voor grootschalige stromingen onder ijs is de extra stromingsweerstand het dominante effect. De dikte van het ijsdek is dan te verwaarlozen. De invloed van de extra stromingsweerstand wordt kwalitatief geïllustreerd in Figuur 4.2. In open water wordt de weerstand nagenoeg uitsluitend aan de bodem geleverd. De verticale verdeling van stroomsnelheden verloopt daardoor van nul aan de bodem tot een maximum nabij het wateroppervlak (a). Zouden bodem en ijsdek dezelfde ruwheid hebben, dan zou een symmetrisch stroomsnelheidsprofiel ontstaan met een maximum ter hoogte van de halve waterdiepte (b). Doorgaans is het ijs echter minder ruw dan de bodem. Het maximum komt daardoor hoger te liggen (c). Als het ijsdek niet vast is maar beweegt, lopen de stroomsnelheden aan het oppervlak niet terug tot nul (d).

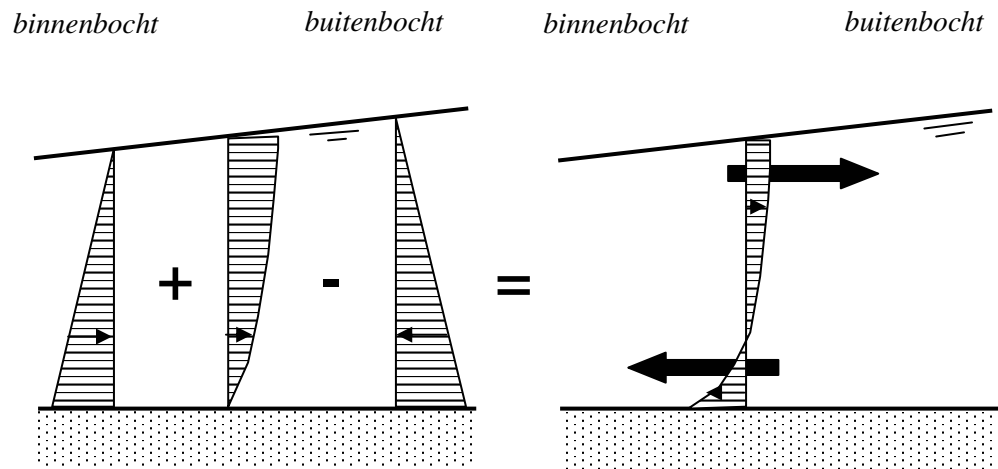
De structuur van de stroming onder een ijsdek kan ertoe leiden om een tweelagenhypothese te hanteren, waarbij het stromende water wordt verdeeld in twee lagen met een scheidingsvlak ter hoogte van het stroomsnelheidmaximum. De onderste laag kan dan behandeld worden als een open waterloop op zich. Hetzelfde geldt voor de bovenste laag, maar dan met de onderkant boven. Deze hypothese geeft echter problemen wanneer men een mengweghypothese toepast voor de bepaling van de turbulente viscositeit, omdat de analogie met twee gestapelde open waterlopen ertoe leidt dat de mengweglengte ter plaatse van het scheidingsvlak gelijk is aan nul. Dit druist in tegen de fysische interpretatie die aan

de mengweglengte wordt gegeven. Daarom is het beter om de stroming te berekenen met een 2-DV model inclusief een model voor de turbulentie. Lau & Krisnappan (1981) doen dit met een k - ϵ -formulering. Verder simuleren Yapa (1983) en Shen & Yapa (1984) een instationaire stroming onder een ijsdek.

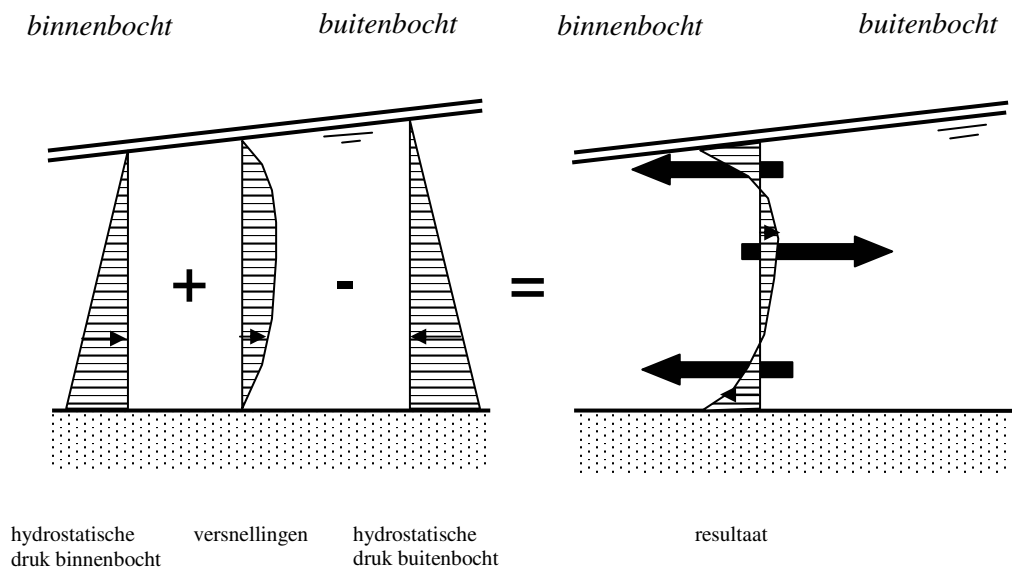


Figuur 4.2: Voorbeelden van verticale verdelingen van de stroomsnelheid: (a) in open water, (b) onder een vast ijsdek dat even ruw is als de bodem, (c) onder een vast ijsdek dat gladder is dan de bodem, en (d) onder een los ijsdek.

De gewijzigde verticale verdeling van de stroomsnelheid leidt ertoe dat ook de spiraalstroming in rivierbochten onder een ijsdek wezenlijk anders is dan in open water. Dit kan worden verklaard aan de hand van de verschillen tussen Figuur 4.3 voor open water en Figuur 4.4 voor stroming onder een ijsdek. In beide gevallen leiden middelpuntsvliedende krachten ertoe dat water tegen de oever in de buitenbocht wordt opgestuwd. In beide gevallen ontstaat door het resulterende verschil in waterstand ook een drukgradiënt die uniform over de verticaal verdeeld is. Deze drukgradiënt volgt in de figuren uit het verschil tussen de driehoekige drukverdeling rechts en de driehoekige drukverdeling links. De in het midden aangegeven verdeling van de middelpuntsvliedende krachten over de verticaal is echter verschillend. In open water bevindt de maximale middelpuntsvliedende kracht zich aan het wateroppervlak, omdat daar de stroomsnelheid het hoogst is. Onder een ijsdek bevindt het maximum zich echter lager in de waterkolom en is de middelpuntsvliedende kracht aan het oppervlak gelijk aan nul. De stroming aan het oppervlak is daardoor in open water naar de buitenbocht gericht en in water onder een ijsdek naar de binnenbocht. De stroming aan de bodem is in beide gevallen naar de binnenbocht gericht. Het gevolg is dat in open water een enkele spiraalstroom ontstaat en onder een ijsdek een dubbele spiraalstroom bestaande uit twee tegengestelde circulaties. Tsai & Ettema (1994) vermelden dat dit verschijnsel al lang bekend is, niet alleen voor stroming onder ijs maar ook voor stroming in gesloten leidingen. Omdat het water onder een ijsdek trager stroomt, is de middelpuntsvliedende kracht er kleiner dan in open water. Het gevolg is dat ook de dwarsverhangen en spiraalstroomsnelheden onder een ijsdek kleiner zijn.



Figuur 4.3: Het ontstaan van een enkele cel van spiraalstroming in open water.



Figuur 4.4: Het ontstaan van een dubbele cel van spiraalstroming onder een ijsdek.

Een belangrijke parameter is de hydraulische ruwheid van het ijsdek. Onder het ijsdek kunnen zich ribbels vormen, ongeveer net als bij een alluviale bodem. Verder ontstaat ruwheid door ondergedoken ijsschollen, de aangroei van sponsijs en andere onregelmatigheden. Van Bendegom (1975) vermeldt dat het ijsdek vrij glad zal zijn als het Froude-getal een eindweegs onder 0,08 ligt. Is het Froude-getal belangrijk groter dan 0,08, dan zullen ijsschotsen onderduiken en kantelen en daardoor een zeer ruw oppervlak geven.

In aanwezigheid van een ijsdek veranderen ook de beddingvormen aan de bodem en de daarmee samenhangende bodemruwheid. De stromingsweerstand in een rivier met ijs hangt dus niet alleen af van de ruwheid van het ijs, maar ook van de door het ijs veroorzaakte verandering in de ruwheid van de bodem. Smith & Ettema (1997) vinden experimenteel dat duinen onder een ijsdek vlakker en langer worden. Tsai & Ettema (1994) vinden daarentegen iets kortere duinen onder het ijsdek. De vergelijking is overigens niet helemaal zuiver, omdat de stroomsnelheden in de situaties met en zonder ijsdek verschillend waren.

De hydraulische ruwheid van ijs wordt onder meer behandeld door Larsen (1973), Uzuner (1975), Majewski et al (1988) en Arisz et al (1988). Majewski et al vinden voor de rivier de Vistula waarden van 0,02 à 0,03 voor *Manning's n* aan de bodem en waarden rond 0,08 met uitschieters tot 0,15 voor *Manning's n* van het ijsdek. Uit laboratoriumproeven met een gesimuleerd ijsdek vinden Arisz et al waarden van 0,04 à 0,06 voor de samengestelde *Manning's n* voor bodem en ijsdek.

Voor MHW-omstandigheden op de Nederlandse Rijntakken kan de waarde van 0,08 van Majewski et al geïnterpreteerd worden als een extra Chézy-ruwheid van $17 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ van het ijs boven een Chézy-ruwheid van $45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ aan de bodem. Volgens de regel dat Chézy-ruwheden gecombineerd worden door sommatie van hun reciproke kwadraten ($1/C_{\text{totaal}}^2 = 1/C_1^2 + 1/C_2^2$), volgt hieruit een totale Chézy-ruwheid van $16 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. Bij gelijkblijvende afvoer en rivierverhang komt dit overeen met een vergroting van de waterdiepte met een factor $(45/16)^{2/3} = 2$. Onder MHW-omstandigheden staat het water 4 à 5 m boven het winterbed en 10 à 12 m boven het zomerbed. Uitgaande van een gemiddelde waterdiepte van 6 m verhoogt het ijsdek dan de waterstanden met nog eens 6 m. Die verhoging wordt uiteraard niet bereikt, omdat de dijken ruim voor die tijd overstromen.

Als de laboratorium waarden van Arisz et al worden toegepast dan is de verhoging van de waterstanden minder, maar dat betreft dus resultaten van laboratoriumonderzoek. Bovendien wordt de vertaling van de resultaten volgens Majewski bevestigd door bevindingen tijdens de ijsperiode in 1963 (WL/Rand, 1993).

4.4 Invloed van ijsdammen op sedimenttransport en morfologie

De valsnelheden van sedimentdeeltjes in koud water zijn kleiner dan in warm water, omdat het koude water viskeuzer is. Het gevolg is dat koud water meer zwevend sediment transporteert. Bodemtransport heeft een nauwe relatie met de duinen die op de rivierbodem ontstaan. Deze duinen bepalen op hun beurt de alluviale ruwheid en daarmee weer de sterkte van de stroming en het bijbehorende bodemtransport. Smith & Ettema (1997) vinden experimenteel dat duinen onder een ijsdek vlakker en langer worden. Tsai & Ettema (1994) vinden daarentegen iets kortere duinen onder het ijsdek. De vergelijking is overigens niet helemaal zuiver, omdat de stroomsnelheden in de situaties met en zonder ijsdek verschillend waren. Voor de berekening van bodemtransport wordt wel de in Paragraaf 4.3 genoemde tweelagenhypothese toegepast. In ieder geval is de bodemschuifspanning onder ijs kleiner, omdat een deel van de stromingsweerstand door het ijs wordt geleverd en omdat de resulterende stroomsnelheden kleiner zijn. Er is derhalve onder ijs minder bodemtransport. Het is overigens aannemelijk dat langs de bodem meegevoerd sponsijs invloed heeft op het bodemtransport en de vorming van ribbels en duinen. Sedimenttransport onder ijs wordt onder meer behandeld door Krishnappan (1983), Lau & Krishnappan (1985) en Sayre &

Song (1979). Deze werken zijn in het kader van deze studie niet diepgaand bestudeerd. Het algemene beeld dat oprijst, is echter dat in feite nog zeer weinig bekend is van het sedimenttransport en de beddingvormen onder ijs.

Termes (1991) vermeldt dat aan de bodem grondijs rond zandkorrels kan ontstaan. Dit ijs kan enerzijds zand doen opdrijven en anderzijds juist de bodem afschermen voor erosie.

Bij de beoordeling van de morfologische reactie op een ijsdek of ijsdam laten zich verschillende schaalniveaus onderscheiden. De *megaschaal* betreft de ontwikkeling van het bodemlengteprofiel. Omdat deze zich ontwikkelt op tijdschalen die veel langer zijn dan een enkele vorstperiode, is alleen de initiële fase van belang. Figuren 4.5 en 4.6 geven de ontwikkeling in die initiële fase kwalitatief weer. Het ijs verhoogt de waterstanden in de vorm van een M2-stuwkromme in het ijstraject en een M1-stuwkromme bovenstrooms daarvan. Daardoor wordt ook het verloop langs de rivier van de stroomsnelheid (u) en de stroomsnelheidsgradiënten (du/dx) niet-uniform. Volgens het Principe van Exner zijn de snelheden van erosie en sedimentatie evenredig met de snelheidsgradiënt, maar tegengesteld van teken:

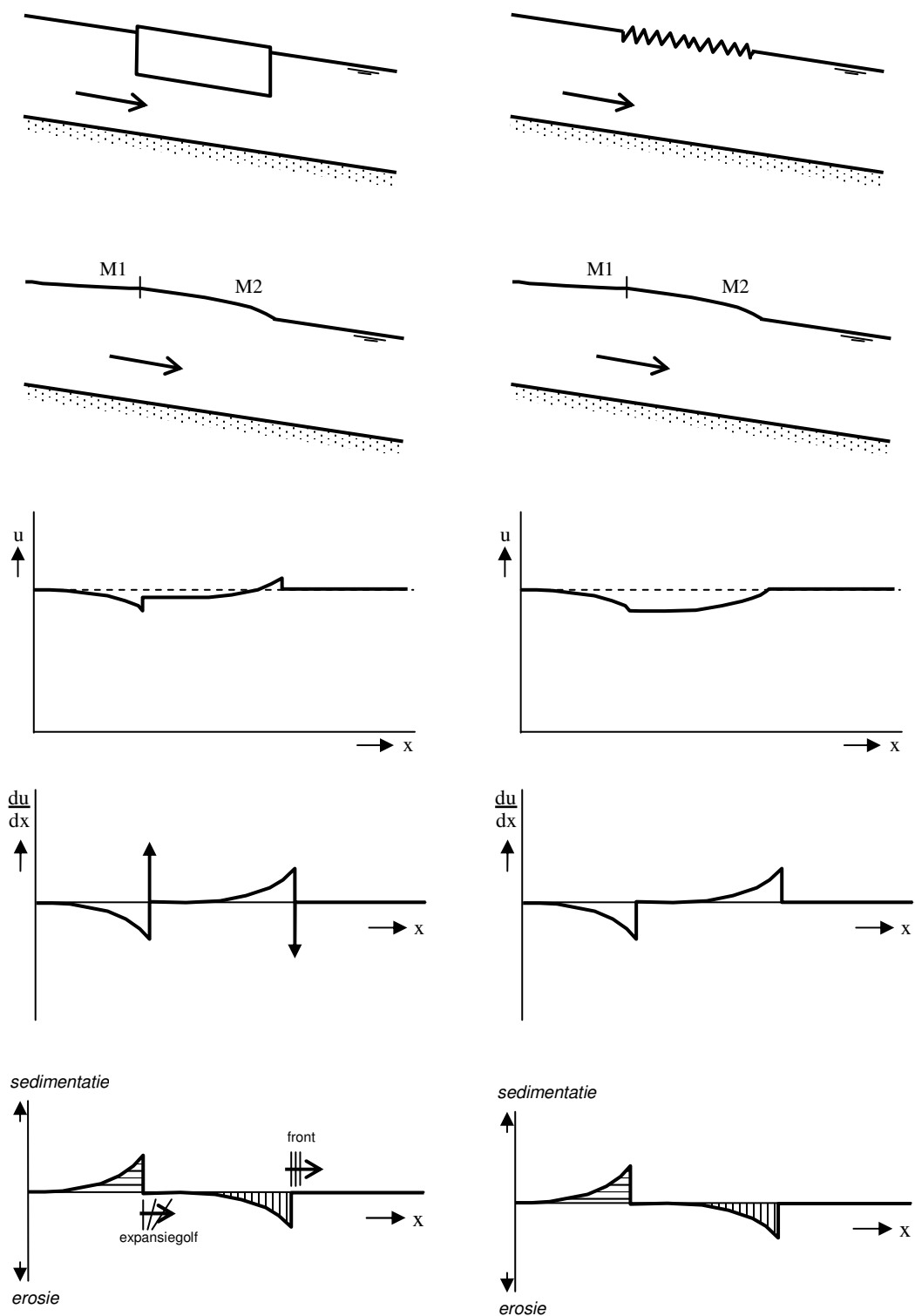
$$\frac{dz_b}{dt} = -\alpha \frac{du}{dx} \quad \text{met} \quad \alpha = \frac{ds}{du} \quad (4.1)$$

De parameter α is een eigenschap van een sedimenttransportformule. Formule 4.1 kan eenvoudig worden afgeleid uit de sedimentbalans en een algemene vorm van de transportformule. Het principe van Exner houdt in dat bij versnellen erosie optreedt en bij vertragen sedimentatie.

Ter plaatse van discontinuïteiten in het snelheidsverloop langs de rivier ($du/dx = \pm\infty$) worden bodemgolven opgewekt, die zich voor erosie met een geleidelijk flauwere helling uitbreiden maar voor sedimentatie een steil front behouden. Figuur 4.5 richt zich op het aspect dat het ijs de doorstroomopening verkleint en Figuur 4.6 op het aspect dat het ijs hydraulische ruwheid toevoegt. In werkelijkheid treden beide aspecten gecombineerd op, maar kan soms, afhankelijk van de situatie, een van beide aspecten verwaarloosd worden ten opzichte van de andere.

De ruwheid geeft alleen aan de stroomafwaartse zijde van het ijsdek aanleiding tot erosie, maar de verkleining van het doorstroomprofiel daarnaast ook nog sedimentatie aan de stroomopwaartse zijde, vanwege de discontinuïteit in het verloop van de stroomsnelheid.

De *macroschaal* betreft de ontwikkeling van banken en bochtprofielen. De invloed die ijs hierop heeft kan aan de hand van twee typen analyses worden beoordeeld. Het eerste type is een niet-lineaire axiaalsymmetrische analyse waarmee het theoretische dwarsprofiel in oneindig lange rivierbochten bepaald kan worden. Hierin hangt de bodemdwarshelling onder meer af van de intensiteit van de spiraalstroming. Omdat de dubbele spiraal onder ijs zwakker is dan de enkele spiraal in open water, zal de bodemdwarshelling onder ijs ook kleiner zijn. Dit komt overeen met een conclusie van Tsai & Ettema (1994).



Figuur 4.5: Initiële respons van het bodem lengteprofiel op een verkleining van het doorstroomprofiel door een ijsdek.

Figuur 4.6: Initiële respons van het bodem lengteprofiel op een vergroting van de ruwheid door een ijsdek.

Het tweede type is een lineaire stabiliteitsanalyse. Deze wordt eveneens door Tsai & Ettema (1994) uitgewerkt. Ze verwijzen daarbij naar het oorspronkelijke werk van Struiksmā et al (1985) en de latere werken van Johanneson (1988) en Odgaard (1989), waarbij ze uiteenzetten dat het bankenpatroon in een 2-DH bodemtopografie in essentie begrepen kan worden als een traagheid-veer-dempersysteem, beschreven door een gewone tweede-orde differentiaalvergelijking. In de verdere uitwerking sluiten ze aan bij de theorie van Odgaard (1989). Tsai & Ettema (1994) concluderen dat de aanwezigheid van een ijsdek het morfologische systeem dempt. Deze conclusie moet echter met de nodige voorzichtigheid benaderd worden. Een ruwe eerste analyse van de theorie van Struiksmā et al (1985) suggereert juist dat de aanwezigheid van een ijsdek leidt tot minder demping van het morfologische systeem. Deze ruwe eerste analyse verloopt als volgt. Neemt men aan dat het ijsdek even ruw is als de bodem, dan halveert de aanpassingslengte voor verstoringen in de verdeling van de waterbeweging over het dwarsprofiel tot:

$$\lambda_{w,ijs} = \frac{1}{2} \lambda_{w,open} = \frac{h_0 C^2}{4g} \quad (4.2)$$

waarin:

h_0 = waterdiepte in afwezigheid van banken (m)

C = Chézy-coëfficiënt voor hydraulische ruwheid ($m^{1/2}/s$)

g = versnelling zwaartekracht (m^2/s)

Gaat men ervan uit dat het bodemtransport en de morfologie beschreven kunnen worden alsof het vrije wateroppervlak zich ter plaatse van het stroomsnelheidsmaximum op de halve waterdiepte bevindt, dan verdubbelen de breedte-diepte-verhouding van het dwarsprofiel en de aanpassingslengte voor verstoringen in de verdeling van de morfologie over het dwarsprofiel.

De auteurs van dit rapport overzien op dit moment niet of deze aanname wel gerechtvaardigd is. Veiligheidshalve wordt daarom aangenomen dat de aanpassingslengte voor de morfologie kan liggen tussen die voor open water en de genoemde dubbele waarde:

$$\lambda_{s,ijs} = (1 \text{ à } 2) \lambda_{s,open} \quad (4.3)$$

De verhouding tussen de twee genoemde aanpassingslengten wordt *interactieparameter* of kortweg *IP* genoemd. Hiervoor volgt uit het voorgaande:

$$IP_{ijs} = \frac{\lambda_{s,ijs}}{\lambda_{w,ijs}} = \frac{(1 \text{ à } 2) \lambda_{s,open}}{\frac{1}{2} \lambda_{w,open}} = (2 \text{ à } 4) IP_{open} \quad (4.4)$$

De hogere waarde van de interactieparameter in de situatie met ijs houdt in dat het 2-DH morfologische systeem volgens de theorie van Struiksmā et al (1985) minder gedempt wordt. Daarmee wordt niet zozeer bedoeld dat de banken hoger worden en de buitenbochten dieper (wat de resultaten van het eerste type analyse zou tegenspreken), maar wel dat een verstoring van de bodem over grotere afstanden banken genereert en ook dat de bodemtopografie eerder omslaat naar een vlechtend patroon, waarbij ook banken in het midden van

het zomerbed optreden. Een grondige analyse ondersteund door 2-DH numerieke berekeningen zou moeten uitwijzen in hoeverre deze voorlopige conclusie gerechtvaardigd is.

Een ongelijke verdeling van het ijs over het wateroppervlak kan ook aanleiding geven tot erosie en sedimentatie. Lokale ophopingen van ijs kunnen de stroming zo afbuigen dat een oever of krib extra wordt belast. Losse ijsschotsen kunnen zich door de enkele spiraalstroomcel in open water ophopen in de buitenbocht en daar lokale ontgrondingen veroorzaken, terwijl de niet-lineaire axiaalsymmetrische analyse hier voor een egaal ijsdek juist aanzanding voorspelt.

De *mesoschaal* betreft de ontwikkeling van duinen en ontgrondingskuilen. Mercer & Cooper (1977, 1984) behandelen de uitschuring van de bodem ten gevolge van de groei van een voorname ijsdam. Tijdens de studie konden deze publicaties niet achterhaald worden door de beperkt beschikbare tijd. Een bespreking ervan door Wuebben (1993) suggereert echter dat Mercer & Cooper meer kijken naar de erosie op megaschaal dan op mesoschaal.

Olssen (2000) onderzocht experimenteel de invloed van een gesimuleerd ijsdek op de lokale ontgroning rond cirkelvormige brugpijlers. Hij vindt dat de ontgrondingsdiepten onder ijs circa 30% groter zijn dan in open water. De ontgrondingsdiepten nemen toe met de ruwheid van het ijsdek.

De *microschaal* heeft tenslotte betrekking op kleine ribbels. Die worden in de context van deze studie niet relevant geacht.

Naast het stromende water kan ook het ijs zelf de bodem uitschuren. Dit gebeurt vooral wanneer kruiend ijs zich zo ver ophoopt dat het de bodem raakt. In de Baggergoot van WL | Delft Hydraulics is hiernaar onlangs vertrouwelijk onderzoek verricht. De opdrachtgever was een oliemaatschappij, die met deze problematiek geconfronteerd werd bij vraagstukken ten aanzien van de benodigde dekking boven een begraven pijpleiding. Dit onderzoek heeft geleid tot nieuwe inzichten, die laten zien dat bestaande richtlijnen op dit gebied aanzienlijke aanpassingen behoeven. Voorlopig zijn de bevindingen dus niet beschikbaar, maar binnen afzienbare tijd zal een soortgelijk onderzoek voor een consortium van oliemaatschappijen (*joint industry project*) worden uitgevoerd. De verwachting is dat dan de resultaten openbaar zullen worden.

4.5 Conclusies

Ten aanzien van waterbeweging en morfologie is met name de erosie van de bodem van belang voor de stabiliteit van kribben. Sedimentatie vormt geen bedreiging. De stroming wordt in het algemeen door een ijsdek juist minder sterk, al kan een ongelijke verdeling van het ijs over het wateroppervlak de stroming lokaal concentreren en daarmee een krib extra belasten.

Op alle schaalniveaus kunnen ijsdammen erosie veroorzaken. Op *megaschaal* leidt een ijsdek tot erosie aan de stroomafwaartse zijde van het ijsdek en in geval van een voldoende dik ijsdek ook aan de stroomopwaartse zijde. Op *macroschaal* wordt erosie weliswaar

afgezwakt doordat de dwarshellingen in rivierbochten kleiner worden, maar het hele patroon van de bodemtopografie verandert onder ijs zodanig dat dieptes kunnen ontstaan op plaatsen waar buiten de vorstperiode banken liggen. Op mesoschaal worden ontgrondingskuilen dieper door de aanwezigheid van een ijsdek.

De hydraulische ruwheid onder ijs, het sedimenttransport onder ijs en de beddingvormen onder ijs vormen essentiële ingrediënten voor kwantitatieve uitspraken over de effecten van ijsdammen op waterbeweging en morfologie. Het blijkt dat hiervan nog maar weinig bekend is. Vooruitgang op dit gebied vraagt om metingen in de rivier (Maas & Roukema, 1991 geven daartoe concrete nadere aanwijzingen). Het Nederlandse onderzoek heeft daarbij de keuze uit het wachten op een strenge winter, waarbij dan wel tevoren een draaiboek voor een intensieve meetcampagne gereed moet liggen, en het uitvoeren van metingen in het buitenland. Daarbij bedenke men dat de winterse omstandigheden vaak hoge eisen stellen aan zowel de meetapparatuur als de mensen die ermee moeten werken.

Daarnaast zou men meer inzicht kunnen krijgen in de reactie van banken en bochtprofielen door de theorie van Struiksma et al (1985) uit te breiden naar situaties met een ijsdek. Door ijsfunctionaliteit in te bouwen in Delft3D, zou men het lineaire model van Struiksma et al (1985) kunnen valideren op basis van de volledige niet-lineaire theorie.

Wat betreft numerieke modellering en laboratoriumonderzoek worden aanbevelingen van Maas & Roukema (1991) onderschreven:

1. Een 2-DH numeriek model valt te prefereren boven verdere detaillering van het 1-D model. Voornamelijk de krachtswerking in ijs kan dan beter ingepast worden. Pas bij zeer goed begrip van de ijsbeweging (duiken van schollen onder een ijsdek) wordt ook de verticale dimensie aantrekkelijk om erbij te betrekken.
2. Laboratoriumonderzoek is af te raden, aangezien bijna alle belangrijke aandachtspunten heel sterk aan de natuurlijke vorming van ijs zijn verbonden. In een later stadium kan eventueel wel nuttig gebruik gemaakt worden van een stroomgoot met polyethyleen “ijsschollen”.

Tenslotte wordt aanbevolen een analyse te maken van de verslagen van ijsgang op rivieren, in het bijzonder de Nederlandse. Hieruit kunnen wellicht gegevens worden verkregen over de invloedsfactoren op de capaciteit of de ruwheid van het ijs.

5 Belastingen op kribben door ijs

5.1 Inleiding

Onderwerp van dit hoofdstuk is de door ijs veroorzaakte belasting op toplagen van kribben. Deze toplagen bestaan in Nederland bij kribben uit breuksteen of zetsteen (zie de Figuren 2.2 en 2.3) en zijn gedimensioneerd op aanval van stroming, golven of een combinatie. Afhankelijk van het te beschouwen gebied gaat het om windgolven en scheepsgeïnduceerde golven.

Bij dimensioneren van de toplagen wordt ijsbelasting niet meegenomen. In dit hoofdstuk wordt bekeken wat de maatgevende belasting is die ijs op een krib kan uitoefenen. Vervolgens kan in een vervolg met een life-cycle benadering worden bepaald of die belastingen bij het ontwerpen moeten worden meegenomen.

Na een onderverdeling in de verschillende wijzen waarop ijs de toplagen kan beïnvloeden in paragraaf 5.2 alsmede enkele vuistregels die in de literatuur zijn gevonden ten aanzien van ijsbelasting wordt in de daaropvolgende paragrafen ingegaan op de kwantificering van de verschillende ijsbelastingen op (breukstenen) toplagen. Conclusies en aanbevelingen worden gedaan in paragraaf 5.9.



Figuur 5.1 Verplaatste stenen door ijs (IJsselmeerdijk bij Laaxum, Friesland)

5.2 Onderverdeling ijsbelasting op toplagen van kribben

De literatuur gaat vrijwel niet in op ijsbelasting op kribben. Iets meer in kwalitatieve zin is bekend over de belastingen op oeververdedigingen. Op basis van de literatuur kunnen dan ook de volgende ijsbelastingen op toplagen van breukstenen verdedigingen worden onderscheiden, waarbij een onderverdeling wordt gemaakt tussen directe en indirecte ijsbelasting. Deze zullen in dit hoofdstuk worden behandeld.

Directe ijsbelasting:

1. krachten door bewegend ijs op een toplaag;
2. krachten van een tegen een krib aan stotende ijsplaat;
3. krachten door verticale (getijde) beweging van een aan de toplaag vastgevroren ijslaag;
4. thermische ijskrachten (op een toplaag door expansie of contractie);

en indirecte ijsbelasting:

5. krachten door beïnvloeding van de waterbeweging door ijs;
6. afname van de duurzaamheid van breukstenen.

Krachten door directe belastingen worden behandeld in de paragrafen 5.3 t/m 5.6. De indirecte belastingen zijn het gevolg van de aanwezigheid van een ijsbelasting en worden kort nu behandeld.

Aanwezigheid van ijs beïnvloedt de stroomsnelheden en golven: enerzijds heeft ijs een dempende werking op golven, anderzijds kan ijs leiden tot hogere stroomsnelheden. Door een verminderd stroomoppervlak zal de stroomsnelheid onder de ijslaag toenemen en daarmee de schuifspanning op de toplaag en de bodem. De versterking van ontgrondingen (scour) rond een krib als gevolg van de aanwezigheid van ijs is een potentiële bedreiging voor de stabiliteit van kribben en toplagen. Dit aspect is in het vorige hoofdstuk overigens ook aan de orde geweest.

In Wuebben (1995) wordt melding gemaakt van constatering van Mercer en Cooper die aangeven dat ondanks dat er ontgrondingen optreden onder de gehele lengte van een ijsplaat of ijsophoping (ijsdam) de grootste ontgrondingen optreden aan de bovenstroomse zijde ter plaatse van de plotselinge verminderde diepte. Dit lijkt logisch aangezien hier de keeldoorsnede (effectieve doorstroomhoogte) het kleinst en turbulentie hoog is door loslatende stroming.

Een situatie die ook direct negatieve invloed op de stabiliteit van een toplaag kan uitoefenen is die waarbij een krib net overstroomd raakt en ijsschotsen over de kribkop scheren.

Een tweede indirecte belasting van ijs op de toplaag is de afname van de duurzaamheid van het materiaal waaruit de toplaag bestaat. Fysische verwerking van steen door vriezen, dooien, thermische expansie (uitzetten) en contractie (krimpen) is een belangrijke oorzaak van degradatie, en het wordt belangrijker naarmate de tijdsduur en de frequentie van koude periodes toenemen. Deze wordt gedurende de levensduur van het materiaal belangrijker geacht dan chemische achteruitgang (Wuebben, 1995).

Breuksteen kan onder invloed van ijs of sterke temperatuurvariaties degraderen door: scheurvorming, afbreken van steenstukken/schilferen, delaminatie (afsplitsen van lagen), desintegratie (afbraak van bindsel dat steenlagen vasthoudt), desintegratie (totaal verlies van samenhang) en ontbinding/oplossing.

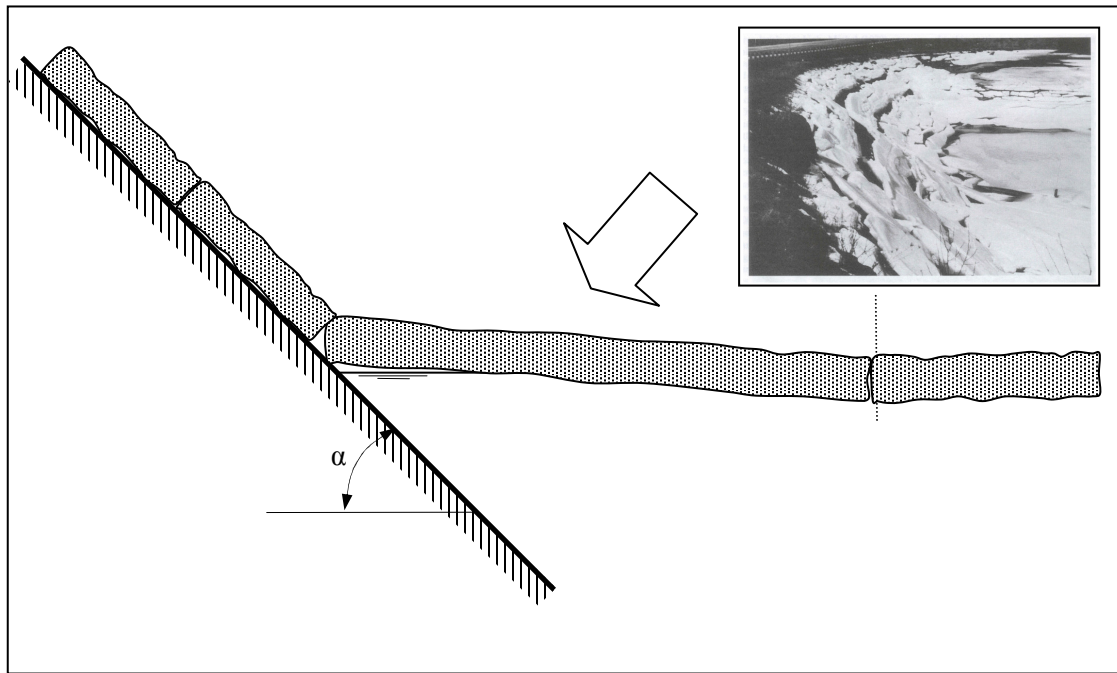
Laboratoriumproeven dienen uit te wijzen hoe duurzaam de thans in Nederland toegepaste breukstenen zijn in relatie tot ijs en koude-invloeden.

Terugkomend op de directe belastingen op kribben door ijs moet worden vastgesteld dat uit de onderzochte literatuur blijkt dat bij het ontwerp van toplagen zeer zelden schuifspanningsberekeningen met ijs worden uitgevoerd. De berekeningsmethoden zijn hiervoor ook nog niet sterk ontwikkeld, en veel informatie ontbreekt nog om goede voorspellingen te doen teneinde de maatgevende ijsbelasting te bepalen. Ijsinvloed wordt door een aantal instanties in de wereld op de volgende wijze in het ontwerp van toplagen meegenomen.

- De U.S. Army Corps of Engineers (USACE, 1994, 2002) houdt als vuistregel aan dat de dikte van de van de (top)laag op oevers verhoogd moet worden met 4 -12 inch (10 – 30 cm), in combinatie met een passende steenafmeting, teneinde rekening te houden met de grotere schuifspanningen door drijvend puin en vermoedelijk ook ijs. Verder wordt vermeld dat steile oevers hierbij over het algemeen intensiever belast zullen worden, en dat daarom oevers niet steiler dan 1:2,5 zouden mogen zijn.
- In HEC-11 (Brown en Clyde, 1989) wordt aangeraden de ijskrachten per situatie te bekijken als het gaat om ontwerp van verdedigingen. Wanneer uit de historie blijkt dat ijs op bepaalde locaties tot problemen heeft geleid, dan raden ze het gebruik van een stabiliteitsfactor van 1,2 – 1,5 aan om de steenafmetingen mee te verhogen.

5.3 Krachten door bewegend ijs op een toplaag

Op het moment dat een drijvende ijsplaat een krib ontmoet, dan wordt deze de taludhelling op geduwd of naar beneden gedrukt, onder invloed van de wind- en / of stroomschuifspanning werkend op de ijsplaat. Op een gegeven moment breekt de plaat in stukken door de toename van het buigend moment bij groter wordende hoek tussen de plaat en het wateroppervlak. De plaat vervolgt zijn weg en de stukken blijven breken tot een typische lengte van 4 tot 8 maal de ijsdikte (Figuur 5.2).



Figuur 5.2 Op een talud omhoog geduwde ijsblokken (bron : Wuebben (1995))

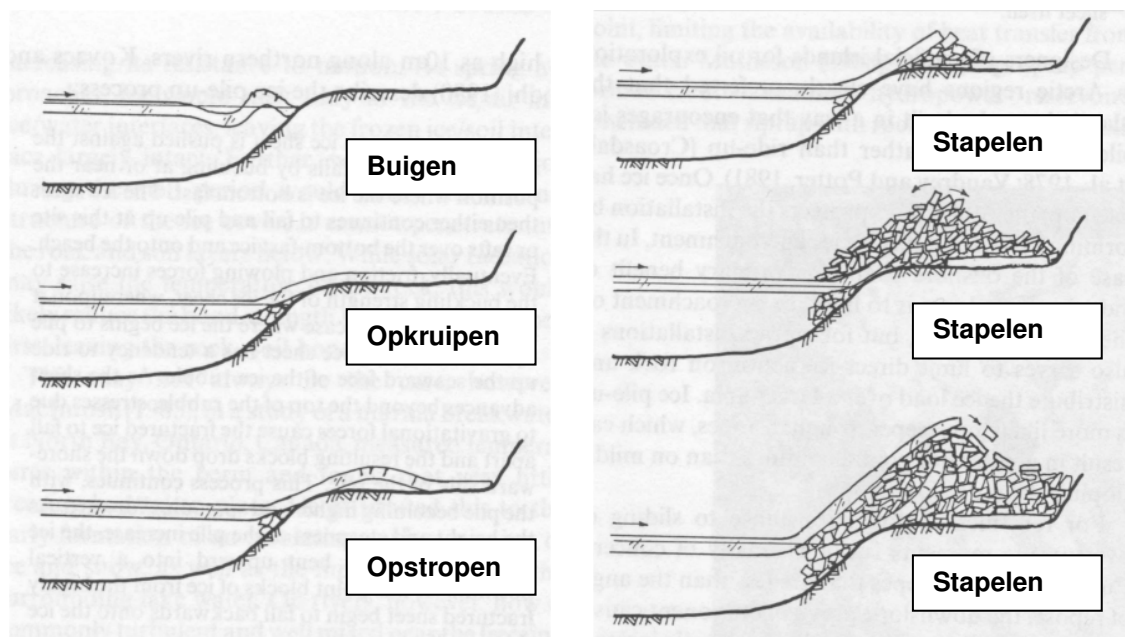
De kracht die wordt uitgeoefend op de constructie is gelimiteerd tot de kracht die nodig is om het ijs zelf te laten bezwijken. Als de constructie smal is dan kunnen de ijsblokken om de constructie heen hun weg vervolgen. Bij een brede constructie, zoals een krib, zullen de delen verder omhoog bewegen en over de top van de constructie worden geduwd of een ijsstapel vormen (zie Figuur 5.3).

En andere belasting door ijsbeweging op een hellend vlak treedt op wanneer dooi inzet en ijsplaten die zich op het talud bevinden naar beneden glijden onder invloed van de zwaartekrachtscomponent, waarbij ook breukstenen kunnen worden verplaatst.

Sodhi, et. al. (1996) beschrijven modelproeven naar de ijsbelasting op breukstenen oeververdediging. Hoewel in dit artikel geen berekeningen staan beschreven wordt wel een aantal interessante zaken genoemd. Zij vermelden dat inspecties van Matheson (1988) uitwijzen dat de dominante riprap schade in Canada optreedt rond het vries-dooi-punt. Matheson beschrijft de volgende belangrijkste schakelmechanismen: het “uitplukken” van breukstenen bij variatie in waterniveaus en het schuiven van ijs. Het “uitplukken” van stenen kan volgens hem optreden bij verdedigingen met een steendikte tot ongeveer de ijsdikte. Opgemerkt wordt dat de winterschade het grootste was bij steile hellingen.

Verder schrijven Sodhi et al dat Doyle (1988) alle schade op constructies in de Nicola rivier (Canada) na het uiteenvallen van ijs door warmer weer toe aan sterke ijsstroming in de hoofdgeul en ijs dat de floodplain werd opgedwongen door ijsdammen. Zijn observaties suggereren dat individuele stenen uit verdedigingen werden opgepikt wat soms tot totaal bezwijken leidt.

Volgens Sodhi geeft Wuebben (1995) op basis van literatuurstudie aan dat de niet-uniforme stroming of dynamische stroming bij ontwikkeling van een ijsdam tot serieuze ontgrondingen en schade aan verdedigingen kan leiden.

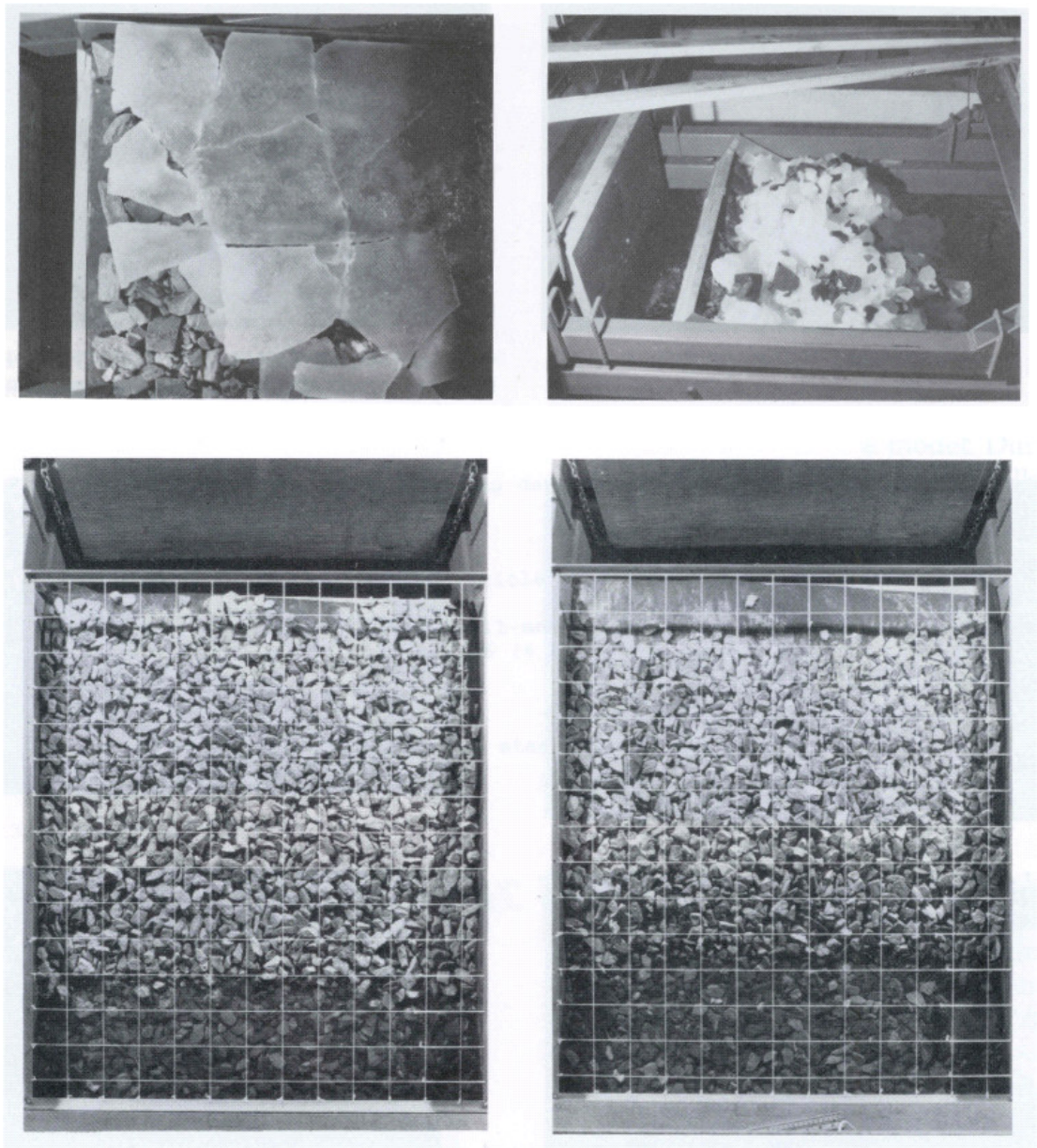


Figuur 5.3 Proces van omhoogkruipen en stapelen (bron: Wuebben (1995))

Sodhi et.al (1983) concludeert op basis van proeven dat het schuiven van ijs op een helling wordt bevorderd door een ruw oppervlak omdat hier de krachten hoog worden die nodig zijn voor een continue opwaartse beweging van een ijsplaat.

Meer specifiek leidden de modelproeven tot de volgende conclusies:

- De meeste schade aan verdedigingen trad op wanneer ijs zich opstapelde op het talud en de aankomende ijsplaten gedwongen werden tussen de breukstenen en de ijsstapel door te schuiven.
- Er werd weinig schade geconstateerd aan verdedigingen bij schuivend ijs op een flauw talud.
- De grootste schade trad op net onder het waterniveau. Zie figuur 5.4 voor een foto van het breukstenen talud voor en na de modelproef. Duidelijk is zien hoe het schuivende ijs tot het omhoog verplaatsen van breukstenen heeft geleid.
- Om schade te voorkomen wordt op basis van de proeven geconcludeerd dat de grootste steendiameter (D_{100}) van de breukstenen minimaal twee maal de ijsdikte moet zijn voor flauwe hellingen (1:3) en ongeveer drie maal de ijsdikte voor steile hellingen (1:1,5).

**VOOR****NA**

Figuur 5.4 Foto's van modelproeven naar schuivend ijs op een talud (bron: Sodhi et.al. (1996))

In Wuebben (1995) wordt verwoord dat omhoogschuiven van ijs optreedt wanneer de weerstand tegen het schuiven van ijs op een helling kleiner is dan de aandrijvende kracht. In het algemeen kan worden gesteld dat de kans op schuiven van ijs toeneemt bij afnemende hellingshoek, maar dat onregelmatige en steile hellingen juist de neiging hebben ophopen (pile-up) te bevorderen. In dit artikel worden nog de volgende relevante zaken opgemerkt:

- Matheson (1988) suggereert een D_{50} voor breuksteen groter dan de winter ijsdikte.

- Maynard (1989) merkt op dat voor steile hellingen de langs het talud lopende gravitatiecomponent van het ijsgewicht juist kan zorgen voor het beter in elkaar grijpen van de stenen en de stabiliteit juist kan bevorderen.
- Ontwerpers van kunstmatig gemaakte eilanden in arctische streken hebben een voorkeur de kustlijn zodanig aan te leggen dat ijsopstapeling bij de teen wordt bevorderd ten kostte van ijsschuiven. Deze stapel zou dan als een drempel moeten dienen voor het aankomende schuivend ijs.

In Wuebben (1995) wordt aangegeven dat de schuifkracht F_f die optreedt wanneer een ijsplaat over een vast oppervlak schuift kan worden uitgedrukt via:

$$F_f = \mu \rho_{ijs} g d L \cos \alpha \quad (5.1)$$

Waarin:

- μ = frictiecoëfficiënt (-)
- ρ_{ijs} = dichtheid van het ijs (kg/m^3)
- L = lengte van het ijs dat in contact staat met talud (m)
- d = ijsdikte (m)
- α = helling van het talud ($^\circ$)

Over de waarde van de frictiecoëfficiënt μ voor ijs dat over breukstenen schuift is weinig bekend. Men schat echter dat ze voor egaal beton in de orde van $\mu = 0,1 - 0,5$ ligt, waarbij $\mu = 0,3$ het meest wordt gebruikt. Voor ijs over natuurlijk gravel wordt $\mu = 0,7$ genoemd, hoewel de waarden kunnen liggen tussen $\mu = 0,47 - 1,0$, terwijl in WL | Delft Hydraulics (1991) $\mu = 0,3$ wordt genoemd.

De ijsdikte d kan worden bepaald op basis van de volgende eenvoudige formule (Pilarczyk, 1984):

$$d = a S_g^b \quad (5.2)$$

Waarin:

- S_g = vriesbelasting ($^\circ\text{C}$ dagen)
- a = empirische gebiedscoëfficiënt ($\text{cm}/^\circ\text{C}$ dagen)
- b = empirische coëfficiënt ($\sim 0,5$)
- d = ijsdikte (cm)

Aangeraden wordt een waarde voor a van $a = 2,7$ voor zoetwater ijs in een meer, en $a = 2 - 2,4$ voor zeeijs. Stel dat het 10 dagen vriest met een temperatuur van -10°C , en uitgaande van de waarden voor zoet water ijs op een meer, dan zal S_g ongeveer gelijk zijn aan $10 \times 10 = 100^\circ\text{C}$ dagen, en de ijsdikte orde 27 cm.

Uitgaande van een ijsplaat met een dikte van 30 cm schuivend op een breukstenen talud met een helling van 1:3 zal een schuifkracht worden ontwikkeld van $F \approx 8 \text{ kN/m}$ ($\mu=0,5$, en $L = 6 \text{ m}$ uitgaande van een hoogteverschil tussen “wateroppervlak” en kribkopniveau van 2 m). Wuebben meldt dat Kovaces en Sodhi (1980) echter spreken over krachten van $10 - 350 \text{ kPa}$ (kN/m^2), waarbij het lokaal nog significant hoger kan worden.

De totale kracht evenwijdig aan het talud die nodig is om een ijsschots een helling op te duwen is (Pilarczyk, 1984):

$$F_t = LdB\rho_{ijs}g(\sin\alpha + \mu\cos\alpha) \quad (5.3)$$

Waarin:

B = breedte van het ijs op de helling (m)

De kracht F_t bestaat uit de schuifkracht F_f volgens vgl.(5.1) en het deel van het eigen gewicht. Als er zich voor de ijsplaat een steen bevindt dan zal dit er toe leiden dat deze wordt verplaatst. Dit leidt ertoe bij de aanname van een min of meer vierkante steen dat de totale kracht nodig om een steen langs het talud te laten schuiven, ongeveer gelijk moet zijn aan:

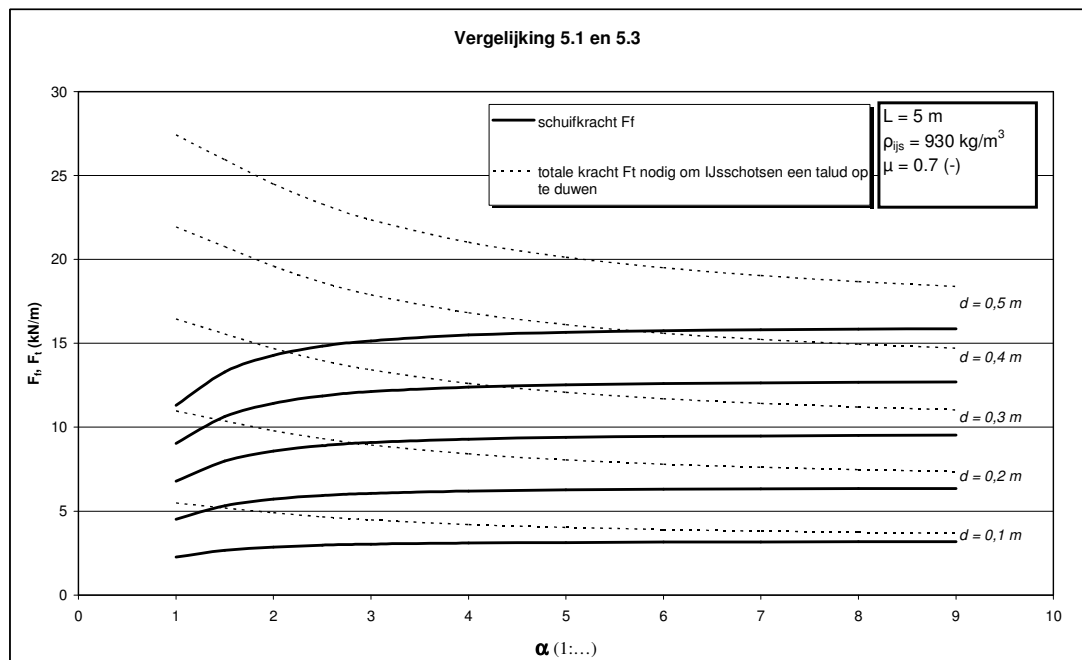
$$F_{ts} = LdB\rho_{ijs}g(\sin\alpha + \mu\cos\alpha) + \rho_s gKD^3 \quad (5.4)$$

Waarin:

D = steendiameter (m)

K = gedefinieerd volgens $K = K_s \cdot K_g$ met K_s correctiefactor voor de vorm en K_g de mate waarin de steen tussen andere stenen in ligt

De krachten zijn voor een ijsplaat met een lengte van 5 m voor verschillende ijsdiktes berekend en in Figuur 5.5 weergegeven.



Figuur 5.5 Krachten door bewegend ijs als functie van de ijsdikte

5.4 Krachten van een tegen een krib aanstotende ijsplaat

Wanneer een geïsoleerde plaat met een bepaalde snelheid een krib raakt, dan komt deze tot stilstand, splitst zich, buigt om of verplaatst zijn bewegingsrichting. De horizontale dynamische interactiekracht die op de krib wordt uitgeoefend kan leiden tot verplaatsing van breukstenen en bezwijken van de op de krib bevindende toplaag. Wanneer de kinetische energie van het bewegende ijs groter is dan het vermogen dat nodig is om het ijs te laten bezwijken, dan is de kracht waarmee rekening gehouden moet worden gelimiteerd tot de bezwijksterkte van het ijs. De snelheid waarmee een ijsplaat beweegt en de kinetische energie die het bezit, wordt veroorzaakt door schuifspanning door wind en stroming werkend op de ijsplaat, maar ook varende schepen kunnen krachten op de ijsschotsen en derhalve op de kribben overbrengen. Bij het botsen van de ijsplaat zal een deel van de kinetische energie worden afgegeven aan de krib en de toplaag.

Als een ijsdeel in botsing komt met een constructie en tot stilstand komt dan zal de totale kinetische energie worden gedissipeerd in het breken (brosse breuk) van het ijs of in bijvoorbeeld het bewegen van breukstenen uit een toplaag. Uiteraard kan het zo zijn dat een deel van de energie in de ijsplaat behouden blijft en de ijsplaat in een andere richting zijn weg voortzet.

Indien de kinetische energie wordt gedissipeerd door het verbrijzelen van een volume V van het ijs (waarbij direct wordt verondersteld dat er bijvoorbeeld geen energie wordt gedissipeerd in het verplaatsen van breukstenen in een toplaag) dan geeft dit:

$$\frac{1}{2}mv^2 = p_e V \quad (5.5)$$

waarin:

- m = massa van de ijsplaat (kg)
- v = snelheid van de ijsplaat (m/s)
- p_e = effectieve druk (N/m²)
- V = volume (m³)

De interactiekracht F kan nu worden geschat via:

$$F = p_e A \quad (5.6)$$

waarin:

- A = contact oppervlak bij botsing (m²)

Combineren van bovenstaande formules en met de aanname dat $V=Ak$ dan levert dit het volgende op:

$$F = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{k} \quad (5.7)$$

waarin k dan staat voor de horizontale afstand waarover het ijs breekt.

Als echter alle energie wordt gedissipeerd in (het verplaatsen van stenen uit) de breukstenen toplaag, dan zouden bovenstaande vergelijkingen moeten kunnen worden omgezet. Indien we aannemen dat de kracht F_T langs het talud zorgt voor verplaatsing van stenen, dan geldt:

$$F_T = \frac{\frac{1}{2}mv^2 \cos \alpha}{k_T} \quad (5.8)$$

waarbij k_T kan worden opgevat als de nD , met D de steendiameter (m) en n als een aantal. Vermoedelijk zal n in de orde van 1 tot 5 liggen. Als het ware de toplaaglengte langs het talud waarover de energie wordt gedissipeerd.

De botsingskracht die evenwijdig aan het talud optreedt als een 30 cm dikke plaat van 5 x 5 m (karakteristieke lengte bij gegeven dikte) met een snelheid van 1 m/s tegen een krib stoot wordt geschat op 1,4 kN/m, waarbij d is geschat op 0,5 m, de dichtheid van ijs op 920 kg/m³ en een taludhelling van 1:3.

Indien er ook sprake is van excentrische aanstroming dan zal een deel van de energie behouden blijven in de verplaatsing van de ijsplaat, nadat deze zijn weg in een andere richting vervolgd. USACE (2002) geeft hiervoor een aanpak, waarin echter een groot aantal parameters geschat moet worden.

5.5 Krachten door verticale beweging van een aan de toplaag vastgevroren ijslaag

Kribben waar ijsdelen aan vast vriezen worden onderworpen aan verticale krachten wanneer de ijsplaat op een verticale beweging van het water reageert. De verticale kracht wordt gelimiteerd door de sterkte (mechanische eigenschappen) van het ijs of door de sterkte van de aanhechting tussen het ijs en de breukstenen.

De kracht die wordt uitgeoefend door veranderende waterspiegel kan volgens Ashton (Wuebben, 1995) worden geanalyseerd via een quasi-oneindig lange ligger op een elastische ondergrond. De op- of neerwaartse kracht P_V per eenheid van lengte zou kunnen worden geschat middels:

$$F_V = \frac{\rho_w g \Delta z}{l} \quad (5.9)$$

waarin:

- ρ_w = dichtheid van water (kg/m³)
- Δz = waterspiegelverandering (m)
- l = karakteristieke lengte van een ijsplaat (m)

Omtrent vergelijking 5.9 bestaat een aantal onduidelijkheden, waar het betreffende artikel geen antwoord op geeft:

- Fv wordt in het artikel aangeduid als kracht per eenheid van lengte, te weten N/m. De afzonderlijke eenheden leiden gezamenlijk echter tot een eenheid voor Fv van N/m³.
- Verwacht zou worden dat F_v toeneemt bij toenemende lengte l, maar de vergelijking stelt juist het omgekeerde.

Verder ontbreekt de taludhelling in de vergelijking.

De karakteristieke lengte kan worden berekend volgens (Wuebben, 1995) en USACE (2002):

$$l = \left(\frac{Ed^3}{12(1-\nu^2)\rho_w g} \right)^{0,25} = 0,056 (Ed^3)^{0,25} \quad (5.10)$$

met:

- E = Young's modulus of Effectieve Elasticiteits Modulus (Pa)
- d = ijsdikte (m)
- ν = Poisson's ratio (0,314 – 0,345) (-)

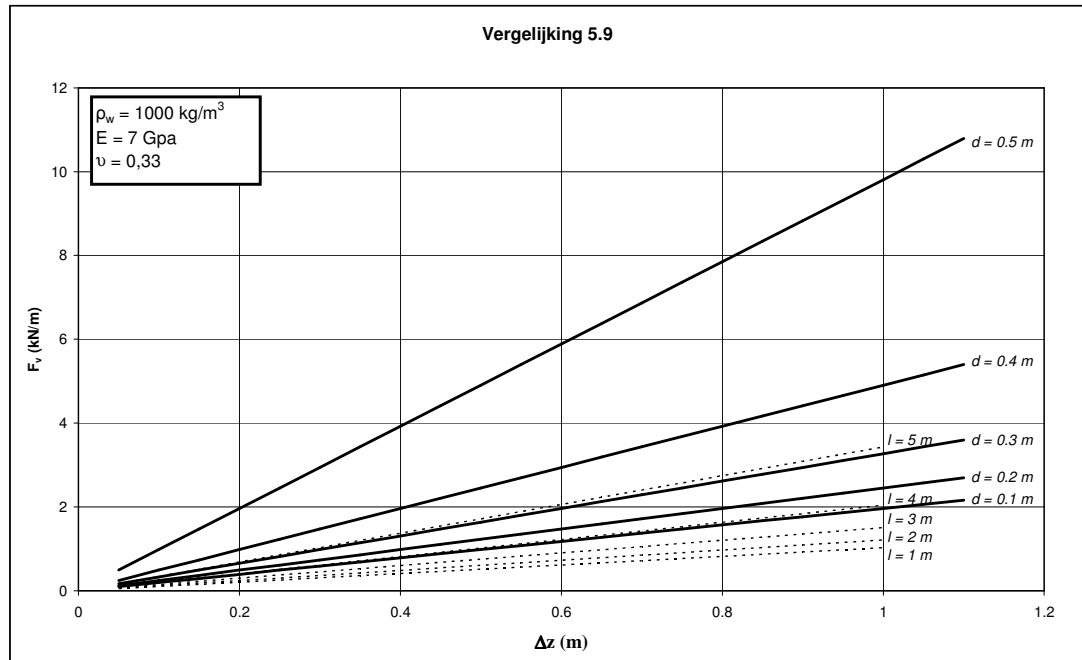
In WL | Delft Hydraulics (1991) wordt overigens een iets afwijkende formule voor de karakteristieke lengte van een ijsplaat genoemd:

$$l = \left(\frac{4 \cdot 0,083 \cdot Ed^3}{\rho_w g} \right)^{0,25} = 0,076 (Ed^3)^{0,25} \quad (5.11)$$

Bij identieke invoergetallen zal de vergelijking uit WL | Delft Hydraulics (1991) resulteren in een factor 1,3 grotere lengtes. De karakteristieke lengte van ijs in zoet water ligt gewoonlijk tussen 15 en 20 maal de ijsdikte, waarbij 17 maal de ijsdikte als een goede vuistregel kan worden aangemerkt. Opgemerkt wordt dat het artikel van Sodhi et.al. (1996) een derde vergelijking presenteert voor karakteristieke lengte waarin ook de elastische buiging wordt meegenomen.

Ook ten aanzien van de waarde van Young's modulus voor ijs verschillen de waarden zoals die genoemd worden in WL | Delft Hydraulics (1991) ten opzichte van Wuebben (1995) en USACE (2002). In WL | Delft Hydraulics (1991) wordt voor puur ijs E = 9,5 GPa gegeven en E = 7 GPa voor ijs waarvan het porositeitgehalte met 10% toeneemt. De andere bronnen geven een waarde voor E tussen 1 en 3 GPa aan, en 2 GPa bij lage belastingfrequenties tot 9 GPa bij hoge frequenties.

Voor verschillende ijsdiktes is de kracht met vgl.(5.9) berekend en gepresenteerd in Figuur 5.6.



Figuur 5.6 Kracht door verticale ijsbewegingen als functie van de ijsdikte

Opgemerkt moet worden dat de maximale kracht die gegenereerd kan worden gelimiteerd is aan de buigsterkte van het ijs. Deze wordt bijvoorbeeld gegeven door (USACE, 2002):

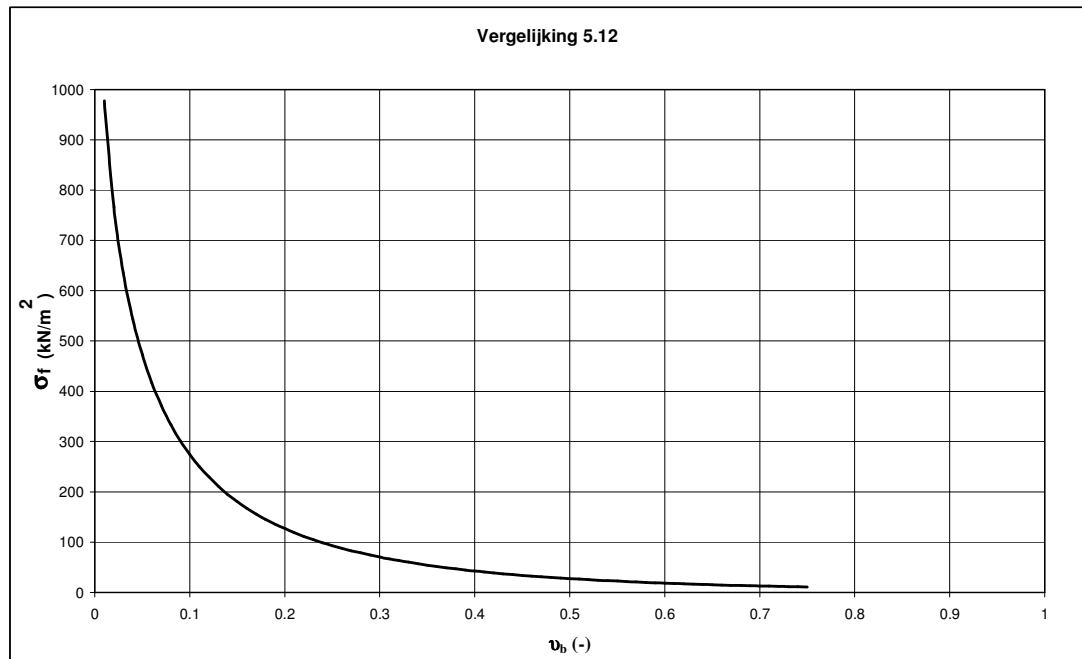
$$\sigma_f = 1,76e^{-5,88\sqrt{v_b}} \quad (5.12)$$

met:

σ_f = buigsterkte van ijs o.b.v. zoutvolume (MPa)

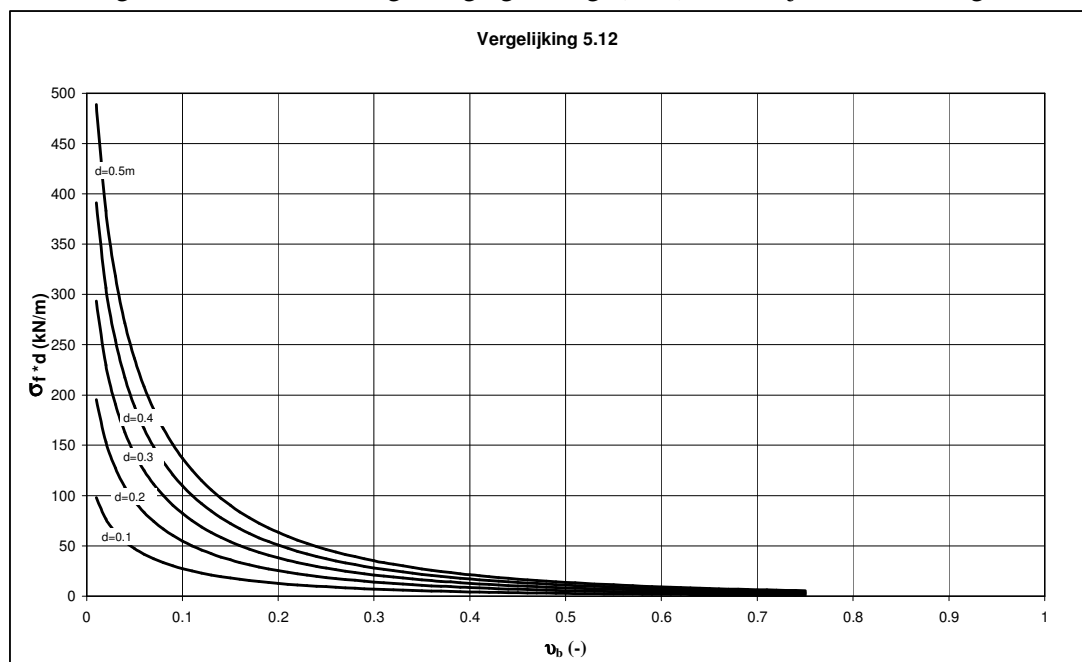
v_b = volume fractie zout (-)

Voor zoet water geldt dat $v_b \approx 0$, dus $\sigma_f \approx 1,76 \text{ MPa}$. Het verloop van de buigsterkte is in Figuur 5.7 gepresenteerd.



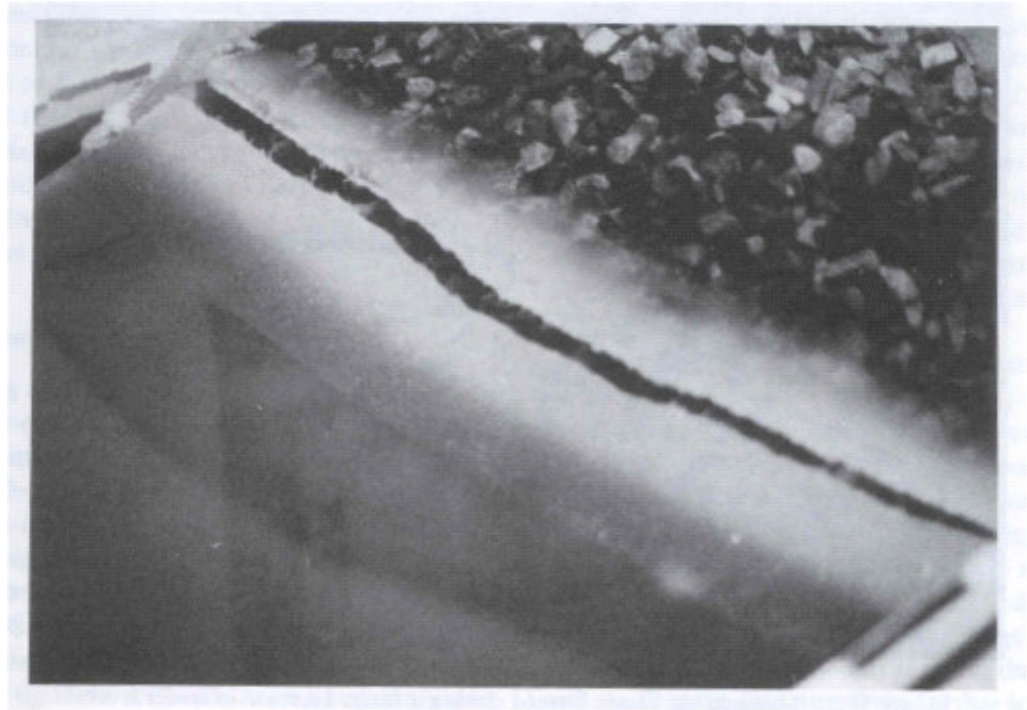
Figuur 5.7 Buigsterkte ijs als functie van het volume zout

Uit vgl.(12) lijkt af te leiden dat ijs niet snel zal breken. Voor verschillende ijsdikte is de kracht uitgerekend door vermenigvuldiging van vgl.(5.12) met de ijsdikte d , zie Figuur 5.8



Figuur 5.8 Kracht als functie van de ijsdikte en het zoutvolume

Als we de berekende krachten gepresenteerd in Figuur 5.8 nader beschouwen dan lijken deze in tegenspraak met bevindingen in de literatuur. In Figuur 5.9 bijvoorbeeld wordt een voorbeeld van een gebroken ijsplaat getoond.



Figuur 5.9 Ijsbreuk door waterspiegelvariëties (bron: Wuebben, 1995)

Hoewel vergelijking (5.9) volgens de literatuur ook voor dalende waterstanden te gebruiken is, zal de door het ijs uitgeoefende kracht bij dalende waterspiegels meer bestaan uit het eigen gewicht van de ijsplaat dat aan de breukstenen hangt en het moment dat hiermee op de toplaag wordt uitgeoefend.

5.6 Thermische ijskrachten

Een statische kracht op kribben wordt veroorzaakt door uitzetting en contractie van ijs. Evenals andere materialen zet water uit bij toenemende temperatuur en vice versa. Echter, in tegenstelling tot andere materialen zet water ook uit wanneer het van de vloeistoffase overgaat in vaste fase. Deze twee eigenschappen, samen met kruip, verklaren de krachten op kribben wanneer “ijs” een temperatuursverandering ondergaat. Factoren die de thermische krachten beïnvloeden zijn de temperatuurstoe- of afname, de warmte-uitwisseling aan het oppervlak van de ijsplaat, de aanwezigheid van randen die expansie van een ijsplaat weerstaan, kruiprelaxatie (tijdsafhankelijk gedrag/uitzetting onder invloed van uitgeoefende krachten) van ijs en (droge of natte) scheuren in ijs.

Aangezien zoet water een thermische uitzettingscoëfficiënt heeft van circa $52 \times 10^{-6} \text{ m/m}^\circ\text{C}$, zal een ijsplaat met een lengte van 100 m circa 5 cm uitzetten als de temperatuur met 10°C stijgt. Deze uitzetting is een traag proces, mede doordat het ijs vaak dik is en het vrij lang duurt voordat de gehele ijslaag de temperatuursverandering heeft ondergaan.

In Wuebben (1995) wordt vermeld dat de relatief weinig beschikbare metingen van ijsbelastingen door thermische uitzetting maximum waarden gaven van 53 kN/m op reservoirs met flauwe stranden tot 350 kN/m op steile rotsachtige kustlijnen.

Thermische krachten lijken derhalve groot te kunnen zijn. Het is echter de vraag of deze werkelijk van belang zullen zijn voor breukstenen toplagen aangezien de uitzetting in rivieren gering zal zijn (enkele centimeters).

5.7 Conclusies en kennisleemten

In dit hoofdstuk is een aanzet gegeven tot het bepalen van ijsbelastingen op toplagen van kribben op basis van wat in de beschikbare literatuur te vinden is. Een onderscheid is gemaakt naar de volgende directe belastinggevallen:

1. Krachten door bewegend ijs op een toplaag;
2. Krachten van een tegen een krib aan stotende ijsplaat;
3. Krachten door verticale (getijde) beweging van een aan de toplaag;
4. Thermische ijskrachten (op een toplaag door expansie of contractie);

Op basis van de uitgevoerde studie lijken de krachten van een tegen een krib aanstotende individuele ijsplaat de grootste krachten uit te oefenen (belastinggeval 2), gevolgd door over een toplaag bewegend (kruierend) ijs (belastinggeval 1). De botsingskrachten door ijsschollen (belastinggeval 2) zijn relatief klein.

Bij thermische uitzetting van ijs (belastinggeval 4) komen enorme krachten vrij. Het is echter de vraag of deze werkelijk van belang zullen zijn voor breukstenen toplagen aangezien de uitzetting in rivieren gering zal zijn (enkele centimeters).

Op basis van de onderhavige studie kan geen kant-en-klaar recept worden gegeven op welke wijze ijsbelastingen in het ontwerpproces moeten worden geïmplementeerd. Daartoe wordt aanbevolen om een stabiliteitsanalyse uit te voeren voor een specifieke situatie. Daarbij zal dan ook rekening moeten worden gehouden met de kans van voorkomen.

Toch kunnen enkele richtlijnen worden gegeven op basis van de literatuur:

- Sodhi et al concluderen op basis van proeven dat schade van over een talud schuivend ijs voorkomen wordt als de grootste steendiameter (D_{100}) minimaal twee maal de ijsdikte is voor flauwe taludhellingen (1:3) en ongeveer drie maal de ijsdikte voor steile taludhellingen (1:1,5).
- HEC-11 (Brown en Clyde, 1989) raadt aan de ijskrachten per situatie te bekijken en wanneer uit de historie blijkt dat ijs op bepaalde locaties tot problemen heeft geleid, wordt het gebruik van een stabiliteitsfactor van 1,2 – 1,5 aanbevolen om de steenafmetingen te verhogen.

Het zal duidelijk zijn dat deze relaties niet zijn gevalideerd evenals de gepresenteerde formules. Specifiek onderzoek naar de ijsinvloed op kribben lijkt daarom zinvol. Specifieke kennisleemten zijn:

- Hoewel de wrijvingskracht van over een toplaag schuivend ijs kan worden berekend is de frictiecoëfficiënt μ voor breuksteen nog tamelijk onbekend.
- Er is geen formule gevonden voor het bepalen van de thermische krachten op een toplaag.
- Inzicht in de wijze waarop een tegen een krib stotende ijsplaat zijn energie overbrengt op de toplaag en schade aan een toplaag toebrengt ontbreekt.

In ieder geval is duidelijk dat ijs schade kan toe brengen aan kribben en elementen aan kribben. De foto's getuigen van dergelijke schade waarnemingen.

Herhaald wordt echter dat de frequentie van voorkomen van ijs gering is en het nog maar de vraag is of hiermee rekening moet worden gehouden bij het ontwerp. In ieder geval is het toepassen van de hiervoor genoemde richtlijnen van Sodhi et al en HEC-11 niet zinvol voor de situatie op de Nederlandse rivieren.

6 Gevolgen voor beheer, onderhoud en monitoren

6.1 Inleiding

De functie afvoer van water, sediment en ijs vereist dat op grond van de normalisatie de kribben in stand moeten blijven en bestand moeten zijn tegen stroom- en ijsbelasting (en schade-ervaringen). In principe betekent dit dus dat vorm en afmetingen moeten worden gehandhaafd en schade tijdens de levensduur beperkt moet blijven. Dit stelt eisen aan het ontwerp, maar ook eisen aan het instandhouden van de krib, dat wil zeggen: eisen aan beheer, onderhoud en monitoren. Bij het ontwerp moet dus al rekening worden gehouden met beheer- en onderhoudaspecten.

In het navolgende zal hierop worden ingegaan op basis van de in de hoofdstukken 3, 4 en 5 vastgestelde gewenste vorm en afmetingen van kribben, ijsbelastingen en geconstateerde schade door ijs. Eerst zullen de consequenties voor het ontwerp van kribben aan de orde komen, en vervolgens de consequenties voor beheer, onderhoud en monitoren. In dat geval speelt de vraag of en wanneer moet worden ingegrepen als kribben niet voldoen aan de voorwaarden voor tegengaan van ijsdamvorming, of als schade ontstaat en op grond daarvan niet langer wordt voldaan aan de gewenste vorm en afmetingen.



Figuur 6.1 Verplaatste stenen door kruisend ijs, Houtribdijk

6.2 Consequenties voor het ontwerp

Kort gezegd wordt de afvoer van water en ijs en het tegengaan van de vorming van ijsdammen bevorderd door een regelmatig stroombeeld met zo weinig mogelijk stroomversnellingen en vertragingen. Dit kan worden bereikt door:

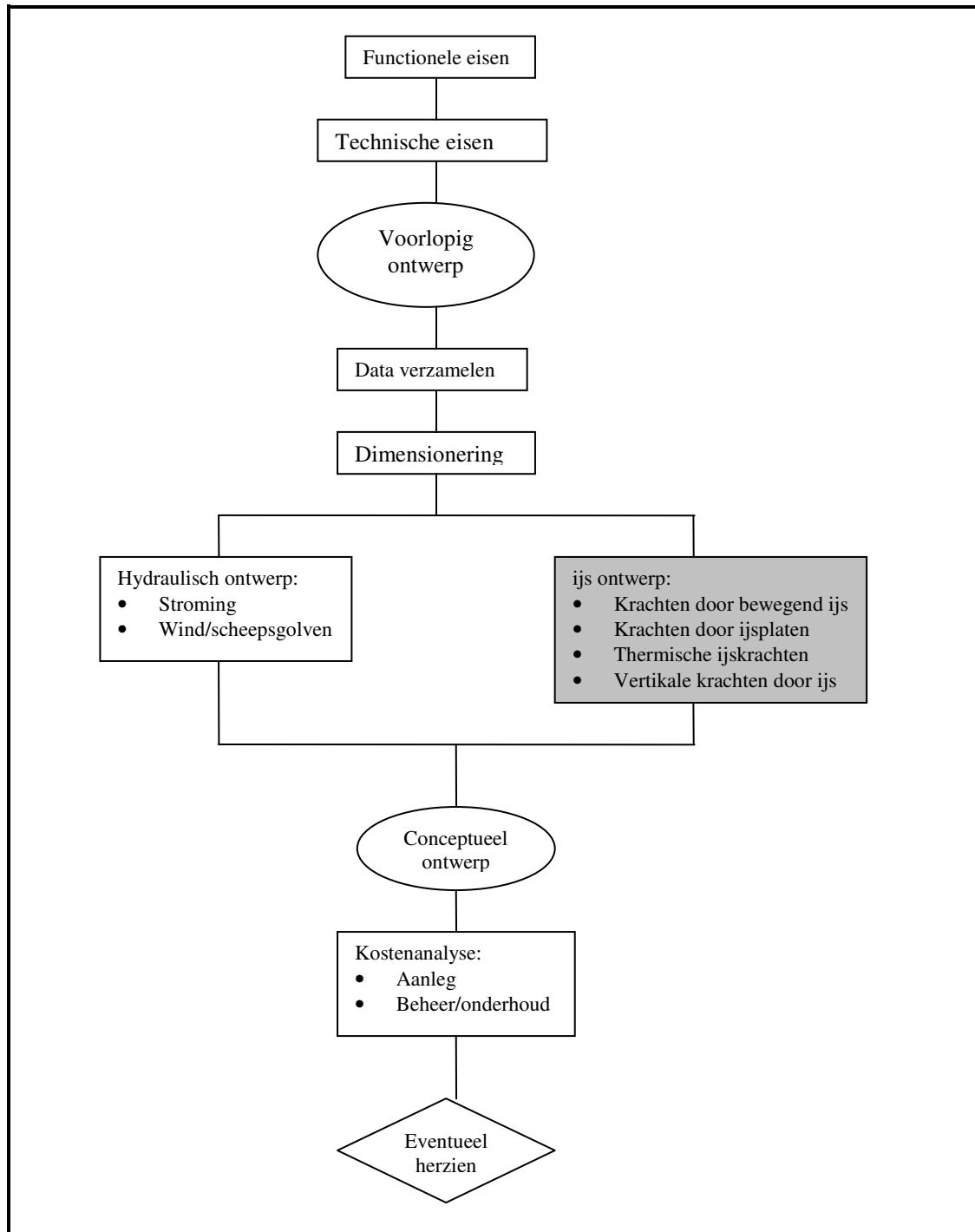
- Stroomlijnen van de kribben door een goede ligging (lengte) en vormgeving van de kribben (o.a. de kribkopsteilheid).
- De onderlinge afstand van de kribben niet te groot te maken waardoor de scheidingsstroomlijn niet te veel kan uitwaaieren.
- Hydraulische ruwheid van de kribben te verkleinen door vegetatie te verwijderen en het boven- en benedenstroomstalud te verflauwen.
- Door oneffenheden in de bodem zoals kuilen en ondieptes te voorkomen (minder steile kribkophelling).
- Voorkomen dat substantiële schade ontstaat aan een krib, waardoor de stroomlijning afneemt.

De relevante krachtenwerking op de volgende kribparameters kan als volgt worden beschreven:

- kriblengte: bepaalt de overblijvende normaalbreedte die beschikbaar is;
- kribhoogte: bepaalt de hinder voor ijsafvoer bij overstroomde kribben; deze kan groter of kleiner zijn wat wordt bepaald door de overstromingshoogte;
- kribkophelling α_{kop} : van invloed via het lokale stroombeeld op de geleiding van het ijs; in het algemeen geldt hiervoor hoe flauwer hoe beter;
- bovenstroomse helling kriblichaam $\alpha_{bovenstrooms}$: bepaalt of ijs zich vastzet; een kleinere helling is gunstiger;
- helling kruin β : beïnvloedt het stroombeeld boven de krib en dus ook de ijsbeweging boven de krib (duwt ijs richting de hoofdgeul); een grotere helling is gunstiger;
- k: een grote ruwheid vergroot de kans dat ijs zich vastzet en dat is ongunstiger.

In principe worden bovenstaande verbeteringen aanbevolen, maar voor dat daartoe definitief wordt besloten zal een economische afweging moeten worden gemaakt. Dit rapport is daartoe niet de geëigende plaats.

In onderstaand schema in Figuur 6.1 is de ontwerpprocedure samengevat. In grijs het onderdeel waar de krachten door ijs relevant zijn. De formules zoals gepresenteerd in Hoofdstuk 5 zullen hier moeten worden toegepast om de elementen van de krib te dimensioneren.



Figuur 6.1 Ontwerpprocedure die rekening houdt met ijsbelastingen

Altijd zullen in een concrete situatie meerdere ontwerpen worden gemaakt. Stel dat na een voorafgaande inventarisatie en selectie van mogelijke maatregelen de volgende ontwerpen worden uitgewerkt:

1. Een ontwerp zonder rekening te houden met ijsbelastingen;
2. Een ontwerp waarbij rekening wordt gehouden met een ijsbelasting:
 - A Toepassing van een zwaardere steensortering
 - B Toepassing van asfaltpenetratie om te voorkomen dat individuele stenen door ijs worden verwijderd.

De drie ontwerpen hebben elk voor- en nadelen. Ontwerp 1 zal leiden tot grotere herstellkosten als beschadiging door ijs optreedt, maar de aanlegkosten zijn lager dan voor beide andere ontwerpen. Voor ontwerp 2 geldt het tegenovergestelde: hogere aanlegkosten, maar lagere herstellkosten.

Variant B van ontwerp 2 heeft nog een ander voordeel ten opzichte van de beide andere ontwerpen. De top laag is gladder, dus de hydraulische ruwheid is geringer en dit is gunstig voor de afvoer van hoogwatergolven, maar ook voor de afvoer van ijs.

Verder zal bij het ontwerp een keuze moeten worden gemaakt voor de doorsnede. Gebruikelijk in Nederland zijn zet- en stortkribben. Zetkribben kennen altijd een overgang van het gedeelte met gezette steen naar een deel met gestorte steen. Deze overgang ligt op een niveau tot waar gezette steen nog aan te brengen is (bij benadering op het niveau van de waterstand die 20 dagen per jaar wordt onderschreden). Meestal wordt daarbij een berm toegepast en wordt de gezette steen opgesloten met perkoenen.

Uit de geconstateerde schades blijkt dat deze overgangsconstructie kwetsbaar is voor schade door ijs. Bovendien is door de overgang van berm naar het bovenliggende talud sprake van een plotselinge versteiling en ook dat is ongunstig in relatie tot ijsbelastingen.

Het voorgaande kan aanleiding zijn te overwegen geen zetkrib toe te passen.

Uiteindelijk zal het definitieve ontwerp moeten worden geselecteerd en daarbij kan gebruik worden gemaakt van een kosten-baten-analyse. De aanleg- en onderhoudskosten van de diverse varianten worden daarbij vergeleken, bijvoorbeeld als functie van de werkelijke of equivalente steendiameter.

Opgemerkt wordt dat in algemene zin wordt gestreefd naar een verlaging van de onderhoudskosten door te zoeken naar een optimale combinatie van onderhoudskosten en aanlegkosten (life cycle benadering). In relatie tot schade is daarbij het interventieniveau belangrijk en dat is afhankelijk van het schadeniveau waarbij een krib zijn functionaliteit dreigt te verliezen.

Niet aan de orde is gekomen in deze paragraaf het alternatief om in buitenbochten een kribvak af te sluiten (zie hiertoe hoofdstuk 3). IJs kan zich dan niet meer ophopen in het kribvak en naar verwachting zal dan geen schade ontstaan door ijs. Duidelijk zal zijn dat in een dergelijke situatie dit alternatief voor de aanleg van een krib zal moeten worden meegenomen bij de definitieve keuze voor een ontwerp.

6.3 Consequenties voor beheer, onderhoud en monitoren

Handhaven van de relevante parameters genoemd in voorgaande paragraaf betekent dat de functie wordt gehandhaafd en dat leidt tot een regelmatig stroombeeld en is dus gunstig voor (hoge) rivierafvoeren, maar ook is de kans geringer dat drijfijis zich vastloopt en ijsdammen ontstaan.

Toch kan schade door ijs ontstaan. Dit uit zich in de volgende schademechanismen:

- Kribkopversteiling: door een diepere ontgrondingskuil door het ijsdek, erosie zand onder kopstuk, toename helling kopstuk en kribkop, afrollen stenen kribkop
- Verdwijnen zetsteen en breuksteen uit bekleding of functieverlies perkoenen: verlies materiaal dijk kern, kruinverlaging (zie figuur 6.2)



Figuur 6.2 Schade aan toplaag van een dijk door kruend ijs

Door Van Heereveld (2002) is aangetoond dat de genoemde schades nauwelijks leiden tot een afname van de gewenste functies van de krib in situaties zonder ijs op de rivier zolang het gaat om een enkele krib en niet om een groot aantal achtereenvolgende kribben. Bij een enkele krib zal lokaal de kans op ijsdamvorming toenemen door een versmalling van het doorstroomprofiel. Als grootschalig schade ontstaat dan komt de functie van de krib in het geding en wordt mogelijk de stroom- en ijsafvoer niet langer goed geleid.

De uitgevoerde literatuurstudie heeft niet geresulteerd in andere conclusies en dat betekent dat geen nadere bandbreedtes die in relatie tot ijsvorming moeten worden gehandhaafd, konden worden vastgesteld.

In bovenstaande wordt geen acceptabele schade aan de toplaag aangegeven. Rekening houdend met ijsschollen met een karakteristieke lengte van orde 3 à 4 m (15 à 20 keer een geschatte ijsdikte van 0,20 m) zou bijvoorbeeld een aanvaardbaar oppervlak in de orde van 5 m² kunnen zijn.

Enige schade door ijs is dus zeker toegestaan, maar zal wel moeten worden hersteld. Als dit niet of niet tijdig gebeurt bestaat het risico op grotere schade en mogelijk zelfs functieverlies. Zo kan schade aan de toplaag leiden tot schade aan de onderliggende lagen omdat die niet meer afdoende zijn beschermd. Dit kan vervolgens leiden tot kruinverlaging en daarmee tot functieverlies van de krib.

De herstellkosten van ijsschade kunnen ten laste worden gebracht van beschikbare onderhoudsbudgetten. Tegenwoordig zijn door RWS herstelwerkzaamheden ondergebracht in zogenaamde prestatiecontracten met lokale aannemers. Voor zover nog niet geregeld, verdient het aanbeveling hierin op te nemen het schadeherstel in relatie tot de ijsrisico's.

Op basis van het voorgaande kunnen een aantal algemene richtlijnen voor beheer, onderhoud en monitoren worden afgeleid tijdens en direct na een periode met ijs op de rivier. Bij inspectie/monitoren moet dan aan de volgende parameters worden gedacht:

- Kribkoplengte: ligt de kribkop van een individuele krib nog op de normaallijn.
- Talud kribkop: versteiling geeft aan dat mogelijk de kuildiepte is toegenomen (versteiling zelf is vervolgschade). De kuildiepte zelf is moeilijk te monitoren en varieert bovendien door dynamisch gedrag rivierbodem, en invloed scheepvaartverkeer.
- Schade aan de toplaag.

Uiteraard gelden deze inspectie punten ook in perioden zonder ijs. Dan gelden echter ook andere punten, zoals bijvoorbeeld: verwijderen vegetatie (mits de krib geen natuurfunctie heeft) teneinde de ruwheid laag te houden.



Figuur 6.3 Kruien van ijs door overgang van berm naar talud

7 Conclusies en aanbevelingen

Op basis van een beperkt literatuuronderzoek en kwalitatieve beschouwingen is een studie uitgevoerd naar de relaties tussen ijs(dammen), kribben, ijsafvoer en riviermorfologie. Het onderzoek heeft geleid tot een aantal conclusies en kennisleemten. Ten aanzien van de centrale vraag van deze studie kan worden geconcludeerd dat:

- In stand houden van de vorm van de kribben essentieel is voor de ijsafvoer en daarmee als remedie tegen het ontstaan van ijsdammen
- De kribkoppen van achtereenvolgende kribben nauwkeurig in de normaallijn moeten liggen om stroomhinder te voorkomen.

Het voorgaande houdt in dat de relevante kribparameters gehandhaafd dienen te blijven. De relevante kribparameters in dit verband zijn: *kriblengte*, *kribkopsteilheid* en *kribruwheid*. Deze parameters dienen dan ook te worden gemonitord. Kwantitatieve waarden over te handhaven minimale afmetingen kunnen echter op grond van deze studie niet worden gegeven.

Voor de detailconclusies van de verschillende aspecten wordt verwezen naar de afzonderlijke hoofdstukken. Onderstaand zijn wel de meest belangrijke kennisleemten samengevat.

vormgeving van kribben in relatie tot ijsdammen

- Wijze waarop ijsschotsen zich in een kribvak verplaatsen en het kribvak weer verlaten.
- Interactie tussen ijs in de hoofdgeul en in kribvakken.
- Wijze waarop kribben kunnen bijdragen aan ijsdamvorming in scherpe rivierbochten, aangezien veel ijsdammen in rivierbochten ontstaan.
- Gewenste steilheid (dwz hoe flauw) kribkoptaluds.

Om hier inzicht in te krijgen kan worden overwogen om met een meerdimensionale berekening (WAQUA, DELFT2D) de stroomsnelheidsgradiënten in kaart te brengen en op basis daarvan potentiële knelpunten voor het vormen van ijsdammen in kaart te brengen. Deze gegevens kunnen ook worden gekoppeld aan historische observaties en leiden tot een dieper inzicht in het ontstaan van ijsdammen.

Wat betreft de steilheid van het kribkoptalud zal een detailmodel noodzakelijk zijn.

waterbeweging en morfologie

De erosie van de bodem is van belang voor de stabiliteit van kribben. Sedimentatie vormt geen bedreiging. Het blijkt dat van de hydraulische ruwheid onder ijs, het sedimenttransport onder ijs en de beddingvormen onder ijs nog maar weinig bekend is. Vooruitgang op dit gebied vraagt om metingen in de rivier. Het Nederlandse onderzoek heeft daarbij de keuze uit het wachten op een strenge winter, waarbij dan wel tevoren een draaiboek voor een intensieve meetcampagne gereed moet liggen, en het uitvoeren van metingen in het buitenland. Daarbij bedenke men dat de winterse omstandigheden vaak hoge eisen stellen aan zowel de meetapparatuur als de mensen die ermee moeten werken. Daarnaast zou men meer inzicht kunnen krijgen in de reactie van banken en bochtprofielen door de theorie van Struiksmā et al (1985) uit te breiden naar situaties met een ijsdek. Door ijsfunctionaliteit in te bouwen in Delft3D, zou men het lineaire model van Struiksmā et al (1985) kunnen valideren op basis van de volledige niet-lineaire theorie.

ijsbelastingen op kribben

Relaties zijn afgeleid voor ijsbelasting, maar deze relaties zijn niet gevalideerd. Specifiek onderzoek naar de ijsinvloed op kribben lijkt daarom zinvol. Specifieke kennisleemten zijn:

- Hoewel de wrijvingskracht van over een toplaag schuivend ijs kan worden berekend is de frictiecoëfficiënt μ voor breuksteen nog tamelijk onbekend.
- Er is geen formule gevonden voor het bepalen van de thermische krachten op een toplaag.
- Inzicht in de wijze waarop een tegen een krib stotende ijsplaat zijn energie overbrengt op de toplaag en schade aan een toplaag toebrengt ontbreekt.

Tenslotte: Benadrukt wordt dat de studie een sterk oriënterend karakter had en dat de conclusies slechts voorlopige zijn. Er zijn diverse kennisleemtes geconstateerd en aanbevolen wordt deze nader te onderzoeken zodat de richtlijnen voor ontwerp en voor beheer, onderhoud en monitoren kunnen worden verbeterd.

Literatuur

- Arisz, H., K.S. Davar & T.C.C. Tang (1988): *Flow resistance for partially ice covered channels: A laboratory simulation study*.
Proceedings 9th International Symposium on Ice, IAHR, Sapporo, Vol.2, pp.131-141.
- Bendegom, L. van (redactie, 1975), *Rivieren en rivierwerken. Collegedictaat (Paragraaf 2.3.3: IJs in rivieren)*, Technische Hogeschool Delft, Afdeling der Civiele Techniek, Vakgroep Rivier- en Verkeerswaterbouw kunde.
- Brown, S.A. and E.S. Clyde (1989): *Design of riprap revetment*,
Hydraulic Engineering Circular - HEC-11, March 1989
- Elhadi, N.E. and J.G. Lockhart (1989): *New Brunswick River Ice Manual*
New Brunswick Subcommittee on River Ice, Environmet Canada Inland Waters Directorate
- Hammar, L. (1994), *Frazil ice evolution in open channels*.
Licentiate thesis, Luleå University of Technology, ISSN 0280-8242.
- Frankenstein, G.E. en J.L. Wuebben (1992): *Review of ice processes*,
Discussieverslag, Toetsingsonderzoek rivierdijkversterking, 10 november 1992.
- Heereveld, M.A.van (2002): *Onderzoeksproject WBKI-Kribben – onderhoudsparameters kribben*
Haskoning, Nijmegen, 2002
- Johanneson, H. (1988), *Theory of river meanders*.
PhD thesis, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota.
- Klaassen, G.J. (1976): *Invloed van ijsvorming op de frequentie van waterstanden langs de Rijn en zijn takken in Nederland*, WL | Delft hydraulics, verslag R1104, Delft
- Krishnappan, B.G. (1983), *Suspended sediment profile for ice covered rivers*.
Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.109, No.5, pp.385-399.
- Larsen, P. (1973), *Hydraulic roughness of ice covers*.
Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol.99, No.1, pp.111-119.
- Lau, Y.L. & B.G. Krishnappan (1981), *Ice cover effects on stream flows and mixing*.
Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol.107, No.10, pp.1225-1242.
- Lau, Y.L. & B.G. Krishnappan (1985), *Sediment transport under ice cover*.
Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.111, No.6, pp.934-950.
- Maas, J.F. & D.C. Roukema (1991), *Vorming en transport van ijs op rivieren; Een analytisch en numeriek simulatie model*. Afstudeerrapport TU Delft, Faculteit der Civiele Techniek.
- Majewski, W., M. Baginska & P. Walczak (1988), *Determination of roughness of the underside of ice cover*.
Proceedings 9th International Symposium on Ice, IAHR, Sapporo, Vol.2, pp.122-130.
- Mayer, I en C. Starosolszky (1988), *Hydraulics of ice-jam development*,
Proceedings 9th IAHR International symposium on ice, Sapporo, 1988.
- Mercer, A.G. & R.H. Cooper (1977), *River bed scour related to the growth of a major ice dam*.
Proc. 3rd Hydrotechnical Conference of the Canadian Society of Civil Engineering, Quebec, May 1977.
- Mercer, A.G. & R.H. Cooper (1984), *River bed scour related to the growth of a major ice dam*.
IAHR Symposium, Hanover, pp.291-308.

- Michel, B. (1978): *Ice Mechanics*
Univ. of Laval, Quebec
- Odgaard, A.J. (1989), *River-meander model. I: Development*.
Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.115, No.11, pp.1433-1450.
- Olsson, P. (2000), *Influence of ice cover on local scour at circular bridge piers: an experimental study*.
Licentiate thesis, Luleå University of Technology, Department of Environmental Engineering, Division of Water Resources Engineering.
- Pilarczyk, K.W. (1984a): *Ice formation and types of ice*
In: The Closure of Tidal Basins, Huis in 't Veld (ed), Delft University Press, ISBN 90.6275.150.4, 1984
- Pilarczyk, K.W. (1984b): *Ice induced loads*
In: The Closure of Tidal Basins, Huis in 't Veld (ed), Delft University Press, ISBN 90.6275.150.4, 1984
- Sayre, W.W. & G.B. Song (1979), *Effects of river ice covers on alluvial channel flow and sediment transport processes*. Iowa Institute of Hydraulic Research, Report 218, University of Iowa.
- Shen, H.T. & P.N.N.D. Yapa (1984), *An unsteady flow model of river ice hydraulics*.
Proceedings IAHR Ice Symposium, Hamburg, Vol.I, pp.369-377.
- Shen, H.T., A.M.W. Lal & P. Gunaratna (1988), *A mathematical model for river ice processes*.
Proceedings 9th International Symposium on Ice, IAHR, Sapporo, Vol.2, pp.356-366.
- Smith, B.T. & R. Ettema (1997), *Flow resistance in ice-covered alluvial channels*.
Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.123, No.7, pp.592-599.
- Sodhi, D.S., S.L. Borland and J.M Standey (1996): *Ice action on riprap; small scale tests*,
US Army Corps of Engineers, CRREL report 96-12, September 1996.
- Struiksmā, N., K.W. Olesen, C. Flokstra & H.J. de Vriend (1985), *Bed deformation in curved alluvial channels*.
Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.23, No.1, pp.57-79.
- Termes, A.P.P. en A.Boogaard (1991): *Voorkomen van ijs op de Nederlandse Rijn takken (2 delen)*
WL | Delft Hydraulics, verslag Q1064, Delft
- Tsai, W.-F. & R. Ettema (1994), *Ice cover influence on transverse bed slopes in a curved alluvial channel*.
Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.32, No.4, pp.561-581.
- Tsang, G. (1988), *A theory for frazil distribution in turbulent flow*.
Proceedings 9th International Symposium on Ice, IAHR, Sapporo, Vol.2, pp.152-169.
- USACE (2002): *Ice force on structures*
In: Ice engineering, chapter 6, EM 1110-2-1612, US Army Corps of Engineers, Experiment Station, Vicksburg
- USACE (1994): *Appendix A Design procedure for riprap armor*,
US Army Corps of Engineers, Experiment Station, report EM 1110-2-1601, Vicksburg
- Uzunur, M.S. (1975), *The composite roughness of ice-covered streams*.
Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.13, No.1, pp.79-102.
- Verheij, H.J. (1997): *Effectiviteit van kribben*
WL|Delft Hydraulics & Haskoning, verslag Q2360, Delft
- Wal, M. van der (1991): *General design criteria for the Foreshore Protection mattress*,
WL | Delft Hydraulics, desk study, H1037, March 1991

WL/RAND (1993): *Toetsing uitgangspunten rivierdijkversterkingen – deelrapport 2 Maatgevende belastingen*
WL | Delft Hydraulics & EAC-RAND, Delft

Wijbenga, J.H.A. (1993): *Invloed nevengeulen op ijsgang*
WL | Delft Hydraulics, verslag Q1674, Delft

Wuebben, J.T. (1995): *Ice effects on riprap*
In: Thorne, C.R. et al: *River, Coastal and Shoreline Protection – Erosion control using riprap and armourstone* (1995), John Wiley & Sons ISBN 0-471-94235-9; Proc. Intern. Riprap Workshop, Fort Collins, Colorado, July 1993.

Yapa, P.N.D.D. (1983), *Unsteady flow simulation of rivers with an ice cover*.
Dissertation, Clarkson College of Technology.

Zongfu, S. (1992), *The formation of ice dams and it's Fuzzy models*,
Proceedings 11th IAHR International symposium on ice, Sapporo, 1992

Zufelt, E.J. en Sun Zhao-Chu (1988), *A laboratory study of transverse velocities and ice jamming in a river bend*, Proceedings 9th IAHR International symposium on ice, Sapporo, 1988.

Naar de volgende werken wordt in dit rapport niet verwezen, maar zijn mogelijk wel interessant:

Ashton (1986): *River and lake ice engineering*
Water Resources, Pubns, Littleton

Carstens, T. (1968), *Hydraulics of river ice*.
La Houille Blanche, Vol.23, No.4, pp.271-284.

Haas, A.W. de (1986), *IJsproblematiek voor de grote rivieren en de Rijndelta*.
Rijkswaterstaat, Organisatie ijsopruiming (2 delen).

Oudshoorn, H.M. (1970), *Ice cover formation and associated hydrodynamic effects in the lower part of the river Rhine*. IAHR Symposium, Reykjavik, bijdrage 3.0.

Wemelsfelder, P.J. (1940), *De invloed van ijs op de waterstanden der groote rivieren*.
De Ingenieur, Nr.7.

Zijlmans, C.J.A. (1980), *Ijsbezetting en bestrijding op de grote rivieren in Nederland*.
Rijkswaterstaat, Directie Benedenrivieren.

A Enkele uitgebreide abstracts

Maas & Roukema (1991):

Maas & Roukema presenteren naast een wiskundig model ook een grondige literatuurstudie. In het inleidende Hoofdstuk 1 noemen zij de volgende deelgebieden die aandacht vragen:

1. De thermische balans van een rivier;
2. De vorming van ijskristallen in turbulente stroming;
3. Het opstijgen en samenvriezen van ijskristallen tot ijspannekoeken;
4. De vrije convectie van drijvend ijs;
5. Het snelheidsprofiel onder een vast ijsdek;
6. De ruwheid van een vast ijsdek;
7. De interactie tussen de water- en ijsbeweging bij een bewegend ijsdek;
8. De sterkte van ijs;
9. De netto windschuifspanning tussen lucht en ijs;
10. Een impulsvergelijking om de beweging van een niet-vast ijsdek te beschrijven;
11. De dikte van een vast ijsdek;
12. De invloed van een ijsdek op de morfologie van een rivier;
13. De afbraak van ijs.

Hoofdstuk 2 behandelt de theorie van ijsvorming, het ontstaan en de ontwikkeling van een vast ijsdek, problemen als gevolg van ijsgang en het beleid tijdens een vorstperiode. Bij het ontstaan en de ontwikkeling van een vast ijsdek noemen de auteurs de volgende situaties die in de praktijk aanleiding blijken te geven tot de vorming van een ijsdam:

1. Vorming ter hoogte van de waterspiegel of tegen een benedenstrooms vast ijsdek op een meer;
2. Een lokale rivierversmalling of een rivierbocht;
3. Vorming tijdens de hoogwaterkentering op benedenrivieren met invloed van het getij;
4. Overproductie van ijs die leidt tot zelfverstikking.

Hoofdstuk 3 geeft een wiskundige beschrijving van de thermische energiebalans, de ijsvorming, de waterbeweging, de afvoer van ijs (inclusief karakteristiekenanalyse), verschillende aspecten van een vast ijsdek en de situatie met splitsingspunten. De verschillende aspecten van het vaste ijsdek zijn daarbij de dikte van het ijsdek, de ruwheid van ijs, de waterstanden, het sedimenttransport en een met ijsbrekers gevormde geul in het ijsdek. Op basis van deze wiskundige beschrijvingen hebben de auteurs een 1-D numeriek model gemaakt. Hoofdstuk 4 presenteert dit model en Hoofdstuk 5 geeft voorbeelden van berekeningen met dit model. Hoofdstuk 6 bevat een discussie. Hoofdstuk 7 geeft de conclusies en aanbevelingen. Daarbij wordt onder meer het volgende aanbevolen:

1. Het lijkt nuttig contact te leggen met de belangrijkste Amerikaanse en Canadese onderzoeksinstituten op het gebied: University of Iowa (R. Ettema), Clarkson University (H.T. Shen) en University of Quebec (B. Michel).
2. Een 2-DH numeriek model valt te prefereren boven verdere detaillering van het 1-D model. Voornamelijk de krachtswerking in ijs kan dan beter ingepast worden. Pas bij zeer goed begrip van de ijsbeweging (duiken van schollen onder een ijsdek) wordt ook de verticale dimensie aantrekkelijk om erbij te betrekken.
3. Laboratoriumonderzoek is op dit moment af te raden, aangezien bijna alle belangrijkste aandachtspunten voor een volgend onderzoek heel sterk aan de natuurlijke vorming van ijs zijn verbonden. In een later stadium kan voor het capaciteitsonderzoek eventueel wel nuttig gebruik gemaakt worden van een stroomgoot met polyethyleen "ijsschollen".
4. Maak een analyse van de verslagen van ijsgang op rivieren, in het bijzonder de Nederlandse. Hieruit kunnen wellicht gegevens worden verkregen over de invloedsfactoren op de capaciteit of de ruwheid van het ijs.
5. Het is interessant om tijdens ijsgang een aantal zaken te meten en te observeren (de auteurs voegen daaraan concrete nadere aanwijzingen toe).

Tsai & Ettema (1994):

Tsai & Ettema breiden bestaande theorieën over bodemdwarshellingen in rivierbochten uit naar situaties met een ijsdek. Ze memoreren dat onder een ijsdek een dubbele spiraalstroming ontstaat, waarbij het water halverwege de waterkolom naar de buitenbocht stroomt en nabij de bodem en nabij het ijsdek juist naar de binnenbocht. Dit is in tegenstelling tot de situatie in open water, waar de spiraalstroming bestaat uit een enkele cel met aan het oppervlak stroming naar de buitenbocht en aan de bodem stroming naar de binnenbocht. Onder verwijzing naar het oorspronkelijke werk van Struiksma et al (1985) en de latere werken van Johanneson (1988) en Odgaard (1989), zetten de auteurs uiteen dat het patroon van banken dat de bodemtopografie vormt, in essentie begrepen kan worden als een traagheid-veer-dempersysteem, beschreven door een gewone tweede-orde differentiaalvergelijking. In de verdere uitwerking haken ze aan bij de vergelijkingen van Odgaard (1989).

De auteurs hebben experimenten met en zonder ijsdek uitgevoerd in een 2,44 m brede en over 180° gekromde laboratoriumgoot met een alluviale bodem. De afvoer was steeds 0,165 m³/s. De mediane korrelgrootte van het sediment bedroeg 0,4 mm. De gemiddelde stroomsnelheden bedroegen 0,125 m/s onder het ijsdek en 0,134 m/s in het open water. De tweede cel van spiraalstroming onder het ijsdek bleek slechts zwak aanwezig. Het bodemtransport was niet nauwkeurig te meten, maar was onder het ijsdek in ieder geval kleiner dan in het iets sneller stromende open water. Ook de bodemdwarshellingen waren onder het ijsdek kleiner dan in het open water. De duinen op de alluviale bodem waren onder het ijsdek iets korter, maar weken over het algemeen maar weinig af van de duinen in open water. Op basis van de grotere waterdiepte onder het ijsdek zou men enerzijds ook grotere duinen verwachten, maar anderzijds op basis van de geringere bodemschuifspanningen juist kleinere duinen. De auteurs concluderen dat een gedetailleerde verklaring van de invloed van een ijsdek op de geometrie van bodemvormen en op het transport van sediment vooralsnog op verdere ontwikkeling wacht.

De auteurs hebben de experimentele resultaten met een numeriek model gesimuleerd. Ook daaruit volgde een reductie van bodemdwarshellingen door de aanwezigheid van een ijsdek. De auteurs schrijven dit toe aan de geringere stroomsnelheid en het dienovereenkomstig kleinere bodemtransport. Ze onderkennen twee mechanismen waardoor de ruwheid van het ijsdek het systeem dempt. Allereerst vergroot de wrijving langs het ijsdek de natte omtrek, waardoor de hydraulische straal min of meer gehalveerd wordt. De stroomsnelheden nemen daardoor af. Ten tweede leidt de situatie met een ijsdek tot twee cellen van spiraalstroming in plaats van een. Daardoor wordt, volgens de auteurs, meer energie gedissipeerd. Deze demping leidt tot flauwere bodemdwarshellingen.

De auteurs merken tenslotte op dat ijsdammen in werkelijkheid ongelijk, onregelmatig en erg ruw zijn, waardoor ze lokaal de stroming sterk kunnen vernauwen. Daardoor kan het effect op een alluviale bodem veel groter zijn dan uit hun experimenten en berekeningen volgt.