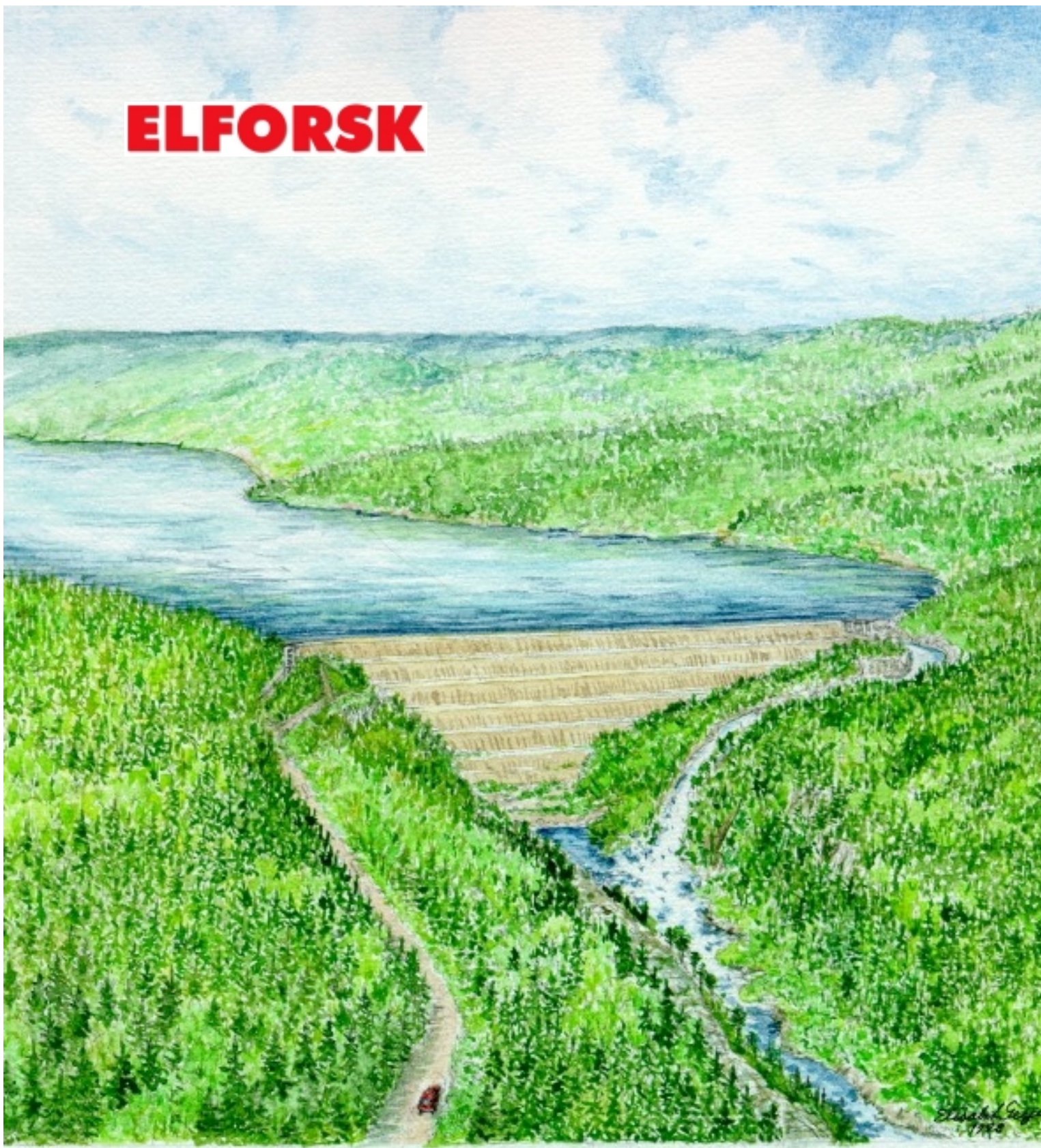


ELFORSK



DAMMSÄKERHET

**Erosionsskydd för svenska
fyllningsdammar**

**Rapport 99:22
September 99**

DAMMSÄKERHET

**Erosionsskydd för svenska
fyllningsdammar**

**Rapport 99:22
September 99**

Erosionsskydd för svenska fyllningsdammar

Slutrapport

Elforsk rapport 99:22

**Karl Rytters
SWECO**

Förord

Denna rapport är ett delresultat inom Elforsk ramprogram Dammsäkerhet.

Kraftindustrin har traditionellt satsat avsevärda resurser på forsknings och utvecklingsfrågor inom dammsäkerhetsområdet, vilket har varit en förutsättning för den framgångsrika utvecklingen av vattenkraften som energikälla i Sverige.

Målen för programmet är att långsiktigt stödja branschens policy, dvs att:

- Risker för allvarliga dammbrott skall praktiskt taget elimineras
- Risker för dammskador och driftstörningar skall hållas på lägsta rimliga nivå
- Om skada trots allt inträffar, skall beredskap finnas där handlingsprogram upprättats och konsekvenser utretts på förhand

Prioriterade områden är Teknisk säkerhet, Operativ säkerhet och beredskap samt Riskanalys.

Ramprogrammet har en styrgrupp bestående av: Jonas Birkedahl – Birka Energi, Malte Cederström - Vattenfall Vattenkraft, Anders Isander – Sydkraft Vattenkraft, Lennart Markland – Vattenregleringsföretagen, Urban Norstedt - Vattenfall Vattenkraft, Gunnar Sjödin – Vattenregleringsföretagen samt Lars Hammar - Elforsk

Stockholm i september 1999

Sammanfattning

En jämförelse av erosionsskydd för svenska fyllningsdammar av å ena sidan naturmaterial som sten och grus och å andra sidan betongelement visar att erosionsskydd av naturmaterialen är att föredra ur såväl teknisk, ekonomisk som miljömässig synvinkel.

För erosionsskydd av olika slags betongelement saknas övertygande bevis angående motståndsförmågan mot ispåverkan. De flesta typerna används dessutom regelmässigt på slänter med betydligt flackare lutning än de som är vanliga på svenska fyllningsdammar, varför även verifikation av erosionsskyddens stabilitet vid vågangrepp kan saknas.

Erosionsskydd av betongelement är dessutom väsentligt dyrare än alternativen av sprängsten för praktiskt taget alla i Sverige aktuella situationer med möjligt undantag för mycket små arbeten.

Miljöeffekterna av de olika erosionsskydden är som regel måttliga eller små. Dock har de olika naturmaterialen ett försteg ur biologisk synvinkel. Speciellt lämpliga är obearbetade naturmaterial som sand, grus och rundsten. I den mån mer betydande miljöeffekter förekommer torde dessa härröra från öppnande av bergtag, transporter och cementproduktion.

Sammanfattningsvis, finns det ingen omedelbar anledning att vidareutveckla metoder baserade på olika slags prefabricerade betongelement eller betongfyllda geotextilmadrasser för användning på svenska fyllningsdammar. Ett undantag är situationer där en höjning av dammkrönet övervägs. I detta fall kan här beskrivna metoder med kopplade, bakåtförankrade betongblock vara av visst intresse.

Asfaltstabilisering av befintliga erosionsskydd förefaller ekonomiskt mest fördelaktigt av de alternativa metoderna. Dock är denna metod ännu inte tekniskt fullt demonstrerad, den är komplicerad att använda och dessutom miljömässigt sämst.

Slutsatsen av denna studie är att fortsatt underhåll av befintliga erosionsskydd av sprängsten är att föredra i de allra flesta fall. Dock bör man fortsättningsvis förstärka skydden med block som är tillräckligt stora för att vara stabila.

Där man av någon anledning föredrar att bygga nytt erosionsskydd, exempelvis därför att befintligt skydd är i så dålig kondition att dammsäkerheten skulle kunna bli lidande, bör man normalt välja att bygga ett erosionskydd av (1) oordnad sprängsten, av (2) ordnad sprängsten enligt norsk modell eller, om de lokala förhållandena medger det, anlägga (3) en flack strand av natursten och grus.

Innehållsförteckning

1	ORIENTERING	7
1.1	PROBLEMET.....	7
1.2	UPPDRAGET	7
1.3	FÖRELIGGANDE RAPPORT.....	7
2	FUNKTIONSKRAV OCH DIMENSIONERINGSKRITERIER	9
2.1	PROJEKTERINGSMÅL OCH -METODER.....	9
2.2	BROTTMEKANISMER.....	11
2.3	PROJEKTERINGSFÖRUTSÄTTNINGAR.....	12
2.4	TYPFALL	13
2.5	DIMENSIONERING AVSEENDE VÅGOR.....	13
2.6	DIMENSIONERING AVSEENDE IS.....	21
2.7	MILJÖSYNPUNKTER	23
3	FÖREKOMMANDE TYPER AV EROSIONSSKYDD.....	27
3.1	KÄLLOR.....	27
3.2	FUNKTIONSPRINCIPER.....	27
3.3	TÄTA, STELA EROSIONSSKYDD.....	30
3.4	TÄTA, FLEXIBLA EROSIONSSKYDD.....	33
3.5	GENOMSLÄPPLIGA, STELA EROSIONSSKYDD.....	35
3.6	GENOMSLÄPPLIGA, FLEXIBLA EROSIONSSKYDD.....	36
4	PRELIMINÄR VÄRDERING	45
5	METODER FÖR EROSIONSSKYDD AV SVENSKA DAMMAR.....	49
5.1	OORDNAT SKYDD AV SPRÄNGSTEN.....	49
5.2	OORDNAT SKYDD AV BETONGBLOCK.....	49
5.3	ORDNAT STENSKYDD ENLIGT NORSK MODELL	49
5.4	KOPPLADE BETONGBLOCK MED BAKÅTFÖRANKRING (1)	50
5.5	ÄSFALTSTABILISERAD STENFYLLNING	50
5.6	GEOTEXTILMADRASSER	50
5.7	VÄLTBETONG	50
5.8	FLACK SLÄNT (STRAND) AV SAND, GRUS ELLER STEN.....	51
5.9	KOPPLADE BETONGBLOCK MED BAKÅTFÖRANKRING (2)	51
5.10	KOPPLADE BETONGELEMENT AV PARAPETMODELL	51
5.11	UNDERHÅLL AV BEFINTLIGA EROSIONSSKYDD	52
6	KOSTNADER.....	53
6.1	ALLMÄNT.....	53
6.2	KOSTNADSJÄMFÖRELSE	54
6.3	SENSITIVITET, VARIANTER OCH FELKÄLLOR	55
7	VÄRDERING UR MILJÖSYNPUNKT	57
8	SLUTSATSER	59
9	REFERENSER.....	61

Bilagor

A BILAGA 3.1 - LITTERATURSÖKNING VID KTHS BIBLIOTEK

B BILAGOR 5.1 – 5.11 SLÄNTSKYDD

DATABLAD

1 Orientering

1.1 Problemet

Erosionsskydden på uppströmsslänten av ett stort antal svenska fyllningsdammar har visat sig ha relativt begränsad livslängd, vilket inneburit att täta och ganska kostsamma underhålls- och förbättringsåtgärder krävts. Framförallt gäller detta dammar byggda i fjällkedjan där sprängstenen i erosionsskydden ofta är relativt svagt på grund av en betydande förskiffring i bergarten. Problemet är kanske i första hand av ekonomisk natur, men dammsäkerhetsmässig påverkan kan inte uteslutas.

1.2 Uppdraget

I månadsskiftet oktober-november 1996 erhöll VBB Anläggning AB i uppdrag av Elforsk AB att utreda alternativa metoder för att erosionsskydda uppströmsslänten på svenska fyllningsdammar i områden där bra berg inte finns att tillgå (Elforsk proj-1175, beställning daterad 1996-10-29).

Uppdraget innefattar i första hand en inventering av de metoder som används i andra delar av världen för erosionsskydd i liknande applikationer samt diskussion och värdering av deras eventuella användbarhet för svenska förhållanden ur teknisk, ekonomisk och miljömässig synvinkel. Resultatet av inventeringen och en första granskning presenterades i en preliminär rapport under april 1997. Efter diskussion med beställaren har därefter ett antal metoder som bedöms kunna ha intresse för svenska dammar valts ut för en noggrannare värdering..

1.3 Föreliggande rapport

Föreliggande handling utgör projektets slutrapport. Rapporten innefattar även materialet från den preliminära rapporten i delvis omarbetad form.

Rapporten är disponerad så att en teoretisk grund tecknas i kapitel 2 genom att aktuella brottmoder beskrivs, varefter dimensioneringskriterier och dimensioneringsmetoder diskuteras med avseende på lämplighet och tillräcklighet. Tre olika typfall definieras. Resultatet av den företagna inventeringen av olika slags erosionsskydd presenteras i strukturerad form i kapitel 3. I kapitel 4 ges därefter en översiktlig preliminär värdering av dessa metoders tekniska användbarhet för svenska fyllningsdammar. De metoder som bedömts ha störst potential för svenska dammar beskrivs mer utförligt i kapitel 5 avseende tekniska egenskaper och i kapitel 6 avseende kostnader. Miljöaspekter behandlas i kapitel 7 och slutliga rekommendationer återfinns i kapitel 8.

Arbetet har utförts av en grupp bestående av följande personer:

Dick Johansson	VBB Anläggning
Karl-Erik Löwén	Skanska
Åke Nilsson	VBB Anläggning
Karl Rytters, proj.ledare	VBB Anläggning
John-Erik Thoreheim	Skanska
Per Vallander	VBB Anläggning

2 Funktionskrav och dimensioneringskriterier

2.1 Projekteringsmål och -metoder

Erosionsskydd för fyllningsdammar skall utformas så att de medverkar till att åstadkomma en **god dammsäkerhet**. De allmänna förutsättningarna för projektering av erosionsskydd ges ur denna synvinkel av Vattenlagen (1983:291) med senare revideringar. Krav på vind- och vågtålighet anges även i Flödeskommitténs Riktlinjer (1990) och ämnet behandlas vidare i Elforsk/VASO dammkommittés utrednings- och utvecklingsprojekt (rapport nr 11, 1995) och i Tillämpningsföreskrifterna till Riktlinjer för Dammsäkerhet, RIDAS (1998).

Med *dammsäkerhet* menas vanligen säkerheten mot potentiellt skadeframkallande okontrollerad utströmning från det av dammen uppdämda magasinet. De specifika dammsäkerhetsmässiga kraven för ett visst erosionsskydd beror på den aktuella dammens konsekvensklass, som speglar graden av den förväntade skadan av ett postulerat dammbrott.

Principen för de dammsäkerhetsmässiga dimensioneringsreglerna är att vissa specificerade, men mycket sällan förekommande yttre laster skall kunna motstås utan att dammsäkerheten äventyras, dvs utan dammbrott, medan däremot mindre skador som dock kräver reparationer kan tillåtas inträffa. Underförstått är då antagandet att skador orsakade av mer ofta förekommande laster blir tolerabla ur dammsäkerhetssynvinkel. Det förutsätter naturligtvis att underhållet är gott.

Ett annat dimensioneringsmål borde naturligtvis vara **god ekonomi**. Hittills har emellertid dimensionering i praktiken utförts endast för de dammsäkerhetsmässigt dimensionerande förhållandena, varefter man utan särskild utredning antagit att även kraven på låga livstidskostnader därmed skulle tillgodoses. Erfarenheten visar att detta antagande kan ifrågasättas. Det verkar klart att gradvisa processer som löper över flera år och därför inte behöver innebära oacceptabla dammsäkerhetsrisker trots allt kunnat ge upphov till relativt höga underhållskostnader.

En tredje dimensioneringsmål är **god miljö**, dvs erosionsskyddens eventuella negativa eller positiva miljöpåverkan bör belysas och i förekommande negativa fall begränsas genom modifieringar eller alternativa utformningar. Det är en rad aspekter som bör beaktas. Alltifrån estetiska frågor avseende själva erosionsskydden till frågor om ingrepp i omgivningen, t ex öppnande av nya bergtag, emissioner i luft eller vatten orsakade antingen av byggprocessen eller av erosionsskyddet i sig självt. Nya och ortfrämmande material bör granskas särskilt avseende miljöpåverkan. Även miljöns inverkan på erosionsskydden kan behöva belysas. Svensk miljölagstiftning har under senare år befunnit sig under omarbetning.

Även dammägarens specifika förutsättningar och målsättningar kan leda till att olika krav kan ställas på erosionsskydd. Beroende på tillgången på underliggande basmaterial, utredningar och kompetens kan t ex olika projekteringsförfaranden vara lämpliga.

Förenklade, standardiserade projekteringsmetoder kräver som regel större säkerhetsmarginaler. Även med hänsyn till dammägarens driftorganisation kan utformningar med olika krav på underhåll vara att föredra.

Allmänt sett bör man kräva att olika erosionsskydds förmåga att på ett dammsäkerhetsmässigt acceptabelt sätt (dvs eventuellt med vissa skador) motstå olika förekommande dimensionerande belastningar skall vara *verifierade*.

Verifiering kan för en del belastningar (t ex vågor) ske på ett effektivt sätt i *laboratieförsök*, men för till exempel is- och annan klimatpåverkan har man i huvudsak utnyttjat *långvarig fälterfarenhet*.

I övrigt blir man hänvisad till *teoretiska beräkningar och bedömningar*, vilket kan kräva rätt stora säkerhetsmarginaler. Det behöver för den skull inte innebära extra kostnader - en lyckad fältmässig verifiering kan ju också innehålla stora marginaler, därom vet man ofta inte särskilt mycket.

Om man däremot vet att erosionsskyddets sammanbrott är en utdragen process (dvs segt brott) som kräver längre tid än t ex ett enda stormtillfälle kan marginalerna å andra sidan minskas.

Den samlade *svenska* erfarenheten av erosionsskydd är naturligtvis störst när det gäller just skydd av oordnad sprängsten och den kanske uppgår till några tusen dammår. Erfarenheten är inte enbart god beträffande skyddens funktion. Ganska omfattande skador har inträffat. Å andra sidan finns, så vitt bekant, inget enda fall av fullständigt dammbrott orsakat av bristande funktion hos erosionsskyddet på en fyllningsdamms uppströmsslänt. Underhållet verkar således ha varit dammsäkerhetsmässigt acceptabelt och bristerna kanske i första hand av ekonomisk natur.

Den samlade *norska* erfarenheten sedan början av 1970-talet, då man i Norge på grund av dåliga erfarenheter övergav de erosionsskydd av oordnad sprängsten som tidigare använts (och även fortsättningsvis användes bl a i Sverige) är betydligt mer övertygande beträffande skadefrihet. Den omfattar endast några hundra dammår, men bygger å andra sidan på en traditionell norsk utformning av strandskydd vid mindre älvmynnningar och hamnanläggningar utmed havet.

Man bör söka beräkna totalkostnaderna för erosionsskydd av olika slag för att kunna välja det (inom ramen för övriga dimensioneringskrav) ekonomiskt mest fördelaktiga. Både investeringskostnader och underhållskostnader bör således beaktas. I investeringskostnaderna ingår administrations-, projekterings- och byggkostnader och naturligtvis kostnader för eventuella miljöbetingade åtgärder. Däremot utelämnas i denna utredning eventuella riskkostnader, eftersom det förutsätts att samtliga lösningar uppfyller gällande dammsäkerhetskrav och därmed ger jämförbar och hög säkerhet.

2.2 Brottmekanismer

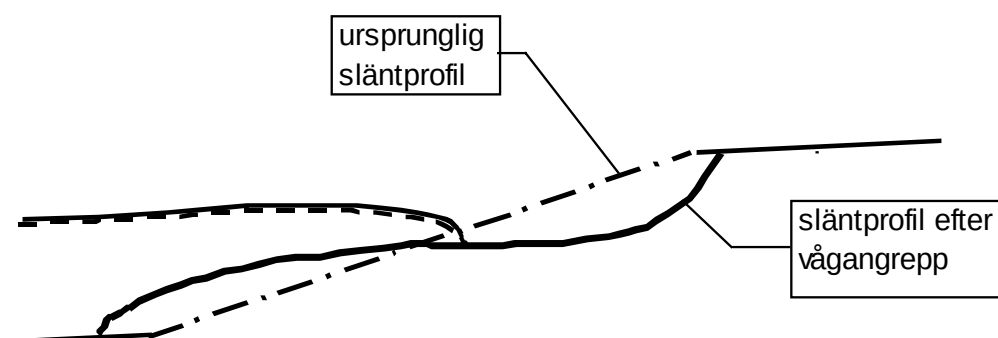
Modern litteratur om erosionsskydd [1] redovisar ett antal olika processer eller brottmekanismer som påverkar släntskydd i vatten:

- | | |
|---------------|----------------|
| -sättning | -inre erosion |
| -lyftning | -yttre erosion |
| -glidning | -fluidisering |
| -liquefaction | |

Flera av dessa processer kan initieras i erosionsskyddets undergrund (dvs den underliggande dammkroppen) utan direkt inverkan av erosionsskyddet, medan andra kan påverka själva erosionsskyddet eller dess underliggande övergångslager. Lyftning och liquefaction orsakas av höga tillfälliga (cykliska) portryck medan fluidisering orsakas av höga portrycksgradienter. I verkligheten sker brott i erosionsskydd ofta genom summainverkan av flera av dessa brottmoder.

Vissa typer av brott är så gott som momentana (t ex liquefaction) medan andra inleds med en mindre skada som efter hand växer till. Olika typer av erosionsskydd uppvisar olika snabb eller långsam skadeutveckling efter en första initialskada. Typiskt är att skydd som utnyttjar samverkan genom sammankoppling eller friktion mellan olika delelement uppvisar en snabb och accelererande skadeutveckling efter initialskada.

Däremot brukar erosionsskydd av oordnade block i flera lager anses ha en med tiden avtagande skadeutveckling. Det bygger dels på att en viss redundans föreligger, dels på att vågor och is tenderar att omfördela en från början jämn släntlutning till en S-kurva som är mer stabil, se **figur 2.1** nedan. Det senare resonemanget förutsätter dock att denna omfördelning är dammsäkerhetsmässigt acceptabel, vilket med traditionell utformning av svenska dammar är tveksamt.



Figur 2.1 Typisk omlagring av en slänt utsatt för vågor

2.3 Projekteringsförutsättningar

Man kan uttrycka förutsättningarna för val och dimensionering av erosionsskydd genom en rad faktorer som är eller i varje fall kan vara väsentliga. Dessa faktorer förtecknas här i form av en *checklista*. De flesta faktorerna är materiella eller fysikaliska till sin natur och inverkar på förekommande belastningar:

a. erosionsskyddets läge

- geografiskt läge inkl stryklängd för vindvågor
- geologiska och geotekniska förhållanden
- underlagets (dvs som regel dammens) egenskaper såsom
 - släntlutning
 - slänthöjd över terrassplan, närhet till dalsidor
 - genomsläpplighet
 - råhet
 - erosionsbenägenhet (yttre, inre)

b. klimat

- vindhastighet
 - vågstorlek (våghöjd och vågperiod)
 - vågbrott
 - våguppspolning
 - vattenytans denivellering (seicher)
- temperaturvariationer
 - frostsprängning
 - isläggning
 - kravning
 - nötning
- ultraviolett (UV)strålning
- luft och luftföroreningar
 - oxidation
 - försurning
 - vittring
 - andra kemiska processer

c. annan yttre påverkan

- vattennivåvariationer
 - regleringstyp
 - regleringshöjd
 - regleringshastighet
 - tillfällig överdämning
- vattenströmning
 - hastigheter
 - turbulens
- biologisk påverkan
 - beväxning (mossa, gräs, buskar, träd)
 - skador orsakade av djur
 - skadegörelse orsakade av människor (sabotage, slitage)

d. icke-materiella faktorer

lagar och riktlinjer beträffande dammsäkerhet
 miljölagstiftning
 patent och mönsterskydd
 dammägarens målsättning (policy)
 speciella projekteringsförutsättningar
 ekonomi

2.4 Typfall

För att underlätta en rationell och relevant värdering av olika metoder för erosionsskydd av dammar i denna rapport har tre olika situationer, typfall, definierats, som relativt väl bedöms täcka de varierande förhållandena vid nu existerande svenska dammar.

Dessa tre typfall skiljer sig åt beträffande storlek på *dimensionerande signifikant våg*, som för typfall A antagits till 0,5 m, för typfall B 1,0 m och för typfall C 2,0 m. I samtliga fall antas den befintliga dammens släntlutning vara 1V:2H och bestå av oordnad sten med otillräcklig blockstorlek. Tänkt geografiskt läge är i mellersta eller övre Norrland, i direkt anslutning till fjällkedjan. För att man skall få en rimlig inverkan av initialkostnaderna antas den aktuella dammslätten ha en längd av 300 m.

2.5 Dimensionering avseende vågor**2.5.1 Vågspektra**

Under en och samma storm varierar vågornas storlek på en och samma plats trots konstant vindhastighet. Man använder olika statistiska begrepp för att karakterisera naturliga vågors storlek, exempelvis signifikant våghöjd H_s , som är medelhöjden av de 33 % högsta vågorna under aktuella förutsättningar, och signifikant vågperiod T_s , som är medelperioden för dessa vågor. Våghöjden H_{10} , anger medelhöjden för de 10 % högsta vågorna med sambandet $H_{10} = 1,27 \cdot H_s$ i ett naturligt vågspektrum. Man kan notera att $H_{33} = H_s$.

2.5.2 Effektiv stryklängd

För att man nöjaktigt skall kunna beräkna förekommande vågors storlek krävs också en uppfattning om den effektiva stryklängden. En acceptabel metod för beräkning av effektiv stryklängd och signifikant våghöjd på svenska vattenmagasin beskrivs i ett par rapporter [2], [3] från VASO dammkommitté. Man bör dock ha klart för sig att metodiken ingalunda är exakt och dessutom föremål för diskussion.

I vissa fall kan det vara lämpligt eller t.o.m. nödvändigt att utföra en noggrannare vågberäkning där hänsyn även tas till läverkan eller lokal vindförstärkning, refraktion, diffraktion och vattendjupets inverkan i övrigt.

Den effektiva stryklängden avseende vindgenererade vågor ligger för svenska dammar vanligen inom intervallet 0-5 km.

2.5.3 Dimensionerande vindhastighet

Två lastfall för dimensionering av fribord och erosionsskydd finns angivna i den svenska facklitteraturen. Det första fallet, här betecknat Fall 1, avser dimensionerande vindhastighet som uppträder i kombination med dimensionerande flöde. Det andra dimensioneringsfallet, Fall 2, avser dimensionerande vindhastighet under i övrigt normala hydrologiska förhållanden, dvs utan samtidigt stort flöde och med magasinets vattenyta vid den normala dämningsskärningen.

Vindhastigheter för Fall 1 ges av Tillägg nr 2 till Flödeskommitténs Riktlinjer på basis av undersökningar av Hans Alexandersson [4]. Fall 2 bygger på undersökningar av Haldo Vedin [5].

För båda dimensioneringsfallen utgår man från vindar med en varaktighet av 10 minuter uppmätta över land, och schablonmässigt korrigerade för att det för dammar rör sig om vindar över vatten. Ingen hänsyn har tagits till inverkan av lokal topografi vid dammarna. De anvisade vindhastigheterna för Fall 1 och Fall 2 framgår av **tabell 2.1**.

Tabell 2.1 Vindhastigheter för dimensionering av erosionsskydd och fribord

Terrängtyp	Rekommenderad vindhastighet (m/s)	
	Fall 1	Fall 2
I hög fjällterräng	25	29-33
I övrigt	20	25-28

För en effektiv stryklängd på 5 km krävs ca 30 min vindvaraktighet för att skapa fortvarighetstillstånd. För stryklängden 1,5 km måste vindvaraktigheten uppgå till ca 15 min för att fortvarighetstillstånd skall uppnås. För kortare stryklängder blir vågkrafterna knappast dimensionerande.

En vindhastighet motsvarande 45 à 90 minuters varaktighet vore därför kanske mer relevant för dimensionering av erosionsskydd än 10-minutersvindarna. Det skulle vara tillräckligt för att utsätta erosionskyddet för vågornas fulla kraft under ca 30 à 60 minuter. Eftersom aktuella vågperioder ligger inom intervallet 3-5 sekunder, innebär det att 600-700 vågor skulle genereras under detta fortvarighetstillstånd. Om man även inkluderar delar av uppbyggnadsskedet och avklingningstiden kan man i runda tal skatta antalet vågor till 1000. Man kan rent statistiskt förvänta att av dessa vågor skulle omkring 130-140 vara högre än H_s , 30-40 högre än $1,3 \cdot H_s$ och ca 3 vågor högre än $1,7 \cdot H_s$. Den högsta av vågorna kan förväntas vara ca 1,9 gånger högre än den signifikanta våghöjden H_s .

1-timmesmedelvärdet på vindhastigheterna kan grovt uppskattas vara 10 à 15 % eller 1,5-3 m/s lägre än 10-minutersvindarna.

För Fall 1 kan de i tabell 2.1 ovan föreskrivna vindarna tyckas vara något höga och en reduktion med 5-10 % kan övervägas med hänsyn till den antagna längre varaktigheten.

Norska bestämmelser föreskriver särskild utredning om vindhastigheterna i dammläget. Dock får dimensionerande vind inte sättas lägre än 30 m/s.

Vindhastigheterna för Fall 2 uppges i [5] ha en återkomsttid av 50-100 år. Ur dammsäkerhetssynpunkt är denna återkomsttid definitionsmässigt otillräcklig som kritiskt dimensioneringsfall i brottstadiet, eftersom man kräver högre dammsäkerhet. Det vore rimligare att använda vindhastigheten 35 m/s i Fall 2 för dammar i hög fjällterräng och vindhastigheten 30 m/s i Fall 2 för dammar i övriga lägen. Dessa vindar avser då skattade 10.000-årsvindar med ca 1 timmes varaktighet.

2.5.4 Fribord

Våghöjder

Det är rimligt att dimensionera fribordet för uppspolningen av den högsta förväntade vågen under dimensionerande förhållanden, dvs $H_{0,1}$ -vågen, om dammen är speciellt känslig för överspolning, t ex på grund av lättroderat material i dammkrönet, eller på grund av att krönet utgör en dammsäkerhetsmässigt väsentlig tillfartsväg utan redundans eller därför att andra dammsäkerhetsmässigt väsentliga installationer är så belägna att de skulle kunna slås ut av en våg.

För dammar med mycket gott krönskydd och där dammkrönet inte utgör en nödvändig tillfartsväg borde emellertid fribord för uppspolning kunna räknas utifrån H_1 -vågen. Det innebär då att ungefär 5 á 10 vågor kan förväntas överskrida fribordet under en dimensionerande storm.

Ovan angivna *våghöjder* skall inte sammanblandas med *vågornas uppspolning*, som beror även på den aktuella släntens egenskaper.

Uppspolning

Med *uppspolning* menas det vertikala måttet från lugnvattenytan till den högsta punkten på en slänt dit en våg når. Det saknas heltäckande och övertygande mätningar avseende vågors uppspolning mot slänter av grovt material. Mot en slänt på en fyllningsdamm beror uppspolningen på både släntens lutning, råhet och i någon mån även på dess permeabilitet.

För en slänt med erosionsskydd av oordnade stenblock av lämplig storlek (dvs ej graderat material) visar Van der Meers undersökningar att man för slänter med lutning 1V:1,8 á 2,0H kan påräkna en uppspolning av $H_{0,1}$ -vågen på ca $2,1H_S$ medan H_1 -vågen

ger en uppspolning på ca $1,85H_s$. Dessa båda värden korresponderar med de ovan föreslagna dimensioneringskriterier för dammar med dåligt resp. gott krönskydd.

För motsvarande slänter av andra material kan uppspolningen grovt skattas med hjälp av en korrektionsfaktor k med utgångspunkt från uppspolningen för en slänt av tippade ensartade stenblock enligt följande:

Material	k
slät yta	1,7-2,0
stenmur	1,6-1,9
geotextilmattor	”
öppen stenasfalt	”
ordnade block av	
sten eller betong	1,4-1,7
gabioner	1,2-1,4
ordnade ensartade stenblock	1,0

Mot en vertikal vägg reflekteras vågorna. Största uppspolning fås om vågorna kommer in vinkelrätt mot den vertikala väggen. Då uppkommer en stående våg med dubbla våghöjden. Mätt från lugnvattenytan innebär det en uppspolning av $1,8-2,1 H_s$ beroende på val av dimensionerande våg enligt resonemanget ovan.

2.5.5 Vågkrafter

För dimensionering av erosionsskydd av sten används antingen blockvikten i luft, M , eller något slags blockdiameter, D , för att karaktärisera de ingående blocken i erosionsskyddets ytskikt. Blockvikt är ett entydigt begrepp, vilket inte är fallet med blockdiametern. Blockdiameter definieras vanligen genom uttrycket

$$D = (M/c_b \rho_b)^{1/3} \quad (1)$$

där ρ_b anger blockens densitet och c_b är en formfaktor. För helt kubiska block antar c_b värdet 1,0. **Sidlängden hos kubiska block med viss vikt kallas vanligen nominell blockdiameter och betecknas D_n .**

Vanligen ligger emellertid c_b inom intervallet 0,4 och 0,8 för sprängsten beroende på bergart och sprängteknik. **När termen blockdiameter D (utan tillägget nominell) används i denna rapport menas den diameter som block med viss vikt får med $c_b=0,6$ i ekvation (1).**

Versaler används för att beskriva block i ytskiktet och gemena för att beskriva material i underliggande skikt (övergångslager).

Hudsons formel

För slänter uppbyggda av sten eller olika slags betongelement finns ett empiriskt samband mellan erforderlig blockstorlek och vågstorlek enligt Hudsons ekvation, se Shore Protection Manual, 1977 [6]:

$$M = \frac{\rho_b H^3}{K \Delta^3 \cot \beta} \quad (2)$$

där	M	=	blockvikt, kg
	ρ_b, ρ_w		densitet för block respektive vatten, kg/m ³
	H		dimensionerande våghöjd, m
	K		dimensionslös konstant
	Δ		$(\rho_b / \rho_w - 1)$
	β		släntlutning, grader

Ekvationen är bestämd genom omfattande och systematiska modellförsök, de flesta i liten skala, men med en del kontroller genom försök med stor skala. Man har använt block av en enda storlek, dock uppges en variation med ca ± 8 % i medeldiameter eller ± 25 % i vikt vara acceptabel. Kompletterande försök med ett mer graderat material bekräftar att graderingen i huvudsak måste leda till avvikelser uppåt i blockvikt (tillåten viktvariation från -25 % till +80 %).

Modellförsöken utfördes i laboratorium *med likformiga vågor* alstrade i en ränna. Man bedömde att resultaten var användbara även för vågor med utbrett spektrum. Både brytande och svängande vågor undersöktes.

I Shore Protection Manual 1984 [7] rekommenderas att H_{10} används som dimensionerande våghöjd i ekvation (2). I tidigare utgåvor av SPM rekommenderades användning av H_s som dimensionerande våghöjd. Man skärpte således kraven i och med 1984 års utgåva. Norska bestämmelser föreskriver att ekvation (2) används med $H = 1,3 H_s$, dvs ungefär $H = H_{10}$ i överensstämmelse med SPM 1984.

Värdet på konstanten K i Hudsons ekvation visade sig bero på blockens form, kantighet, inbördes samverkan, på släntytans råhet samt naturligtvis på graden av accepterade skador. Försöken fick pågå för varje angripande våghöjd tills slänten efter skador stabiliserats i ett nytt jämviktsläge. Skadornas omfattning beskrevs som volymandelen förskjutet erosionsskydd.

I 1984 års utgåva av SPM rekommenderas för erosionsskydd av oordnad, kantig sprängsten vid släntlutningar mellan 1V:1,5H och 1V:5H förutsatt två lager block lagda på lämpligt underlag, ett värde av $K = 4,0$ vid icke brytande vågor och $K = 2,0$ vid brytande vågor. Den stenstorlek som kan beräknas med ekvation (2) skulle då vara tillräcklig för att garantera ”ingen skada” på erosionsskyddet, vilket anses uppnått om erosionsskadan omfattning inte överstiger 5 %. I tidigare utgåvor av SPM rekommenderades för erosionsskydd av oordnad, kantig sprängsten $K = 4,0$ vid icke brytande vågor och $K = 3,5$ vid brytande vågor.

I och med 1984 års utgåva av SPM skärpte man således kraven både avseende dimensionerande våghöjd H och värdet på konstanten K .

K -värden för Hudsons ekvation finns framtagna även för rundad sten, kantig sten lagd i ordnad fyllning/förband och för olika typer av förtillverkade betongblock.

Van der Meers formel

Ibland väljer man att samla faktorerna i ekvation (2) till ett stabilitetstal (N_S) definierat av Van der Meer [8] på följande vis:

$$N_S = (K \cot \beta)^{1/3} = H_s / (\Delta D_{n50}) \quad (3)$$

där $D_{n50} = (M_{50} / \rho_b)^{1/3}$ nominell blockdiameter för kubiska block,
50 % -fraktionen

Stabilitetstalet kan då enligt van der Meer beräknas på följande vis för relativt branta slänter:

$$N_S = H_s / (\Delta D_{n50}) = 6,2 P^{0,18} (S_d / \sqrt{N})^{0,2} \xi_m^{-0,5} \quad (4)$$

där	P	=	permeabilitetsparameter
	S_d	= A_e / D_{n50}^2	skadeparameter
	A_e		erosionskada, m^2
	N		antalet vågor
	ξ_m	= $T_m \tan \beta (g / (2\pi H_s))^{1/2}$	branthetsparameter
	T_m		medelvågperiod
	g		jordaccelerationen, m/s^2

Ekv (4) förutsätter att branthetsparametern ξ_m ligger i intervallet 1 till 3 (brytande vågor). Erosionsskadans omfattning är definierad i släntens vertikalsektion som arean av borteroderat material i närheten av (över och under) den aktuella lugnvattenytan och skadeparametern relaterar erosionsskadan till aktuell blockstorlek. För slänthlutningar mellan 1V:1,5H och 1V:2H uppges ett värde av $S_d = 2$ uppges motsvara "initieell skada", $S_d = 3$ à 6 "mellanstor skada" och $S_d = 8$ "kollaps" svarande mot förlust av erosionsskyddets funktion därför att underliggande filterlager blottas. Värdet $S_d = 2$ uppges också motsvara den erosion som skulle uppstå vid dimensionering med Hudsons ekvation, dvs 0 - 5 % skada.

Permeabilitetsparametern (P) varierar för tänkbara utföranden mellan 0,1 och 0,6 med lägre värde ju närmare släntytan ett tätt material finns. Skillnaden i erforderlig nominell blockdiameter D_{n50} mellan dessa båda extremvärden är enligt ekvation (4) betydande, ca 38 %. För erosionsskydd på fyllningsdammar med en tjocklek av ca $2,5D_{n50}$ och med ett underliggande filter av tjockleken $0,5D_{n50}$ gäller det lägsta och minst förmånliga värdet, dvs $P = 0,1$.

Det är klart att hittills utförda släntskydd på svenska dammar inte uppfyller detta väsentliga krav på permeabilitet på grund av användning av graderat finare material i eller nära erosionsskyddens yta.

Branthetsparametern (ξ_m) relaterar den aktuella släntens lutning till angripande vågors branthet. Parametern kan vid effektiva stryklängder upp till ca 5 km sättas till 2,2, men kan avvika från detta värde om magasinet är grunt och/eller släntlutningen avviker markant från 1V:2H.

Ekvation (3) gäller för vågor med naturligt spektrum och endast för ett tämligen ensartat material. För vidare graderingar rekommenderas modellförsök.

För erosionsskydd av oordnad sprängsten på svenska fyllningsdammar kan således ekvation (3) *vanligen* förenklas till följande ungefärliga uttryck (med $P = 0,1$ och $\xi_m = 2,2$) under förutsättning att endast grovt material enligt ovan används:

$$M_{50} = 0,030 \rho_b H_s^3 N^{0,3} / \Delta^3 \quad \text{vid skadefrihet (} S_d=2 \text{)} \quad (5)$$

$$M_{50} = 0,015 \rho_b H_s^3 N^{0,3} / \Delta^3 \quad \text{vid brott (} S_d=8 \text{)} \quad (6)$$

Dimensionerande vindförhållanden för svenska fyllningsdammar har ovan antagits ha en varaktighet motsvarande angrepp av 1000 vågor. Man kan också tänka sig att erosionsskyddet varit utsatt för en del stora några vågor tidigare och därför bör man *kanske* anta ett totalt vågangrepp motsvarande säg 2000 vågor för att inte ställa orimliga krav på underhållet. Enligt tillgängliga testresultat uppnås i praktiken jämvikt efter angrepp av ca 7500 vågor, vilket således är en tredje tänkbar dimensioneringsförutsättning. Ekvation (5) och (6) ger med detta tredje antagande ($N = 7500$) följande krav på blockvikt för en stenfyllning:

$$M_{50} = 0,45 \rho_b H_s^3 / \Delta^3 \quad \text{vid skadefrihet (} S_d=2 \text{)} \quad (7)$$

$$M_{50} = 0,20 \rho_b H_s^3 / \Delta^3 \quad \text{vid brott (} S_d=8 \text{)} \quad (8)$$

Diskussion

En direkt jämförelse mellan blockvikter beräknade med ekvation (2) och ekvation (7) är möjlig för en fyllning av oordnad sten med blockstorlekar inom ett relativt snävt intervall. I **tabell 2.2** visas erforderlig blockvikt beräknad med ekv (2) med olika värden på parametrarna H och K .

Tabell 2.2 Erforderlig blockvikt, M_{50} , enl ekv (2) med olika ingångsvärden på dimensionerande våghöjd H och konstant K . Brytande vågor, släntlutning 1V:2H.

Referens	H	K	M_{50}
SPM 1984	$1,27 \cdot H_s$	2,0	$0,50 \cdot \rho_b H_s^3 / \Delta^3$
SPM 1977	H_s	3,5	$0,15 \cdot \rho_b H_s^3 / \Delta^3$

Det visar sig att ekvation (2) med användande av rekommenderade parametervärden enl SPM 1984 ger ungefär samma resultat som ekvation (7). Med tidigare rekommenderade parametervärden enl SPM 1977 fås ungefär samma resultat som med ekv (8). Van der

Meers undersökningar bekräftar således mer eller mindre Hudsons ursprungliga formel enligt SPM 1977, som faktiskt just avsåg att bestämma brottgränsen!

Nya kanadensiska riktlinjer [9] rekommenderar användning av Hudsons formel med $H = H_s$ och $K=1,75$ för dimensionering vid brottgräns, dvs $M_{50} = 0,30 \rho_b H_s^3 / \Delta^3$.

Som nämnts föreskriver norska bestämmelser att ekvation (2) används med $H = 1,3 H_s$. Eftersom man i Norge använder individuellt placerade och samverkande block gäller dock helt andra värden på parametern K . Det förefaller som om de norska bestämmelserna innehåller betydande marginaler. Det är inte orimligt med en sådan säkerhetsmarginal just för den norska varianten av erosionsskydd med tanke på att en mindre skada snabbt skulle kunna leda till total förlust av funktionen hos skyddet.

Det följer vidare av en jämförelse mellan ekvation (7) och (8) att skadefrihet kan påräknas så länge ett erosionsskydd dimensionerat enligt ekvation (7) inte utsätts för högre vågor än:

$$H \leq (0,20 / 0,45)^{1/3} H_{\text{dim}} = 0,75 H_{\text{dim}} \quad (9)$$

Det motsvarar ganska exakt samma andel av den dimensionerande vinden förutsatt samma varaktighet. Med de här antagna dimensionerande vindarna i Fall 2 och dimensionering enligt ekvation (7) kan blocken i korrekt utförda erosionsskydd av tippad sprängsten förväntas bli stabila och skadefria (egentligen med 0-5 % skador) för alla vindar upp till 5-10 % över beräknade 50-100 årsvindar. Det är ett tämligen rimligt resultat som erfarenhetsmässigt pekar på nära optimal ekonomisk dimensionering.

Om man istället inskränkt det dammsäkerhetsmässiga dimensioneringskravet till säg 2000 vågor före brott enligt resonemanget ovan skulle erforderlig stendiameter minska med 12 % men skador skulle uppkomma vid vågor och vindar över ca $0,60 H_{\text{dim}}$, ungefärligen motsvarande en 50-årsvind med samma varaktighet. Inte heller detta är orimligt. Antagandet om antalet angripande vågor visar sig således inte vara av särskilt väsentlig betydelse.

Den rimliga slutsatsen av denna diskussion är att blockvikt (M_{50}) för släntskydd av oordnad sprängsten bör väljas enligt Van der Meers formel, ekvation (7) eller enligt Hudsons formel med $H=1,27H_s$ och $K=2,0$.

Det förtjänar påpekas att ovanstående diskussion och rekommendation avser endast erosionsskydd med blockvikter inom intervallet 0,75-3,0 gånger blockvikten (M_{50}) enligt ekvation (2) eller (7). Det yttre skiktet av sprängsten skall ha en tjocklek (vinkelrätt mot slänten) av $T\beta 2,5D_{n50}$ och placeras på ett (internt stabilt) övergångslager av sten och grus med $d_{85}\beta D_{15}/5$ och med tjockleken $t\beta 0,5D_{n50}$ som vid behov i sin tur placerats på filter uppfyllande vanliga filterregler mot dammkroppen.

Ett särskilt problem finns när det gäller den nedre avslutningen av erosionsskyddet. Vanligen föreskrivs att skyddet skall dras ned minst $2H_s$ under lägsta förekommande lugnvattenyta. (Obs att H_s pga mindre stryklängd eventuellt är mindre än vid dämningssgräsen.) På lägre nivåer kan material med mindre blockstorlek användas.

Eftersom glidning längs cirkulär cylindriska glidytor eller längs lagergränser mellan erosionsskyddets ytskikt, underlag eller dammkroppen är en tänkbar brottsorsak kräver utformningen av erosionsskyddets tå särskild uppmärksamhet. Det gäller för erosionsskydd av tippad sprängsten men i ändå högre grad för andra tunnare typer av erosionsskydd, som vid aktuella släntlutningar ibland överför laster till tåkonstruktionen. Denna fråga tycks inte vara generellt behandlad.

2.6 Dimensionering avseende is

Inverkan av frost, is och låga temperaturer på erosionsskydd innefattar bl a följande effekter:

minskad hållfasthet i undergrunden vid tjällossning
risk för deformationer pga tjälskjutning
krafter pga isens expansion/kontraktion vid temperaturändringar
inbördes förskjutningar mellan olika konstruktionselement och frostsprängning vid upprepade frysning/tining
krafter orsakade av is i rörelse
ökad vikt pga is på erosionsskydd ovan vattenytan
minskad vikt pga is på erosionsskydd under vattenytan
inverkan av låg temperatur på olika syntetmaterial, t ex geotextilier
minskad genomsläpplighet (filterverkan) vid tjäle/isbildning

Istäcket på ett vattenmagasin kan som bekant besitta en avsevärd styrka och därigenom också utgöra en potentiell fara för erosionsskydd på en damms uppströmsslänt.

Tryckhållfastheten för färsk sjöis ökar med stigande töjningshastighet och ligger inom intervallet $\sigma_t = 1 - 10 \text{ Mpa}$ för töjningshastigheter under 10^{-2} s^{-1} , men kan bli flerfaldigt högre vid snabbare förlopp [10]. Motsvarande typiska värden avseende draghållfasthet är $\sigma_d = 0,7 - 2 \text{ Mpa}$, avseende böjdraghållfasthet $\sigma_b = 0,4 - 1,5 \text{ Mpa}$, medan E-modulen vanligen ligger vid ca $E = 90\,000 \text{ MPa}$.

Med ledning av dessa värden kan man beräkna att den potentiellt möjliga horisontella tryckkraften av ett 1 m tjockt istäcke på en bred vertikal konstruktion vida överstiger 1 MN/m (ca 100 ton/m). Uppskattningar baserade på mätningar i fem svenska sjöar av Bergdahl och Wernersson som rapporterats i [11] pekar på troliga 100-årsvärden i Sverige på 0,3 - 0,5 MN/m, dvs 30-50 ton/m. Inverkan av lutande stränder kan göra att isen inte får effektivt mothåll, varför man inte uppnår potentiella högsta tryck ens mot en vertikal yta. Mot en lutande yta (1V:2H) med en friktionskoefficient mot is av $\mu = 0,1 - 0,5$ blir den potentiella horisontella tryckkraften under samma förhållanden 0,08 - 0,16 MN/m, dvs 8-16 ton/m.

Ett istäcke kan även frysa fast/häfta vid en begränsande konstruktion och utöva avsevärda dragkrafter vid t ex kontraktion. Vidhäftningen är betydande och krafterna begränsas i praktiken dels av isens egen hållfasthet [10,12] vilket skulle innebära att ett 1 m tjockt istäcke skulle kunna ge upphov till dragkrafter av 0,5 - 1,0 MN/m eller 50 - 100 ton/m, och dels av svagheter (sprickor) i istäcket med lägre hållfasthet. På motsvarande sätt kan stora moment och nedåtriktade krafter uppkomma vid sjunkande

vattenyta och motsvarande uppåtriktade tilläggskrafter vid stigande vattenyta. Det senare är dock inte ett särskilt vanligt förekommande lastfall, eftersom stigande vattenytor som regel endast förekommer på vintern i samband med korttidsreglering och det förefaller tveksamt om isen hinner bygga upp tillräcklig styrka och vidhäftning.

En enkel stabilitetsbetraktelse för ett typiskt block med diametern D i en oordnad slänt visar att det finns en marginal till brott som kan utnyttjas för att uppta horisontella dragkrafter från ett istäcke med tjockleken t motsvarande en viss andel ε av blockets vikt, som grovt kan uppskattas som följer:

$$\varepsilon = \frac{(\tan \varphi - \tan \alpha) D}{(1 + \tan \varphi \tan \alpha) t} \quad (9)$$

För en slänt med lutningen $\alpha = 26,6^\circ$, dvs 1V:2H och inre friktionsvinkeln $\varphi = 45^\circ$ med blockstorleken och istjockleken en meter är marginalen vid brott ca 1/3. Ett stenblock med medeldiametern 1 m och tungheten $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$ skulle sålunda brytas loss av en horisontell kraft av 0,005 - 0,01 MN, vilket är mångfaldigt mindre än isens hållfasthet teoretiskt medger. Om man gör det djärva antagandet att verkligen förekommande dragkrafter under en 100-årsperiod är mindre än hälften av det teoretiska värdet (enligt bedömningarna för tryckkrafter pga expansion) skulle det ändå räcka till brott. Därtill kommer att i en större mängd block kommer naturligtvis några att vara mer stabila och några mindre stabila än ovanstående typiska värde anger. Denna betraktelse pekar på att det finns anledning räkna med skador på grund av isens kontraktion även för erosionsskydd av mycket stora, oordnade (och därmed just icke samverkande) block.

Möjligen innebär även förekommande moment pga brytning vid sjunkande vatten- och isnivå en alltför stor belastning för tippade block.

Det finns några huvudregler, jfr [11], för projektering av erosionsskydd som kan komma att utsättas för påverkan av is:

- En flack släntlutning just vid vattenytan och en låg friktionskoefficient (mellan is och erosionsskydd) är gynnsamt
- En bankett just ovanför vattenytan kan vara fördelaktigt (bryter sönder uppskjutande is)
- Erosionsskyddets yta och undergrund måste kunna uppta förekommande laster antingen genom tillräcklig stabilitet eller genom deformation
- Islaster och dimensionerande våglaster inträffar som regel inte samtidigt

Norska bestämmelser rekommenderar en minsta stenvikt av 2 kN (ca 0,2 ton) vid en släntlutning av 1V:2H för den norska modellen av erosionsskydd. Det motsvarar en nominell blockdiameter av 0,42 m enligt van der Meers definition eller ca 0,50 m diameter för ett normalt rundat block. Motsvarande regel finns även i Vattenfalls handbok uttryckt på litet oklart, och avser då erosionsskydd av oordnad sten. Beroende på bl a erosionsskyddets underlag kan Vattenfalls rekommendation antas motsvara en blockdiameter från 0,55 m till 1,2 m vid släntlutning 1V:2H. Bakgrunden till dessa rekommendationer finns emellertid inte redovisad och de är därför svårbedömda.

Undersökningar avseende erosionsskydd på kanadensiska fyllningsdammar [9] har lett till slutsatsen att normal vågdimensionering av erosionsskydd också förhindrar väsentliga skador av is (med undantag av frostsprängning och liknande). Det förefaller dock som om kanadensiska dammar i allmänhet har dimensionerats för högre vågor än de svenska, vilket skulle kunna vara en förklaring till de gjorda observationerna.

Det finns således här ett fält som bör undersökas ytterligare, lämpligen genom systematiska fältobservationer på svenska dammar.

Skrovlig yta är fördelaktigt för erosionsskydd på så vis att det begränsar uppspolningen av vågor. Med hänsyn till omfattningen av skador av is förhåller det sig emellertid tvärtom - en slät yta är att föredra.

För att undvika frostsprängning av erosionsskydd krävs det att man använder tillräckligt tåliga material. Tåligheten bör verifieras på lämpligt sätt beroende på om skyddet görs av konstmaterial eller naturmaterial som t ex berg. Framförallt alunskiffrar från svenska fjällkedjan har visat sig ha dålig beständighet (men andra skiffrar kan vara väsentligt bättre). För bergmaterial kan provning ske antingen genom upprepad frysning-tining i laboratoriemiljö eller med standardiserade metoder för provning av material för betongproduktion. (t ex ASTM C88 - Test for Soundness of Aggregate by use of Sodium Sulphate or Magnesium Sulphate).

2.7 Miljösynpunkter

2.7.1 Allmänt

Miljöaspekter av erosionskydd för fyllningsdammar kan lämpligen indelas i två avsnitt:

- erosionsskyddens påverkan på miljön och
- miljöns påverkan på erosionsskydden.

Erosionsskyddens påverkan på miljön kan dels vara direkt, dvs erosionsskyddet ger en viss effekt på t.ex. vattenkvalité eller strömmningsförhållanden, dels indirekt, genom att vattenkvalitén i sin tur påverkar vissa vattenlevande djur och växter.

Miljöns påverkan på erosionsskydden kan på samma sätt vara direkt, t.ex. genom fysisk/kemisk påverkan, (erosion, korrosion, frostsprängning etc) och indirekt genom påväxt och nedbrytningseffekter förorsakade av diverse djur och växter, inte minst mikroorganismer.

2.7.2 Erosionsskyddens miljöeffekter

Påverkan på den fysiska miljön

Erosionsskyddets fysiska egenskaper, t.ex. blockdiameter, morfologi, ytstruktur, såväl som dess kemiska sammansättning och färg ger en direkt, såväl som indirekt påverkan på den fysiska miljön, huvudsakligen vattenmiljön.

Om man jämför två diametralt motsatta typer av erosionsskydd t.ex. ett som består av en slät betongyta med ett annat uppbyggt av grovblockig sprängsten är det uppenbart att ett antal fysiska parametrar i vattenmiljön påverkas. Det grovblockiga erosionsskyddet retarderar vattnets rörelser i mikro- och makroskala, som i sin tur påverkar vattnets temperatur, syresättning, förekomst av närsalter, pH -värde, m.m. Den släta betongytan ger en obetydlig påverkan på vattnets rörelser och vattenkvalité.

Vattentemperaturen påverkas också av färgen på substratet. Ju mörkare, desto högre absorption av ljusenergi, som höjer vattentemperaturen och som i sin tur ökar vattnets rörelser. En högre temperatur ökar även den kemiska aktiviteten av substratet, som t.ex. genom diffusion kan påverka vattnets kemi.

Vattenmiljön påverkas i olika hög grad av det använda erosionsskyddets kemiska sammansättning och kemiska stabilitet. Vissa material, t.ex. granit och gnejs, är mycket stabila medan andra, t.ex. kalkhaltiga mineral, urlakas i sur miljö (dvs ett pH-värde lägre än 7) och ger en buffrande effekt på vattnet (dvs ett högre pH-värde) åtminstone i mikromiljön.

Asfalt ger ifrån diverse organiska föreningar till vattnet. Den mörka färgen på asfalten höjer dessutom dess temperatur som bl.a. ökar den kemiska aktiviteten och nedbrytningen av det organiska innehållet.

Restprodukter av de kemiska processerna påverkar således vattenkemin, rent generellt, men den specifika betydelsen kan vara svår att klarlägga eller gradera.

Utan att föra diskussionen alltför långt i ofta komplicerade, direkta eller indirekta orsakssamband kan det konstateras att det material som används i erosionsskydd ger olika fysiska och kemiska effekter, främst på vattenmiljön närmast erosionsskyddet. Genom ett aktivt val av material kan man således i viss utsträckning påverka miljöeffekten, t.ex. genom att minska eller reducera potentiellt negativa effekter eller genom att aktivt skapa eller tillvarata potentiellt positiva möjligheter.

Den levande miljön

Ett erosionsskydd är funktionellt en del av strandmiljön, dvs den del som ligger området mellan högsta och lägsta vattenståndet, eller av bottenmiljön, dvs den del som permanent står under vatten.

Utveckling och påverkan av det biologiska livet i del av erosionsskyddet som faller inom strandmiljön är främst beroende av vattenståndets fluktuation. I andra hand av

erosionsskyddets allmänna beskaffenhet och struktur, t.ex. förmågan att hålla kvar vatten eller fukt under perioder av lågt vattenstånd.

Stora, eller kortvariga vattenståndsförändringar ger i regel en nästan steril strandzon, dvs ett mycket fattigt djur och växtliv, oavsett vilken typ av material som används erosionsskydd. Skälet är helt enkelt att få organismer är anpassade till återkommande torra och våta perioder. Till en viss grad kan viss beskaffenhet och strukturen på material motverka kortvariga fluktuationer. Stenmaterial av ett visst slag, t.ex. av en viss blockstorlek, ger oftast upphov till större eller mindre hålrum som är eftertraktade miljöer för strandzonens organismer.

Den del av erosionsskyddet som permanent kommer att ligga under vatten blir en del av bottenmiljön. Om det material som används i erosionsskyddet representerar en ny typ av substrat, t.ex. ett stenmaterial i en miljö av sand-, ler- eller gyttjebottnar, kommer en ny typ av bottenmiljö att skapas som direkt kommer att ge påverka det biologiska livet. Stenmaterialet kommer att fungera som (1) en ny fysisk livsmiljö (habitat) för diverse akvatiska eller semi-akvatiska organismer, t.ex. för djurlivet och (2) som ett substrat för växter och djur att fästa på.

Djurlivet kommer att använda den nya fysiska miljön som skydd, eller för fortplantning och födosök. Kräfter är t.ex. kända att föredra stenmassor med hålrum där de kan vara skyddade och under skalömsningen och mot diverse rovdjur, t.ex. mink. Det är också väl känt att många fiskarter dras till stenkummel och att det ofta står fiskyngel där.

Stenmaterialet i ett erosionsskydd är vidare viktigt som ett substrat för påväxt. Många växter, (t.ex. påväxtalger) och djur (t.ex. vissa insekter, insektslarver, musslor, snäckor) är helt beroende av ett fast substrat, t.ex. av sten för att kunna förankra sig, föröka sig och utvecklas.

Sammantaget betyder det att erosionsskydd under vissa miljöbetingelser faktiskt kommer att öka den biologiska mångfalden i vattnet.

Människans miljö

Erosionsskyddets betydelse för människan och hennes miljö kan gälla den rent fysiska tillgängligheten till strand och vatten samt estetiska synpunkter, dvs vad som uppfattas som vackert eller fult.

I strandzonen, där erosionsskyddet blottläggs vid lågvatten, utgör t.ex. sprängsten ett onaturligt inslag. Det kan vara svårt att nå vattnet över stenmassorna och stranden kan uppfattas som ful. Rundad natursten, däremot, efterliknar material som naturligt förekommer på stränder. På avsnitt där man önskar en hög tillgänglighet och en estetiskt tilltalande miljö bör natursten och naturgrus väljas när så är möjligt.

Sprängsten av varierande blockstorlek är däremot alldeles utmärkt för den del av erosionsskyddet som permanent kommer att ligga under vatten genom att det bl.a. gynnar vissa vattenlevande djur och växter.

2.7.3 Miljöns påverkan på erosionsskydd

Erosionsskydden påverkas av direkta miljöeffekter t.ex. genom 1) fysisk åverkan, t.ex. abrasion, erosion, frostsprängning; 2) kemisk påverkan, t.ex. korrosion och urlakningsprocesser och 3) genom påväxt och nedbrytningseffekter förorsakade av diverse djur och växter, inte minst mikroorganismer.

Ett antal *fysiska processers* effekter är tidigare berörda i denna studie och utvecklas därför inte vidare i detta avsnitt.

Kemiska processer. Vatten med lågt pH-värde ('sura vatten') som är vanliga över stora delar av landet 'fräter' på erosionsskydden. Vissa material, t.ex. granit och gnejs, är mycket motståndskraftiga andra, t.ex. kalksten, är mera känsliga för kemisk påverkan.

Biologiska processer. Vissa substrat, t.ex. asfalt, som huvudsakligen består av kolväten kommer att långsamt bli utsatt för en biologisk nedbrytning av diverse mikroorganismer.

Rotsystem av träd och vissa buskar har en förmåga att tränga in erosionsskydd och vidare in i dammars tätningsmassor. Rötterna har stor kraft att penetrera lösa massor och genom tillväxt pressa undan material. Så länge rötterna är vid liv sitter de som proppar, när de dör och långsamt ruttnar bort kan vatten penetrera tidigare skyddade avsnitt.

Påväxt av t.ex. alger, mossor och lavar bidrar till att kvarhålla fukt. Det ökar risken för frostsprängning av t.ex. betongsubstrat.

2.7.4 Miljöhänsyn

Specificerade miljömässiga krav saknas för vattenbyggnader och för anläggningskonstruktioner överhuvudtaget. Allmänt kan man dock förutsätta att en vald utformning inte får ge upphov till signifikanta emissioner eller till väsentliga estetiska eller biologiska problem.

Erosionsskydd kan även positivt berika vattnets fauna och flora. Beroende på vad man vill uppnå för vattenmiljön, kan således ett erosionsskydd, genom val av material och utformning, bidra till specifika miljöförbättringar.

3 Förekommande typer av erosionsskydd

3.1 Källor

Eftersom man har anledning förvänta att den samlade internationella erfarenheten av erosionsskydd utgör den bästa grunden för att värdera olika skydd har relativt stort arbete lagts på att inventera sådant material.

Sålunda har sökning skett i ett antal olika databaser med hjälp av biblioteket på Tekniska Högskolan i Stockholm, KTH, se **bilaga 3.1**, och genom Internet. Identifierat material som bedömts kunna vara av intresse har därefter beställts främst genom KTHs bibliotek. Materialet omfattar publikationer från US Army Corps of Engineers, Bureau of Reclamation och en rad andra källor, bland annat diverse konferenslitteratur.

Därutöver har personliga kontakter utnyttjats med olika norska och holländska institutioner. Information från Kanada, Storbritannien, Ryssland och Kina har efterfrågats direkt genom skriftlig förfrågan riktad antingen till sekreteraren i respektive lands lokala ICOLD-organisation eller annan källa.

Dessutom har sökning skett direkt i (data)register täckande litteratur från olika internationella konferenser, organisationer och tidskrifter. Bl a har register med sammandrag av artiklar från 19 st ICOLD-konferenser genomförts.

Slutligen har deltagande företags erfarenheter från svensk och internationell marknad inventerats.

3.2 Funktionsprinciper

3.2.1 Allmänt

De olika metoderna att skydda fyllningsdammars uppströmsslänt skiljer sig i fråga om funktionssätt, placering och material. En första grov indelning bygger lämpligen på funktionssättet. Det finns tre olika principer:

- A** Reduktion av angripande laster
- B** Tillförsel av instabilt offermaterial
- C** Mekaniskt stabila erosionsskydd

De olika metoder som tillämpas världen över presenteras i det följande enligt denna indelning. Princip C bedöms vara av störst intresse för användning på svenska fyllningsdammars och de andra metoderna beskrivs därför relativt kortfattat.

3.2.2 Reduktion av angripande laster

Principen är ganska vanlig när det gäller skydd av naturliga stränder mot erosion både av strömmande vatten och vågor.

Vid skydd mot erosion av strömmande vatten används i första hand olika byggnadskonstruktioner som avses ändra vattenströmningens hastighetsfördelning så att hastigheterna avtar närmast stränderna. Dessa konstruktioner kan exempelvis bestå av olika råhetsökande element såsom pålverk, stenkistor eller ledmurar som byggs från stränderna i riktning snett nedströmsåt.

För att reducera vågkrafter används liknande konstruktioner placerade på visst avstånd från den strand som skall skyddas. Konstruktionerna kan vara traditionella (landanslutna) vågbrytare, **strandparallella vågbrytare** som inte är landanslutna, se **datablad A.1**, eller andra konstruktioner, ofta utformade för att släppa igenom delar av vågenergin. Den fysiska skalan varierar alltifrån band av strandparallella vågbrytare (öar) med fria partier (sund) emellan till mer finskaliga **konstruktioner av sten, betong eller träpålar**, se **datablad A.2**. Dessutom förekommer konstruktioner som omvandlar energi också genom att själva sättas i rörelse av vågorna. I den senare varianten används exempelvis förankrade **ponton**er av betong eller sammankopplade uttjänta bildäck (försedda med flytelement) som rörligt element, se **datablad A.3**.

Man ser direkt vissa svårigheter att tillämpa dessa idéer på dammslänter, i vart fall om man har ett betydande vattendjup omedelbart framför den aktuella dammen. För låga dammar med relativt grunda magasin eller vid speciella topografiska förutsättningar kan möjligheter däremot kanske finnas.

Vågbrytare behöver i och för sig inte nå upp till den aktuella vattenytan och skulle därför inte nödvändigtvis behöva utsättas för ispåverkan i magasin med små eller inga vattenståndsvariationer. I regleringsmagasin har man ju i allmänhet låga vattennivåer under den senare delen av vintern, vilket innebär att man trots allt inte slipper ispåverkan. Detta är ett outrett och förmodligen ganska besvärligt problem för de flesta förekommande typerna av mer finskaliga konstruktioner för dissipation av vågenergi.

Till denna kategori kan också *möjligen* hänföras **parapeter**, se **datablad A.4 och A.5**. Syftet med sådana i detta sammanhang är ju att skydda ett bakomliggande dammkrön mot överspolning och erosion. Konstruktionen skulle kunna tänkas vara lämplig i samband med krav på höjning av fribord för vågor eller vid tillfälliga överdämningar.

3.2.3 Tillförsel av instabilt offermateriel

Denna princip kan jämföras med den som ibland används för att rostskydda stålkonstruktioner med hjälp av sk offeranoder. Det bygger alltså på idén att den aktuella slänten inte görs stabil mot förekommande extrema krafter utan istället med vissa intervall förses med en ganska tjock påls av material som offras, dvs får erodera vid kraftig vågbildning och/eller ispåverkan. Den mängd offermaterial som påförs borde

då väljas så att den dels uppfyller dammsäkerhetsmässiga krav för en extrem situation, dels statistiskt sett, räcker ganska lång tid, kanske för några årtionden av normal erosion, vilket skulle kräva underhåll med motsvarande intervall.

Metoden med offermateriel används idag för naturliga stränder både vid hav och insjöar där erosionsstabil material saknas och går i dessa sammanhang internationellt under namnet *beach nourishment* eller *beach replenishment*. Ofta är det då fråga om sand eller grusmaterial som påförs och offras. Stränderna har inte överraskande mycket flack lutning jämfört med de som är aktuella för fyllningsdammar, se **datablad B.1**.

För att metoden med påförande av relativt fint material skall bli dammsäkerhetsmässigt acceptabel krävs något slags verifiering av största tänkbara erosion under dimensionerande förhållanden. Metoden är troligen bara användbar vid låga dammar där kostnaden för att avsevärt reducera slänthlutningen är måttlig och där annat nyttovärde kan skapas genom att metoden används. Exempelvis vid dammar med särskilda miljömässiga krav. Man skulle litet tillspetsat också kunna föra hittillsvarande erosionsskydd av delvis instabilt material på svenska fyllningsdammar till denna grupp.

3.2.4 Mekaniskt stabila erosionsskydd

Under denna rubrik finner man den stora gruppen av metoder för att erosionsskydda branta slänter. Det är alltså skydd som med hjälp av sin vikt och/eller styrka tar upp förekommande laster. Man kan skilja på släntribeklädnader med olika egenskaper i ett par väsentliga avseenden, i första hand *vattengenomsläpplighet* och *flexibilitet*. Dessutom skiljer de olika metoderna sig naturligtvis åt beträffande en rad andra faktorer som material, kvalitet, miljöegenskaper och naturligtvis kostnader.

Tanken med genomsläppliga erosionsskydd är att snabbt försöka utjämna de varierande krafterna härrörande från vågorna så att inte obalans och instabilitet skall uppkomma. Erosionsskydd av stenblock hör till denna grupp.

Det är emellertid inte självklart att genomsläppliga skydd verkligen är att föredra i alla lägen. Ett erosionsskydd som inte är genomsläppligt har i princip bättre stabilitet *förutsatt* att läckagevatten under erosionsskyddet kan avdräneras så att höga portryck inte uppkommer.

Flexibla, genomsläppliga skydd har varit det vanligaste hittills. Flexibilitet är naturligtvis i sig en önskvärd egenskap för ett erosionsskydd som placeras på en fyllningsdamm, som inte nödvändigtvis är helt orörlig. Sättningar och sjunkgröpar är inte ovanliga i fyllningsdammar, exempelvis i samband med lokal hydraulisk uppspräckning av tätkärnan med åtföljande materialtransport. Smärre sättningar och gradvisa, litet större sättningar kan då tas upp av ett flexibelt skydd utan att funktionen äventyras. Blir sättningarna alltför stora krävs reparation av skyddet och det kan normalt utföras lokalt där skadan inträffat. Å andra sidan torde en del av de sättningar som noterats på svenska fyllningsdamars uppströmsslänter kunna ha sin orsak just i bristande skydd mot angrepp av vågor och is och i en väl fungerande äldre damm *borde* man inte ha anledning räkna med större tillkommande sättningar.

En särskild grupp av erosionsskydd är de som består av *vegetation*, såsom gräs eller buskar och används på flera håll, bl a på strandvallar i Nederländerna och i USA. Vegetationens uppgift är att binda och armera jorden. Denna typ av erosionsskydd bedöms vara otillräckligt för alla högre dammslänter. Den kan således endast bli aktuell för små dammar eller som komplement till någon annan skyddsmetod och behandlas inte särskilt i föreliggande rapport. En närmare beskrivning av erosionsskydd bestående av vegetation står att finna i [13].

I de följande delarna av kapitel 3 beskrivs de mekaniskt stabila erosionsskydd som påträffats i inventeringen enligt följande indelning, **tabell 3.1**.

Tabell 3.1 Gruppering av mekaniska stabila erosionsskydd

<u>TÄTA EROSIONSSKYDD</u>			
3.3 Stela		3.4 Flexibla	
3.3.1 Tunna betongplattor		3.4.1 Asfaltbeläggningar	
3.3.2 Vältbetong			
3.3.3 Jord-cement blandning			
<u>GENOMSLÄPPLIGA EROSIONSSKYDD</u>			
3.5 Stela		3.6 Flexibla	
	Homogena block	Fyllda behållare	Stabiliserad sten
3.5.1 Dränerade betongplattor	3.6.1 Oordnade	3.6.5 Gabioner	3.6.7 Öppen stenasfalt
3.5.2 Dränerad vältbetong	3.6.2 Ordnade	3.6.6 Flexibla geotextil-madrasser	3.6.8 Asfalt-injektering
3.5.3 Dränerade geotextilmadrasser	3.6.3 Kopplade		3.6.9 Asfalt-madrasser
	3.6.4 Bakåtförankrade		

3.3 Täta, stela erosionsskydd

3.3.1 Tunna betongplattor

Denna typ av skydd kan representeras av platsgjutna armerade betongplattor av det slag som vanligen används som tätande membran på uppströmsslänten av vissa stenfyllningsdammar, sk betongdäcksdammar. Avsikten är där att beklädnaden skall fungera både som erosionsskydd och som primär tätning i dammen. Betongplattorna utförs vanligen med tjocklek från ca 25-30 cm vid dammkrönet och tilltagande mot lägre nivåer med relativt finmaskig armering och (oftast) höga krav på fogutformning, t

ex dubbla tätbleck i sinsemellan olika material. Släntlutningar upp till 1V:1,35H, dvs ca 37° förekommer. Betongplattorna gjuts med specialutrustning (glidformar) på en förberedd avjämning bestående av ett eller flera övergångslager som fyller upp håligheter i sprängstensfyllningen under uppfyllande av gällande filterkriterier och utgör sekundär försvarslinje/tätning om skador på betongplattan skulle uppkomma.

Motsvarande tätning och erosionsskydd av fyllningsdammars uppströmsslant har även utförts vid ett par tillfällen med användning av sprutbetong i stället för gjuten betong. En sprutad betongtjocklek av 15 cm har sålunda nyligen använts, se Andersson m fl [14], som skydd av en upp till 40 m hög slant med 0,3 % armering och vertikala fogar c/c 15m försedda med (enkla) fogband av plast. Sprickbildningen förefaller ha varit begränsad. Metoden har enligt vissa uppgifter även provats i mer kyliga klimatzoner. Den samlade erfarenheten är lovande, men mycket kort.

En platta av betong eller sprutbetong ansluts vanligen i sidor och underkant mot en särskild betongklack och injekteringszon om den skall fungera som dammens primära tätning. Eventuellt kan en platta avsedd endast som erosionsskydd avslutas högre upp på dammslanten på ett sådant djup att erosionsskydd inte längre behövs. Särskilda dränagearrangemang torde då krävas för att medge kontrollerad avdränning under plattan så att skadliga upptryck inte kan uppkomma.

Erosionsskydd enligt denna huvudprincip utförs ibland ovanför dämmningsgränsen vid själva dammkrönet. Avsikten är då framför allt att de skall fungera som vågavvisare, parapeter och mindre ofta ansluts de till dammens tätarna. Betongparapeter görs som regel med vertikal eller nära vertikal front och med lämpliga tassar för att säkra stabiliteten, men bakåtförankring kan även åstadkommas med särskild jordarmering. Metoden användes t ex för höjning av Lake Sherburne Dam, USA [15].

3.3.2 Vältbetong

Vältbetong (roller compacted concrete, RCC) som material för dammbyggnader utvecklades under 1970-talet och kom till egentlig användning under årtiondet därefter. Idag finns en mängd dammar byggda med vältbetong. Det finns flera olika skolor beträffande använd halt av cement, pozzolan, flygaska och slagg; utnyttjade halter ligger som regel inom intervallet 60 - 250 kg/m³. Den typ som har bäst frystålighet och därför kanske i första hand skulle kunna vara av intresse som material för erosionsskydd av fyllningsdammars är den som har relativt hög halt av cement, vanligen över 130-150 kg/m³.

Orsaken till att relativt hög cementshalt anses gynnsamt är svårigheterna att åstadkomma en slutprodukt som tål frysning/tining medan den är våt. Tillsatsmedel för att öka luftporbildningen har inte visat sig särskilt användbara vid låga cementhalter. Metoden för att uppnå acceptabel frostbeständighet har därför i huvudsak varit att välja en relativt hög cementshalt för att öka betongens hållfasthet och ofta undvika pozzolaninblandning.

Framförallt i Japan har många dammar byggts med lägre cementhalter och med inblandning av stora mängder flygaska. Det japanska klimatet torde åtminstone i vissa delar av landet innebära vinterförhållanden inte olika svenskt klimat.

Normalt används i vältbetong en högre andel sand, vanligen ca 30-40 %, i ballastmaterialet än vid konventionell betong. Största aggregatstorlek brukar ligga vid 50 - 75 mm och en högsta halt av 3-5 % finmaterial brukar tillåtas. Även naturliga graderade material har använts som ballast i vältbetong.

Volymvikter av 2,4 t/m³ uppnås regelmässigt i den färdiga vältbetongen medan permeabiliteten legat under 10⁻⁴m/s, ofta många tiopotenser lägre.

Vältbetongen placeras som regel i ca 30 cm tjocka lager och vibreras med hjälp av vibrerande vältar med vikter runt 15 ton.

Ett erosionskydd av vältbetong skulle av utförandeskäl utföras med en horisontell bredd av ca 2,5-3,0 m i 0,3 m tjocka lager. Vältbetongen bör av ekonomiska skäl sannolikt placeras på en någorlunda avjämnad yta med dränerande egenskaper. Erforderlig stabilitet mot vågor uppnås i första hand genom hög. Vältbetongens förmåga att långsiktigt tåla svenskt vinterklimat med upprepad frysning/tining i vått tillstånd behöver verifieras. *Prismässiga fördelar jämfört med vanlig betong torde kräva en relativt stor arbetsvolym.*

3.3.3 Jord-cementblandning

Det första experimentella försöket med jord-cement som erosionsskydd gjordes år 1951 av Bureau of Reclamation i USA, se **datablad C.1**. Jord-cement har sedan dess fram till 1989 valts som erosionsskydd för 13 av Bureau of Reclamations dammar. Över 900.000 m³ erosionsskydd av jord-cement har byggts. Härigenom har observationer gjorts av 190 dammår, enligt uppgift med tillfredsställande erfarenhet i varierande klimat. Metoden kallas ofta cementstabiliserad jord, men vi har här valt ett annat namn för att klargöra att det inte är fråga om att stabilisera redan befintliga jordlager.

I jord-cement ingår "jord", cement och vatten. Jorden har normalt följande karakteristik:

- maximal stenstorlek 32 mm

- minst 85% av materialet passerar sikt No.4

- 10-30 % av materialet passerar sikt No.200, dvs 0,075 mm.

- låg plasticitet eller icke plastiskt finmaterial

Grövre material har använts varvid cementmängden ökats. Det kan dock vara ekonomiskt med ytterligare krossning, varvid lägre cementmängder kan användas.

Siltig sand med jämn gradering ger en jord-cement med tillräcklig beständighet och hållfasthet med mindre erforderlig cementhalt än vad som behövs om en ojämnkornig sand används.

Cementmängden har ofta varit ca 12% av jordmängdens torra vikt. Erforderlig cementmängd varierar dock med ingående jordens gradering.

Normalt har använts standardcement. Vid behov kan sulfatresistent cement användas. Alkalireaktioner med aggregatet kan hållas tillbaka genom användning av cement med lågt alkaliinnehåll.

Vatten som används vid framställningen bör hålla samma kvalitet som vid framställning av konstruktionsbetong.

Jord-cementblandningen läggs ut i horisontala lager på dammen med hjälp av t ex bandtraktor. Härigenom fås ett skydd uppbyggt med trappstegsform längs slänten. Lagertjockleken är typiskt ca 15 cm. Bredden på lagren väljs med hänsyn till den utrustning som skall användas till ca 3 m. Vid en släntlutning av 1V:2H blir erosionsskyddets tjocklek mätt vinkelrätt mot slänten då ca 1,3 m

Packning av varje lager har vanligen utförts genom 4 överfarter med fårfotsvält följt av 4 överfarter med gummihjulsvält.

Där större vågor kan uppstå kan åtgärder för att öka vidhäftningen mellan lagren vara nödvändiga. Metoder för att öka vidhäftningen är under utveckling inom tekniken med vältbetong, varav några förefaller användbara även vid stabilisering med jord-cement. Jord-cementblandningen bör placeras på dränerande underlag även om stabiliteten i första hand bygger på hög egenvikt.

Blandningens förmåga att långsiktigt tåla upprepade frysning/tining i vått tillstånd behöver utredas. Gränsen mellan jord-cementblandning och vältbetong förefaller något flytande.

3.4 Täta, flexibla erosionsskydd

3.4.1 Asfaltbeläggningar

Detta är också en relativt vanlig typ av erosionsskydd på uppströmsslänten av en del fyllningsdammar, som regel med asfalt som material. Skyddet tjänstgör då också som dammens primära tätning. Nedan beskrivs översiktligt täta asfaltbeläggningar på dammar. I [16] redovisas en inventering av 165 st byggda dammar, vilka 1977 tillsammans representerade drygt 2000 dammår. Den sammanlagda asfaltytan var då ca 5,5 Mm². Den högsta dammen var 100 m hög och den högst belägna låg på 3000 m höjd över havet. Skador och erfarenheter rapporterades ej.

De första asfaltbeläggningarna (från ca 1930 och fram till ca 1950) tillverkades på basis av erfarenheterna från beläggning av vägar. Asfaltbetongen lades vanligen för hand i lutningar brantare än 1:1. Senare minskades lutningen till 1:1,5 till 1:1,7 och dessutom ändrades asfaltblandningen medan metoderna för utläggning och packning förbättrades.

Kraven på asfaltbeläggningen är bl a:

- Låg permeabilitet för att uppnå vattentäthet vid tjocklek ca 8 till 35 cm
- Tillräcklig motståndsförmåga mot laster
- Flexibilitet för att tåla sättningar utan sprickbildning
- God vidhäftning mot underlaget
- Tillräcklig underdränering eller tyngd för att motverka upptryck
- Motståndsförmåga mot åldring pga solljus, hög temperatur, frysning, regn etc

Två huvudsakliga typer av uppbyggnad, Typ A resp. Typ B, kan särskiljas enligt **tabell 3.2 och 3.3**.

Tabell 3.2 Tåta, flexibla erosionsskydd av asfalt, Typ A. Skikt nr 1 underst.

Skikt nr	Tjocklek	Benämning	Beskrivning
7	2 - 4 mm	Ytportätning	Tunn (sand)gjutasfalt
6	5 - 12 cm	Tätlager	1-2 lager av tät asfaltbetong
5	3 - 10 cm	Bärlager	Asfaltbetong eller indränkt makadam
4	5 - 15 cm	Dränerande lager	Öppet bituminöst bärlager
3	4 - 8 cm	Tätlager	Tätt asfaltbetong
2	Några få cm	Avjämning	Indränkt makadam eller asfaltbetong
1	-	Ytbehandling av undergrunden	Bitumen- eller cementstabilisering

Tabell 3.3 Tåta, flexibla erosionsskydd av asfalt, Typ B. Skikt nr 1 underst.

Skikt nr	Tjocklek	Benämning	Beskrivning
6	2 - 4 mm	Ytportätning	Tunn (sand)gjutasfalt
5	4 - 12 cm	Tättningslager	Tät asfaltbetong
4	3 - 12 cm	Bärlager	Grov asfaltbetong eller betong
3	3 - 15 cm	Dränerande lager	Poröst material, betong eller asfaltbetong
2	Några få cm	Avjämning	Indränkt makadam
1	-	Indränkning av undergrunden	Bitumen- eller cementstabilisering

Syftet med ytbehandlingen i det översta skiktet är att täta porerna i ytan för att därmed minimera risken för skada av is eller vegetation. Blandningens sammansättning måste vara noga avvägd om sprickor skall kunna undvikas, speciellt där ytan gränsar mot luft.

En uppbyggnad med dubbla vattentäta lager kan orsaka blåsbildning om inläckning mellan lagren inte är förhindrad.

För tillfredsställande egenskaper och livslängd hos asfaltbeläggningen är det också nödvändigt med korrekt sammansättning av blandningen, både vad gäller aggregatets gradering och mängden bitumen och filler, samt med fullgott utförande, speciellt vad gäller packningsmetod och massans temperatur vid utläggningen.

Svårigheterna och invändningar avseende avdränering av asfalttätningens underliggande lager är desamma som för täta betongplattor.

Flexibla tätningar av olika plastmaterial har också använts på fyllningsdammars uppströmsslänt [17], men de har då kombinerats med särskilt erosionsskydd och de behandlas därför inte här.

3.5 Genomsläppliga, stela erosionsskydd

3.5.1 Dränerade betongplattor

I princip kan man tänka sig en platsgjuten, prefabricerad eller sprutad betongplatta där man inte anstränger sig att göra fogarna täta eller förhindra sprickbildning. Plattorna kan antingen placeras på lämpligt underlag och stabiliseras med hjälp av egen tyngd eller förankras på lämpligt sätt i bakomliggande dammfyllning. Dränage kan också anordnas i särskilda mönster eller dränagepunkter. Erosionsskydd av kvadratmeterstora betongplattor med öppna fogar används relativt ofta på flacka slänter av fyllningsdammars i östeuropa. Om plattorna inte är alltför stora kan typen hänföras till de flexibla erosionsskydden.

3.5.2 Dränerad vältbetong

Se avsnitt 3.3.2.

3.5.3 Dränerade geotextilmadrasser

Madrasser uppbyggda av betong med omgivande geotextil används som erosionsskydd, framförallt i strömmande vatten. Geotextilerna på madrassens över- resp undersida är punktvís ihopsydda så att den färdiga madrassen får ett utseende som ett sängtäcke eller en luftmadrass. Efter utläggning av geotextilen på en preparerad botten pumpas betong (K 50, vct 0,75) in sektionvis. Överflödigt vatten i betongen går ut via geotextilen och det slutliga vattencementtalet blir ca 0,35. Arbetet sker med hjälp av dykare. Ett fabrikat är Foreshore Protection, se **datablad C.2**. Genom att sammanfogningen av de två geotextilerna utförs som filterpunkter blir madrassen dränerande. Åldringstendenser och kemikalieresistens uppges vara förhållandevis acceptabla, obekant vilken tidsperiod som avses därmed. Madrasserna bedöms ha relativt dålig förmåga att uppta ojämna

sättningar utan att spricka. Denna förmåga kan eventuellt förbättras genom att man armerar geotextilen. Förmågan att motstå inverkan av större vågor och is är ej dokumenterad på annat sätt än genom fälterfarenhet av oredovisad omfattning.

3.6 Genomsläppliga, flexibla erosionsskydd

3.6.1 Oordnade homogena block

Traditionella erosionsskydd av **sprängsten** hamnar i denna kategori, se **datablad C.3**. Problemen har varit betydande. Till detta kan flera faktorer ha bidragit. Dessa har numrerats nedan från 1 till 5 utan inbördes rangordning.

En allvarlig brist är att man regelmässigt använt ett graderat material härstammande från erforderliga sprängningsarbeten för vattenvägar och kraftstationer. Förekomsten av finmaterial (1) innebär att skyddet fått otillräcklig genomsläpplighet och att inte ens de större blocken kunnat hamna i stabila positioner. Även det grövre stenmaterialet har dessutom ibland haft otillräcklig blockstorlek (2), uttryckt som t ex D_{50} .

Konsekvensen av dessa två faktorer är att även måttlig vågrörelse kunnat sätta massorna i rörelse genom att finmaterial tvättats ut successivt. När något större vågrörelser skett, har det lett till nya rörelser, osv. Stenblocken kommer under denna process naturligtvis att gnidas mot varandra, och oavsett om det är hårda block som gnids mot hårda block eller alltihop består av mer lättvittrat bergmaterial, så leder det så småningom till nedkrossning. Detta torde vara fullt tillräckligt som förklaring till uppkomna skador. Därtill kommer att använt bergmaterial i vissa fall inte varit särskilt hårt eller beständigt (3).

Motsvarande mekaniska nedbrytning sker dessutom genom isens inverkan (4) framförallt om svagt material finns i släntskyddet. Därtill kommer i en del fall vittring (5) genom luftens, vattnets och temperaturens inverkan.

Man har alltså anledning ifrågasätta användandet av traditionella svenska erosionsskydd av sprängsten med gradering ned till finmaterial. I varje fall om förväntningen är att det skall vara stabilt. Däremot kan det ju tänkas att ett erosionsskydd enligt offerprincipen kan byggas upp av sådant material. Man har dock ingen anledning utesluta framtida användning av erosionsskydd av oordnad sprängsten på basis av dessa erfarenheter. Specifikationerna behöver dock skärpas och efterlevnaden kontrolleras betydligt bättre för att reducera underhållet. Skador av ispåverkan kan emellertid kanske inte undvikas helt.

För kantig sprängsten i oordnad fyllning rekommenderas värdet $H=1,27H_s$ och värdet $K=2,0$ i Hudsons ekvation (1). För **rundad sten** utlagd på motsvarande sätt reduceras värdet emellertid till $K = 1,2$, vilket innebär att ca 20 % större blockdiameter krävs.

Flexibla släntskydd av oordnade block görs även med förtillverkade **betongelement**, se **datablad C.4**. De har användning framförallt i vågbrytare i hamnar. Elementen läggs oordnat i slänt, vanligen med hjälp av kran. Eftersom elementen brukar vara oarmerade

bör de ej tippas m h t risken för skada. En rad olika, mer eller mindre fantasieggande produktnamn förekommer, se [6] och **tabell 3.4**.

Tabell 3.4 Förtillverkade betongelement, produktnamn

Akmon	Hollow Tetrahedron	Sta-pod
Binnie block	Interlocking H-block	Stalk cube
Bipod	Mexapod	Svee block
Cob	N-shaped block	Tetrahedron (solid)
Cube	Pelican stool	Tetrahedron (perfor.)
Cube (modifierad)	Quadripod	Tetrapod
Dolos	Rectangular block	Toskane
Dom	Rentrapod	Tribar
Gassho block	Seabee	Trigon
Grabbelar	Shed	Tri-long
Hexaleg block	Stabilopod	Tripod
Hexapod	Stabit	Tripod block
Hollow square	Sta-bar	

Värden för konstanten K i Hudsons ekvation (1) anges i **tabell 3.5** för några olika typer av förtillverkade betongelement. Tabellen anger rekommenderat värde enl SPM 1984 [7] vid brytande vågor och gäller för släntlutningar mellan 1V:1,5H och 1V:5H förutsatt två lager block lagda på lämpligt underlag (dvs uppfyllande filterreglerna). Dimensionerande våghöjd $H=1,27H_s$. Observera att även filtret måste vara helt stabilt, dvs det bör inte innehålla finmaterial som kan tvättas ut och leda till rörelser i erosionsskyddet. Flera filterlager kan krävas.

Tabell 3.5 Värden på konstanten K i ekv (1) för förtillverkade betongelement i ordnad fyllning enl SPM 1984. Brytande vågor och två lager block.

Typ av element	K
Tetra- och Quadripod	7,0
Tribar	9,0
Dolos	15,8
Cube (modifierad)	6,5
Hexapod	8,0

3.6.2 Ordnade homogena block

För block placerade i ordnad fyllning anges värden för konstanten K i Hudsons ekvation (2) i **tabell 3.6** för stenblock och olika typer av förtillverkade betongelement. Tabellen anger rekommenderat värde enl SPM 1984 vid brytande vågor och gäller för släntlutningar mellan 1V:1,5H och 1V:5H förutsatt två lager block lagda på lämpligt underlag och $H=1,27H_s$.

Tabell 3.6 Värden på konstanten K i ekv (2) för sten och förtillverkade betongelement i ordnad fyllning enl SPM 1984. Brytande vågor. (1)=Placerade med längsaxeln vinkelrätt mot slänten; två lager block. (2)=Långa platta stenar med längden ca 3 ggr det kortaste måttet; två lager block. (3)=Ett lager block.

Typ av element	K
Sten, kantig (1)	5,8
Sten, parallelepipedisk (1,2)	7,0-20,0
Tribar (3)	12,0

Placering av block med längsaxeln vinkelrätt mot slänten är som tidigare nämnts vanlig i Norge och ovan angivna K -värden överensstämmer i stort med de som föreskrivs i vårt västra grannland.

3.6.3 Kopplade homogena block

Betongmadrasser tillverkas industriellt av prefabricerade betongblock som kopplas ihop med hjälp av längs- och/eller tvärgående stålkablar. En typ av madrass, tillverkad av Nicolon i Holland med produktnamnet Armoflex, se **datatablad C.5**, görs i tjocklekar upp till 225 mm och med planmått upp till 3 x 9,5 m. Betongblocken görs i storlekar upp till 300 x 350 mm. Betongblockens sidor är utformade med förtagningar så att de hakar i varandra. Installation av madrassen görs på ett förberett underlag med hjälp av mobilkran eller pontonkran försedd med särskilt lyftok. Installationen kan göras både i och ovan vatten. Efter utläggning bör hålrummen mellan betongblocken tätas med en fyllning av sand och grus för att bästa motståndsförmåga mot vågor skall erhållas. Madrasserna uppges motstå vågor med en signifikant höjd av $H_s = 1,5$ à 2 m. Uppgifterna bygger på laboratorieförsök. Dessutom finns relativt omfattande fälterfarenhet (dock inte analyserad). Syftet med kablarna är att hålla samman blocken under installationen. Således har inverkan av kablarna vanligen inte medräknats vid bestämningen av vågtåligheten. Kablarna medför dock en extra säkerhet i detta avseende förutsatt att de är intakta. Dessutom torde kablarna kunna avsevärt förbättra förmågan att uppta förekommande islaster, men denna förmåga tycks inte vara analyserad eller beskriven. Blocken placeras normalt i lutning 1V:3H. Vid de släntlutningar som är aktuella för svenska fyllningsdammar uppträder även andra brottmoder än de som skydden vanligen dimensioneras för. Därför krävs ytterligare verifikationer.

Även andra typer av kopplade betongblock har kommit till användning, antingen för något enstaka projekt eller i större skala, se **datatablad C.6**. Dessa element installeras ett och ett, beroende på blockets storlek antingen manuellt eller med hjälp av kran. Av största betydelse för dessa elements förmåga att motstå vågor är stor tyngd, men även samverkan (friktion) mellan blocken utnyttjas.

3.6.4 Bakåtförankrade betongelement

Ett intressant alternativ är prefabricerade element av i första hand betong som stabiliseras genom att de block för block förankras i bakomliggande dammfyllning med

jordankare eller jordarmering. Båda varianterna är möjliga. Metoderna torde vara av intresse framförallt vid höjning av dammkrön. Fördelen med mer traditionella jordankare är naturligtvis att man *vid skydd av en befintlig dammkropp* slipper schakta bort hela fyllningen i förankringszonen, vilket kan tänkas medge att arbetet utförs med högre reservoarvattenyta än om avschaktning måste ske.

Om man väljer avschaktning kan förankring ske med armeringsenheter av plast (exempelvis av typ Tensar) eller av galvaniserade stålband (exempelvis av typ Reinforced Earth/Terre Armée eller Tensar) som läggs in mellan jordlagren vid återfyllningen. Fördelen är att förankringspunkterna kan göras mångdubbelt fler än vad som är ekonomiskt rimligt med traditionella jordankare. Härigenom kan fyllningen utnyttjas bättre för stabilisering och en klenare och därmed billigare ytbeklädnad av betong användas.

Ett tänkbart alternativ vore att jordarmeringen utformas som heltäckande nät av plast eller rostskyddat stål och efter fyllning av ett lager jord böjs upp så att det täcker uppströms släntyta och därefter böjs in igen och förankras till nästa skikt jordarmering. Detta förfaringssätt bör kanske inte användas som permanent skydd där nötning genom ispåverkan eller vågor förekommer. På sådan höjd över dämningssgräns att nötning endast blir aktuellt vid extrema situationer kan det kanske rent tekniskt accepteras. Dock bör man även beakta risken för åverkan eller sabotage. Om jordarmeringen ansluts till särskilda yttäckande element av betong vinner hela konstruktionen avsevärt i säkerhet och användbarhet.

Med lämplig bakåtförankring kan fronten göras vertikal, vilket innebär mer begränsad uppspolningshöjd och utrymmesmässiga fördelar. Betongelementens storlek väljs beroende på konstruktionshöjd och förankringspunkternas täthet. Med hänsyn till bl a ispåverkan bör sannolikt tjocklekar under 100-150 mm undvikas. Elementen förtillverkas i frostbeständig betong och förses med lämpligt utformade kanter för samverkan mellan elementen. Elementväggens underkant bör placeras på särskild betongsula. Omedelbart bakom elementen placeras lämpligt tätt material eller geomembran och längre bak ett dränerande fyllningsmaterial.

Särskild stabilitetsberäkning krävs naturligtvis för att säkerställa konstruktionen beroende bl a på konstruktionshöjd, underlag, lokalt tillgängligt fyllningsmaterial samt aktuella iskrafter. Konstruktionshöjder upp till ca 2 m kan tänkas bli aktuella.

De internationella erfarenheterna från användning av armerad jord i vägbankar och liknande är inte odelat positiv. Sålunda har betydande korrosionsskador börjat noteras på jordarmeringen på en flertal sådana konstruktioner. Eftersom krönet på fyllningsdammar vanligen också är utsatta för rörelser i samband med frysning-tinging finns anledning iaktta försiktighet.

Vågavvisare eller parapeter kan eventuellt ses som en variant av denna typ. De utförs vanligen av platsgjutna eller prefabricerade betongelement av stödmurstyp, som regel med vertikal eller nära vertikal front. Fogarna mellan elementen utformas så att de kan överföra krafter och därigenom säkerställa samverkan. Däremot behöver de alltså inte självklart vara täta. Dränerande fogar kan vara en del i stabiliseringen av elementen. Förankring i bakomliggande dammfyllning sker med hjälp av stödmurens forplatta.

3.6.5 Gabioner

Gabioner är låd- eller madrassformade behållare av stål nät eller plastnät som fylls med sten, se **datablad C.7**. Lämpligast som släntbegränsning och erosionsskydd är kanske madrassformade gabioner.

Stålnätets maskvidd är typiskt ca 50 - 100 mm. Ståltråden, som normalt har 2 - 3 mm diameter, är vanligen galvaniserad eller PVC-belagd. Det senare korrosionsskyddet används i marina miljöer. Helst bör tråd som är både galvaniserad och PVC-belagd användas. Även rent plastmaterial kan tänkas för mer begränsade tidsperioder.

Gabioner kan injekteras med asfalt för att få ökad tyngd eller täthet och för att minska risken för nötskador vid måttlig inverkan av is eller vågor. Bakåtförankring kan öka stabiliteten.

En nackdel kan trots allt vara kort livslängd på stål- eller plastnätet. Lösa stenar i gabionen kan orsaka nötning på korrosionsskyddet. Därför är det nödvändigt att stenmaterialet väljs med omsorg, att gabionen packas noga. Gabioner skall inspekteras regelbundet och repareras innan allvarliga skador uppkommer. Med fullgott utförande kan livslängden på gabioner med stål nät enligt uppgift överstiga ca 50 år i 'lämplig miljö'. Det förefaller tveksamt om uppströmsslänten på svenska fyllningsdammar kan betraktas som lämplig miljö.

Stenmaterialet skall ha sådan storlek att den inte vaskas ut genom nätet. Nominella stenstorleken skall vara åtminstone 1,5 ggr nätets maskvidd. Stenen väljs, blandas och tvättas före fyllning i gabionen. Den sten som har kontakt med nätet skall (sägs det) helst vara rundad i stället för kantig för att undvika nötning.

Gabioner kräver relativt mycket manuellt arbete med packning och sammannästning av sidor och lock i varje gabion med ståltråd och lämpar sig ekonomiskt därför inte särskilt för svenska förhållanden.

Gabionernas förmåga att motstå nötning och större laster från is förefaller mycket begränsad samtidigt som utmärkt grepp erbjuds isen.

3.6.6 Flexibla geotextilmadrasser

Madrasser uppbyggda av betong med omgivande geotextil används som nämnts ovan (jfr avsnitt 3.5.3) som erosionsskydd i strömmande vatten. Geotextilerna på madrassens över- resp. undersida är kontinuerligt ihopsydda i band så att den färdiga madrassen får ett rutigt utseende. Efter utläggning av geotextilen på en preparerad botten pumpas betong (K 50, vct 0,75) in sektionvis. Överflödigt vatten i betongen går ut via geotextilen och det slutliga vattencementtalet blir ca 0,35. Arbetet sker med hjälp av dykare. Ett fabrikat är Foreshore Protection, se **datablad C.8**. Genom att sammanfogningen av de två geotextilerna utförs som filterband blir madrassen både dränerande och flexibel. Åldringstendenser och kemikalieresistens sägs vara acceptabla.

Förmågan att motstå inverkan av is är ej dokumenterad på annat sätt än genom en viss oredovisad fälterfarenhet.

Inledande laboratorieförsök avseende tålighet mot vågangrepp har dock utförts nyligen av University of New South Wales [18]. Försöken tycks peka på att madrasser med 0,2 m tjocklek förblir stabila för monokromatiska vågor upp till 1,0-1,5 m våghöjd beroende på vattendjupet. Redan vid mycket små våghöjder skedde emellertid betydande rörelser och omlagringar i den grusbädd som madrasserna vilade på under försöken, vilket betyder att betydligt grövre underlag krävs. Ytterligare undersökningar erfordras således innan produkten kan användas för dammar.

3.6.7 Öppen stenasfalt

Skyddslagret på en slänt kan utföras med öppen stenasfalt, se **datablad C.9**. Stenasfalten är genomsläpplig med en porvolym av ca 20 till 25 %. Under stenasfalten läggs vanligen ett filter utfört med geotextil eller sandasfalt. Läggning är inte möjlig under vatten enligt vissa källor (se dock nedan).

Stenasfalt tillverkas genom att man blandar förbehandlat bindemedel med uppvärmd sten. Metoden medför att bindemedlet fördelas över hela ytan på stenmaterialet. Kontaktytorna mellan stenen i skyddslagret fixeras härigenom endast med en liten mängd bindemedel.

Förhållandet mellan bindemedel och sten i stenasfalten väljs till stor del efter bindemedlets viskositet och stenens gradering. Ett vanligt förhållande är 20 viktsprocent bindemedel och 80 procent sten. Temperaturen på stenasfalten under utläggning är ca 110 till 140 °C.

Ett skyddslager av stenasfalt bör ges en teoretisk tjocklek av ca 2,5 ggr stenstorleken. Vanliga tjocklekar av ca 0,10 m och 0,15 m. Exempel på ungefärligen erforderlig tjocklek av stenasfalt lagd på packad sand i lutning 1:3 för att kunna motstå vågor framgår av **tabell 3.7**.

Tabell 3.7 Erforderlig tjocklek på skyddslager av öppen stenasfalt för att motstå erosion, PLANC[1]

H _s (m)	Tjocklek (m)
2	0,20
3	0,40
4	0,65

P g a risken för porvattenövertryck rekommenderas att stenasfalt på sandslänt med geotextil som filter bara används för våghöjder upp till H_s = 2 . För H_s > 2 m rekommenderas att filtret istället utförs med sandasfalt.

Stenasfalt rekommenderas för våghöjder $H_s < 3$ m (ofta förekommande belastning) och $H_s < 4$ m (sällan förekommande belastning).

Asfaltens egenskaper kan ändras genom åldring, tvättning, nötning samt biologisk och kemisk påverkan.

I SPM 1977 [6] beskrivs erfarenheterna av stenasfalt efter utbyggnaden år 1964 av två vågbrytare i inseglingsleden till Amsterdam. Den ena byggdes i vatten med 2100 m längd och ned till 18 m vattendjup. Stenasfalten bestod av 60-80 viktsprocent sten 50-500 mm och 20-40 % asfaltbetong med stenmax 50 mm.

Krönet på vågbrytarens stenkärna (blockvikt 0,3-1,0 ton) injekterades först med stenasfalt (ca 1,1 ton per kvadratmeter krön). Stenasfaltens sammansättning modifierades för att viss penetration av stenkärnan skulle uppnås. Den slutliga täckningen gjordes med ett 2 m tjockt lager av stenasfalt i lutning 1V:1,75H och 1V:2H. Genom att stora mängder stenasfalt (900,000 ton) las ut i tidsmässigt nära följd blev nedkylningen långsam och successiva lager bildade en monolitiskt skydd. Kontinuerligt underhåll har varit nödvändigt pga asfaltens viskösa egenskaper.

3.6.8 Asfaltinjektering

Stabiliteten hos en befintlig stenslänthet kan också förbättras genom injektering med asfalt, se **datablad C.10**. Asfalten hålls eller sprids ut över och tränger ned i stenslätnaden på slänten. Injekteringen kan utföras enligt följande principer:

Ytlig injektering: Asfalten sprids jämnt över stenslätnadens yta. Medför viss permeabilitet.

Partiell injektering: Stenslätnaden injekteras i ett bestämt mönster. 50-80 % av hålrummen fylls.

Slänten skall inte göras fullständigt tät eftersom detta medför potentiellt ökad lyftkraft. Partiell injektering är därför att föredra.

Asfaltmaterialet är en blandning av bindemedel och grus/sten. Bindemedlet är en blandning av 60-70 % (vikt) sand, 15-20 % filler och ca 20 % asfalt. Mängden och storleken hos grus/stenmaterialet anpassas efter storleken på hålrummen i den stenslätnad som skall injekteras. Sammansättningen baseras på erfarenhet, eftersom viskositeten måste anpassas så att asfaltmaterialet fyller ut hålrummen i lämplig omfattning utan att rinna bort. Viskositeten under utläggning kan typiskt vara 30 - 80 Ns/m^2 . Efter avslutad utläggning kan viskositeten vara ungefär 10^6 - 10^9 Ns/m^2 . Vanlig vägasfalt kan inte användas.

Asfaltmaterialet blandas i vanligt asfaltverk. Lämplig blandnings-temperatur beror av transportsträckan och kravet på viskositet under utläggningen och ligger normalt mellan 130°C och 190°C. Materialet transporteras enligt särskilda föreskrifter.

Utläggning av asfaltmaterialet över vatten sker medelst störrör, kranskopa eller direkt från uppvärmd blandare eller bask/ficka. Asfalten sprids med rakor. Alternativt kan en bask/ficka lyftas och tömmas så att asfalten kan rinna ned direkt i stenslanten.

Utläggning av asfaltmaterialet under vatten kan ske genom tömning från ficka eller pumpning via isolerad ledning med specialmunstycke. Munstycket hålls ca 0,5-1 m över den stenslän som injekteras.

Korrekt funktion hos den förstärkta slänten kan bara erhållas genom hög kvalitet på byggkontroll och utförande. Asfaltmaterialet får varken bli liggande ovanpå stenslanten eller rinna ut ur släntens stenbeklädning.

Om påfrestningen p g a vågor är hög kan de medelst asfalten sammanfogade elementen slås sönder. Det rekommenderas därför att asfaltförstärkning av stenslänter bara skall göras om våghöjden $H_s < 3$ m (ofta förekommande belastning) och $H_s < 4$ m (sällan förekommande belastning). I det senare fallet rekommenderas att man använder tre lager sten i släntbeklädningen.

Kvaliteten på stenmaterialet i den slänt som injekteras skall vara samma som i en slänt som inte förstärks med asfalt. Den sten som injekteras måste också vara ren. Idealiskt är att utföra injekteringen samtidigt som stenslanten byggs. Slänten kan behöva spolas ren innan injektering utförs.

Den brantaste släntlutning som kan injekteras på detta sätt är 1V:1,7H över vatten och 1V:1,3H under vatten.

Temperaturen under påförandet av asfaltmaterialet bör vara mellan 100°C och 190°C beroende på erforderlig viskositet. Vid utläggning under vatten måste temperaturen vara lägre än 150°C. Om det finns en underliggande geotextil måste temperaturen dessutom anpassas så att geotextilen inte skadas.

Asfaltens egenskaper kan ändras genom åldring, tvättning, nötning samt biologisk och kemisk påverkan.

3.6.9 Asfaltmadrasser

Skyddslagret på en slänt kan även utföras med asfaltmadrasser, se **datablad C.11**.

Madrasserna förtillverkas av öppen stenasfalt med någon typ av armering, t ex ett metallnät eller en geogrid. För installation används ofta stållinor eller rep som ansluts till en spridare på en lyftkran.

Madrasser av fabrikat Bitumar för utläggning i en kanal i Nederländerna år 1996/97 hade planmått 10 ggr 6,8 m och vikten 20 ton. Madrasserna gjordes av en öppen stenasfalt med fibertillsats.

Madrasser kan läggas antingen kant i kant, varvid skarven täcks med sandasfalt, eller med överlappning.

En asfaltmadrass måste vara stabil som en enhet. Det är vanligen tillräckligt med en tjocklek på madrassen motsvarande två lager sten. Underlaget kan kräva särskilda åtgärder för att filterverkan skall kunna påräknas.

Asfaltens egenskaper kan ändras genom åldring, tvättning, nötning samt biologisk och kemisk påverkan.

Det förefaller något tveksamt om metoden klarar kraftigare vågbildning och is. Läggningsvikterna blir snabbt mycket stora.

4 Preliminär värdering

De flesta erosionsskydden anordnade enligt principerna A och B förefaller ha begränsat värde för skydd av fyllningsdammars uppströmsslänter. Undantaget är dels skydd av mycket låga dammar och dammar där speciella förhållanden råder, exempelvis behov av höjning av dammkrönet eller höga krav på miljöanpassning eller speciella topografiska förutsättningar som möjliggör dämpning av inkommande vågor. Erosionsskydd enligt princip A torde dessutom ofta kräva avancerade hydrauliska modellförsök eller i varje fall matematiska modellberäkningar.

Däremot finns ett antal intressanta lösningar inom grupp C och dessa kommenteras kort i det följande.

En allmän synpunkt är att det finns *ganska stora brister i verifiering* av de olika metodernas förmåga att motstå avsedda belastningar. Det beror sannolikt på att metoderna är utvecklade för andra tillämpningar med lägre krav på säkerhet än större dammar. Speciella brister finns när det gäller inverkan av frysning-tining och andra *iskrafter* och det beror väl dels på att många av erosionsskydden utvecklats i varmare klimat och dels på att laboratorieförsök för t ex ispåverkan överhuvudtaget inte varit särskilt vanliga. Ismekanik är en förhållandevis sent utvecklad vetenskap. Idag borde det dock finnas förutsättningar för modellförsök.

Rent teoretiskt förefaller det nästan nödvändigt att anordna skydd av samverkande enheter eller block för att motstå tänkbara iskrafter. Bevisläget är emellertid som sagt ganska dåligt och i Kanada har man nyligen bedömt att iskrafter knappast lett till skador på erosionsskydd (undantaget vittring pga frysning-tining). Det är dock tveksamt om dessa slutsatser har giltighet för de förhållanden som gäller svenska dammar med mindre blockstorlekar pga kortare stryklängder och lägre vågor.

Det verkar inte heller rimligt *ur teknisk synvinkel* att medvetet sträva efter att göra erosionsskyddens lutande yta 'småskaligt skrovlig' för att minska uppspolningen. Iskrafterna kan då bli alltför stora. Användning av t ex gabioner förefaller ur bl a denna synpunkt mindre bra för svenskt klimat i varje fall under normal vattenyta. Även de olika förekommande typerna av gjutna betongblock som ersättning för oordnad sprängsten bygger i första hand på en ökning av råheten för att medge mindre blockenheter. Eftersom detta samtidigt leder till sämre motståndsförmåga mot iskrafter bör gjutna, råa betongblock kanske undvikas så länge alternativ finns. *Ur miljösynpunkt* är å andra sidan en skrovlig yta på erosionsskydden med gott om hållrum av värde för det biologiska livet.

Mer storskaliga former kan eventuellt tänkas vara användbara både för att begränsa uppspolning och iskrafter, t ex införande av en mindre bankett ovanför högsta lugnvattenyta. Det är emellertid utrymmesmässigt svårt, men skulle möjligen kunna utföras genom att dammen förses med en mer eller mindre vertikal front (parapet), med foten något tillbakadragen från dammslanten.

Kvaliteten på verifiering av erosionsskyddens förmåga att motstå vågkrafter förefaller vara bättre i många fall än när det gäller iskrafter. Det gäller både skydd gjorda av

stenblock och av olika tillverkade enheter tillhörande gruppen genomsläppliga flexibla skydd. Generellt är bedömningsunderlaget sämre för de relativt branta slänter som förekommer på dammar än för flackare slänter.

Beträffande täta membran av olika slag finns en del positiv fälterfarenhet från betongdäcksdammar och asfaltklädda dammar, som tycks innebära god funktion, åtminstone så länge underdränaget fungerar väl. Eftersom kanske även en relativt begränsad skada i membrantätningen möjligen skulle kunna äventyra dessa skydds funktion över större områden, krävs god säkerhet mot sådana skador för såvitt inte skydden ges omfattande underdränering eller tillräcklig tyngd och/eller styrka att motstå lyftning. Preliminärt bedöms täta erosionsskydd i första hand ha intresse i samband med större ombyggnader för dammar vars tätkärnas funktion kan ifrågasättas exempelvis pga hydraulisk uppspräckning och/eller inre erosion. Undantag kan dock möjligen erosionsskydd av vältbetong samt kopplade element av betong i praktiken utformade som stödmurar eller bakåtförankrade.

Rent generellt är obearbetat naturmaterial som sten, grus etc att föredra ur miljösynpunkt. Sprängsten, krossat grus, etc kan också vara miljömässigt fullgott medan betongprodukter ur flera synvinklar utgör ett sämre alternativ. Produktion av betongprodukter kräver exempelvis relativt stor energiinsats. Asfaltprodukter är miljömässigt det sämsta alternativet.

Naturligtvis spelar även materialtillgången en roll ur miljösynpunkt; lokalt tillgängligt material som kan utvinnas utan större ingrepp i naturen och utan längre transporter är att föredra.

Den inventering och preliminära värdering som utförts som underlag för denna rapport är (med säkerhet) inte tillräckligt grundlig för att med säkerhet ha frambringat allt verifikationsunderlag som faktiskt existerar för de olika typerna av erosionsskydd. Inte desto mindre kan man peka ut ett antal lösningar som verkar mer 'lovande' ur teknisk synvinkel och det fortsatta utredningsarbetet inriktas i huvudsak mot dessa. Det kan noteras att en av dessa metoder utnyttjar det miljömässigt minst lämpliga materialet, asfalt:

Oordnat stenskydd av ensartat material

Oordnat skydd av betongblock

Ordnade stenskydd med långaxeln vinkelrätt mot slänten

Skydd av kopplade betongblock

Asfaltstabiliserad sten

Geotextilmadrasser

Vältbetong

Flack slänt (strand) av grus eller sten

Kopplade, bakåtförankrade betongblock

Kopplade betongelement utformade som parapet

I följande kapitel ges sålunda en närmare beskrivning av de utvalda varianterna av erosionsskydd med särskild hänvisning till de tre typfall som definierats i kapitel 2. För att möjliggöra en opartisk värdering av de olika varianterna bör dessutom bland annat

ekonomin belysas och jämföras med alternativet att fortsätta med frekvent underhåll av befintliga erosionsskydd. Denna jämförelse görs i kapitel

5 Metoder för erosionsskydd av svenska dammar

5.1 Oordnat skydd av sprängsten

För alla signifikanta våghöjder upp till ca 1,2 m blir dimensionering för is avgörande om man tills vidare utgår från att en minsta stenstorlek i ytskiktet på ca 0,70 m ($M = 560$ kg, $D_{n50} = 0,60$ m) krävs för detta ändamål. Erosionsskyddet bör då bestå av två lager med samtliga stenblock inom intervallet 0,64-1,00 m och tillsammans 1,5 m tjocklek, se **bilaga 5.1**. Under ytlagret skall ett minst 0,3 m tjockt övergångslager finnas. Det bör vara ett graderat material med $D_{85} \geq 0,13$ m. Övergångslagret skall dessutom ha intern stabilitet och uppfylla filterreglerna mot underliggande dammaterial. På jordfyllning torde ytterligare ett filterlager behövas.

För en signifikant våghöjd av 2,0 m behöver blockstorlekar och lagertjocklekar ökas med två tredjedelar.

Livslängden bedöms överstiga 50 år.

5.2 Oordnat skydd av betongblock

För detta exempel väljs ensartade betongblock, exempelvis av typ Quadripods, vilket (med $\rho_b = 2400$ kg/m³, $K = 7,0$ och $H = 1,27H_s$ i Hudson's formel) ger en erforderlig blockvikt av ca 1025 kg och en blockhöjd på 0,75 m för $H_s = 2,0$ m. Tjockleken på erosionsskyddets översta lager blir då ca 1,40 m, se **bilaga 5.2**. Lagret får en porositet av ca 46 %. Övergångslagret därunder kan bestå av graderat stenmaterial (eller betongblock på lämplig geotextil) med vikter upp till drygt 100 kg, motsvarande en stenstorlek (d_{85}) av ca 0,40 m. Lagrets tjocklek bör vara 0,8 m. Ytterligare filterlager krävs ofta.

För de lägre dimensionerande våghöjderna torde något mindre block kunna användas, men pålitliga kriterier för dimensionering av en Quadripod-slänt mot iskrafter saknas. Här antas att block om ca 500 kg med en höjd av 0,37 m kan användas. Ytlagrets tjocklek blir då 1,12 m och övergångslagrets 0,64 m (d_{85} ca 0,32 m). Antagandet behöver verifieras.

Livslängd överstigande 50 år.

5.3 Ordnat stenskydd enligt norsk modell

Erforderlig stenstorlek bestäms för en signifikant våghöjd upp till 1,5-2,0 m av isförhållandena enligt det norska synsättet. Följande utformning är således lämplig för hela registret upp till 2,0 m i signifikant våghöjd:

Block av ej vittringsbenäget berg och med avlång form produceras i särskilt bergtag. Minsta blockvikt $M = 370$ kg, $D_{n50} = 0,52$ m motsvarande en stenstorlek av ca 0,65 m ($c_b = 0,5$) individuellt placerade och individuellt kontrollerade i ett två stenar tjockt lager med stenarnas långaxel vinkelrätt mot släntyten, se **bilaga 5.3**. Ytlagrets totala tjocklek

ca 2,0 m. Därunder skall finnas ett lager av graderat material (grusig sten eller stenigt grus) uppfyllande filterreglerna mot underlaget och med $d_{85} \geq 0,12$ m. Lagertjocklek ca 0,30 m. Livslängd överstigande 50 år.

5.4 Kopplade betongblock med bakåtförankring (1)

Blocken är av fabrikat Armorflex med 225 mm tjocklek och 400x450 mm sida kopplade med stålkablar i mattor om 3,0 x 9,5 m storlek. Glidning är en kritiskt brottmod. Mattorna placeras därför på ett dränerande övergångslager av grusigt stenmaterial, här antaget till 0,30 m tjocklek, se **bilaga 5.4**. Där mattorna placeras på befintligt erosionsskydd av sprängsten anpassas avjämningens material så att en slät och stabil yta erhålls i nivå med topparna på de största stenblocken. Blocken väger ca 70 kg. Mattorna förankras upptill genom att kablarnas övre ände förs in i bakomliggande fyllning och förses med jordankare. Användbart för signifikanta våghöjder upp till 2,0 m. Verifiering av våg- och iståligheten för valda dimensioner behövs. Livslängd uppskattningsvis 25-50 år.

5.5 Asfaltstabiliserad stenfyllning

Metoden bygger på att befintligt erosionsskydd av sprängsten har högre permeabilitet (för asfalt) än underliggande stödfyll och förstärks genom ytlig asfaltspridning, jfr avsnitt 3.6.8. Avsikten är att åstadkomma ett minst 0,2 m tjockt lager av öppen stenasfalt med ca 10-20 % porositet i färdigt skick, se **bilaga 5.5**. Det kan antas att mängden asfaltblandning som behöver påföras är betydligt större än den teoretiska på grund av penetrering till större djup än önskat. Överslagsvis räknas med omkring 300 kg asfaltblandning per kvadratmeter släntyta. Asfalten påföres i en omgång i ett rutmönster efter att den befintliga sprängstensslänten i görligaste mån tvättats med vatten under högt tryck. Pilotförsök på aktuellt släntmaterial krävs innan metodiken och val av asfaltblandning kan bestämmas. Troligen begränsad livslängd, uppskattningsvis 10-20 år. Bedöms vara användbart för signifikanta våghöjder upp till 2,0 m med angivet utförande.

5.6 Geotextilmadrasser

Geotextilmadrasser av fabrikat Foreshore Protection med 0,2 m tjocklek förefaller kunna användas som erosionsskydd upp till en signifikant våghöjd av omkring 1,0 m om madrasserna placeras på en 0,3 m tjock dränerande avjämning av grusig sten, se **bilaga 5.6**. Där madrasserna placeras på befintligt erosionsskydd av sprängsten anpassas avjämningens material så att en slät och stabil yta erhålls i nivå med topparna på de största stenblocken. För att tåla förekommande isbelastningar krävs att madrasserna är förankrade på lämpligt sätt. Här antas det ske genom att de viks ner i överkant och täcks med lämplig fyllning. Trolig livslängd 15-30 år.

5.7 Vältbetong

Vältbetongen påförs i 0,3 m tjocka och 3 m breda lager, vilket ger en drygt 1,3 m tjock betongbeläggning mätt vinkelrätt mot slänten. Beläggningen placeras på en 0,3 m tjock

dränerande avjämning av grus eller makadam ovanpå befintlig stödfyllning i dammen, se **bilaga 5.7**. Beläggningen dräneras dessutom genom att dia 100 mm plaströr fyllda med grus eller makadam inlägges horisontellt c/c 5 m i var tredje lager vältbetong före spridning av betongen. Vältbetongen bearbetas genom en överfart med icke-vibrerande vält följts av minst sex överfarter med 10 tons vibrovält. Fogar åstadkomms genom indrivning av sprickinitierande metallbleck c/c 8 m i nyss placerat lager. Cementhalten (anläggningscement) antas vara 180 kg/m^3 . Ingen pozzolantillsats. Tillsatssmedel för luftporbildning skall användas så att frostbeständighet kan påräknas. Användbart för signifikanta våghöjder upp till minst 2,0 m. Livslängd överstigande 50 år.

5.8 Flack slänt (strand) av sand, grus eller sten

Förutsättningen för denna lösning är att lämpligt naturmaterial står att finna inom rimligt avstånd, att dammslänten är låg och vågbelastningen måttlig, exempelvis vid sadeldammar i relativt skyddat läge. Här antas naturmaterial påföras uppströms befintlig dammslänt med äldre erosionsskydd så att en minst fem meter bred bankett bildas och den nya uppströmsslänten får en lutning av maximalt 1V:10H, se **bilaga 5.8**. Utförandet kan förväntas vara lämpligt för signifikanta våghöjder upp till 0,50-0,75 m. Nytt material antas behöva påföras efter 15-30 år.

5.9 Kopplade betongblock med bakåtförankring (2)

Detta alternativ består av en vertikal (eller brant lutande) front av 0,2 m tjocka kvadratiska betongplattor med ca 0,4 m sida, bakåtförankrade med hjälp av korrosionsskyddad jordarmering som placeras succesivt under uppbyggnad av bakomliggande dammfyllning på varje lager, se **bilaga 5.9**. Antagen lagertjocklek är då densamma som plattornas vertikala dimension, dvs 0,4 m. Fyllningen skall utgöras av ett icke tjälskjutande, erosionsstabil sandigt grus. Stabiliteten behöver demonstreras med hjälp av glidyteberäkningar. *Konstruktionen lämpar sig i första hand för placering över högsta magasinsytan, t ex där en höjning av dammkrönet krävs för våguppspolning.* Lämpligt för signifikanta våghöjder upp till minst 2,0 m. Antagen konstruktionshöjd 2,0 m. Livslängd troligen inom intervallet 20-50 år.

Om plattorna utformas lämpligt och ansluts till dammens tätkärna kan användning även tänkas inom höjdregistret för tillfällig överdämning. Användning av denna variant under ordinarie dämningssgräns är däremot tveksamt om det innebär att jordarmeringen hamnar delvis inom tätkärnan, innebärande dels att läckvägar introduceras genom kärnan, dels att armeringen läggs i ett tjälskjutande material, vilket kan antas avkorta dess livslängd genom nötning och mer omfattande korrosion.

5.10 Kopplade betongelement av parapetmodell

Även denna konstruktion lämpar sig i första hand för höjning av dammkrön för vågor eller tillfällig överdämning. Betongelementen utgörs här av prefabricerade stödmursegment av erforderlig höjd, här antagen till 2,0 m, se **bilaga 5.10**. Elementens bredd väljs till 1,5 m, vilket ger en vikt av ca 2,5 ton per enhet. På lägre nivå antas

erosionsskyddet utföras som oordnad sprängstensfyllning. Muren placeras något indragen från släntytan av stabilitetsskäl på en packad avjämnning av 0,3 m grus eller makadam. Stabiliteten behöver även för denna lösning demonstreras med hjälp av glidyteberäkning. Dammens tätkärna höjs i erforderlig grad. Livslängd överstigande 50 år. Användbart för signifikanta våghöjder upp till åtminstone 2,0 m.

5.11 Underhåll av befintliga erosionsskydd

Ett uppenbart alternativ till att genomföra en större ombyggnad av befintliga erosionsskydd av tippad graderad sprängsten är naturligtvis att fortsätta med relativt täta underhållsåtgärder på nuvarande skydd under förutsättning att detta är dammsäkerhetsmässigt acceptabelt. Överslagsvis kan man kanske räkna med åtgärder vart 10:e år i form av påförande av nya bergmassor av tillgänglig och någorlunda lämplig blockstorlek. Massorna antas påföras i närheten av den vanligaste vattenytans nivå, där som regel svackor bildas genom omlagringar av instabila skydd.

6 Kostnader

6.1 Allmänt

Bedömda kostnader för anläggning och underhåll av de olika varianterna av erosionsskydd beskrivna ovan finns redovisade på **bilagorna 5.1-5.11**.

Det bör noteras att beräkningarna förutsätter att de olika erosionsskydden är färdiga för kommersiell användning. Kostnader har sålunda ej medtagits för eventuellt erforderlig utveckling och/eller verifiering för att nå detta mål. I flera fall är såväl utformning som kostnader osäkra därför att såväl stabilitetsberäkningar som viss anpassning av metoderna erfordras innan de kan användas på olika fyllningsdammar. **De visade okonventionella utformningarna i avsnitten 5.4-5.10 och motsvarande kostnader kan därför inte användas direkt i skarpt läge - analys krävs alltid i det enskilda fallet.**

Följande förutsättningar och antaganden gäller i övrigt:

Ekonomiska parametrar

Jämförelseparameter är diskonterat nuvärde av investering och eventuella reinvesteringar

Betraktad tidsperiod 50 år

Restvärden försummas

Real diskonteringsränta 5 %

Investeringskostnader

Projektering, kontroll och administration uppskattas särskilt för varje lösning

Ränta under byggnadstiden försummas

Prisnivå 1998

Kostnader för underhåll och reinvesteringar

Årligt underhåll antas inte ske. Underhållet antas istället samlat till ett mindre antal större reinvesteringar. Antaget reinvesteringsintervall anges särskilt för de olika erosionsskydden.

Övriga förutsättningar

Kostnadsuppskattningen måste uppenbarligen grundas på ett antal mer schablonmässiga fysiska förutsättningar eftersom exakt definierad byggplats saknas. Följande antaganden och bedömningar har gjorts:

- Bergtäkt för utvinning av både sprängsten och övergångslager har antagits beläget på 50 km avstånd från byggplatsen. Normala tätkostnader

- Betongblock av typ Quadripods och Armorflex antas tillverkade vid fabrik belägen 100 km från byggplatsen. Inköpspris vid fabrik 385 respektive 750 kr/st för Quadripods och 1000 kr/m² för Armorflex-element. Även asfalt antas kunna inköpas 100 km från byggplatsen till ett pris av 350 kr/ton
- Övrig betong tillverkas vid betongstation på byggplatsen
- Schakt i befintlig dammslänt och utplacering av erosionsskydd och övergångsmaterial antas utföras med hjälp av grävmaskin med förlängd sticka i typfall A och med draglinemaskin i typfall B och C, maximal räckvidd ca 35 m. För ordnat stenskydd av norsk modell kompletteras byggresursen med en man och en grävmaskin
- Mängder är beräknade för en 300 m lång slänt som skall skyddas på en höjd varierande från 5 m till 10 m respektive 15 m i Typfall A, B och C
- Arbetena har antagits kunna bedrivas med magasinsvattenytan avsänkt, dvs **inga kostnader för arbete i vatten har medtagits**

6.2 Kostnadsjämförelse

De totala kostnaderna, dvs nuvärdet av investering och eventuella reinvesteringar inom den betraktade 50-årsperioden har beräknats som följer för de tre typfallen A, B och C med dimensionerande signifikanta våghöjder av 0,5 m, 1,0 m respektive 2,0 m:

Beräknade kostnader, MSEK, prisnivå 1998

Erosionsskydd	Typfall A	Typfall B	Typfall C
5.1 Oordnat stenskydd	2,2	5,1	12,6
5.2 Oordnade btgblock	5,4	11,4	21,2
5.3 Ordnat stenskydd	3,2	7,6	11,5
5.4 Kopplade btgblock (1)	7,6	13,9	20,0
5.5 Asfaltstabiliserad sten	3,3	5,3	7,3
5.6 Geotextilmadrasser	5,1	11,9	-
5.7 Vältbetong	7,6	15,6	23,4
5.8 Flack slänt (strand)	2,8	-	-
5.9 Kopplade btgblock (2)	(2,6)	(2,6)	(2,6)
5.10 Kopplade btgblock, parapet	(3,8)	(3,8)	(3,8)
5.11 Underhåll av befintliga	1,0	1,9	2,8
Erosionsskydd			

Av tabellen framgår att fortsatt underhåll av existerande erosionsskydd av sprängsten är den ekonomiskt mest tilltalande metoden under ovan angivna

förutsättningar. Om möjligt väljer man då naturligtvis att komplettera med relativt grovt stenmaterial.

Om man av någon anledning vill slippa ifrån täta reparationsåtgärder bör man ur ekonomisk synvinkel i första hand undersöka de faktiska förutsättningarna att bygga nytt erosionsskydd av oordnad stenfyllning med *tillräcklig* blockstorlek enligt avsnitt 5.1, av ordnad stenfyllning enligt norsk modell (avsnitt 5.3) eller möjligen att stabilisera existerande erosionsskydd med asfalt (avsnitt 5.5). Under lämpliga förutsättningar kan man kanske även välja att anordna en flack slänt (strand) av finare material enligt avsnitt 5.8. De två senare metoderna kräver dock viss utveckling/verifiering.

De olika erosionsskydden av oordnade eller kopplade betongblock, vältbetong och betongfyllda geotextilmadrasser kan inte konkurrera kostnadsmässigt.

Att anordna tillkommande erosionsskydd med hjälp av kopplade vertikala betongelement bakåtförankrade med jordankare (enligt avsnitt 5.9) eller med självbärande prefabricerade betongelement, parapeter (enligt avsnitt 5.10) förefaller ekonomiskt intressant där det kan bli aktuellt med en höjning av dammkrönet mht våguppspolning eller tillfälliga överdämningar. Fördelarna med dessa metoder är emellertid främst utrymmesmässiga, dvs höjning av dammkrönet kan bli möjligt utan att hela dammens nedströmsslänt behöver förstärkas. För förstärkning av ett existerande släntskydd kan metoderna däremot inte konkurrera.

6.3 Sensitivitet, varianter och felkällor

För att belysa hur pålitliga slutsatserna ovan är kan det vara intressant att diskutera inverkan därpå av vissa ändringar i de antagna förutsättningarna och möjliga felkällor. I det följande kommer en rad av dessa faktorer att varieras, i huvudsak en åt gången.

Man kan inledningsvis notera att underhåll av befintliga skydd förblir konkurrenskraftigt även om underhåll i här antagen omfattning skulle behöva göras vart 5:e år i stället för vart 10:e år eller om berörda massor skulle fördubblas i omfattning.

Slutsatsen att erosionsskydd av olika slags betongelement inte kan konkurrera prismässigt med erosionsskydd av sprängsten gäller även om transportavstånden för bergmassor skulle öka från här antagna 100 km till 200-250 km eller om tätkostnaderna skulle öka väsentligt.

Härtill kommer vissa brister i verifierad kapacitet för metoderna som utnyttjar olika slags ordnade betongelement. De här antagna utformningarna av skydden med betongelement får anses vara relativt optimistiskt valda. Det är således större risk att kostnaderna för betongskydden underskattats än överskattats.

Även för asfaltstabiliserad sten och flacka slänter finns osäkerheter beträffande vissa parametrar, exempelvis asfaltåtgång och lämplig lutning för de flacka slänterna.

För mindre (kortare) slänter med mindre arbetsvolymmer än de som här förutsatts ökar kostnaderna för tillfälliga anordningar inklusive bergtag i betydelse, vilket möjligen

skulle kunna förändra den ekonomiska jämförelsen mellan olika slags erosionsskydd så att t ex betongelement tillverkade vid en existerande betongstation/fabrik blir mer konkurrenskraftiga. Motsatsen gäller för arbeten av större omfattning än här antaget.

Om man inte har praktiska möjligheter att genom t ex avsänkning av magasinet låta arbetena ske i torrhet, påverkas både den ekonomiska jämförelsen och kostnaderna i sig. Ordnade stenskydd enligt avsnitt 5.3 (norsk modell) förutsätter mycket noggrann byggkontroll, vilket torde vara svårt eller omöjligt att åstadkomma under vattenytan. Även alternativet med vältbetong (enligt 5.7) faller bort om torrläggning av arbetsytan inte kan ske. Metoderna med kopplade betongelement med bakåtförankring (5.9) eller av parapetmodell (5.10) är främst aktuella för användning över ordinarie dämningssgräns varför problemet inte uppkommer. Övriga metoder är i princip användbara även om byggnation måste ske delvis i vatten, men med kvalitativt sämre resultat. Kostnadsjämförelsen mellan dessa metoder påverkas, men troligen inte särskilt mycket, eftersom kostnadsökningarna i viss grad är av gemensam natur och kan hänföras till placering av övergångslagret under ytskiktet av skyddet. För asfaltstabilisering är svårigheterna naturligtvis annorlunda.

Under vissa förutsättningar kan måhända ett erosionsskydd som närmast är en hybrid av de två mest ekonomiska lösningarna bli aktuell. Det gäller dammslänter som inte har större utsträckning under sänkningsgränsen i magasinet. Här har man möjligheten att lägga ett nytt erosionsskydd av sprängsten med tillräcklig blockstorlek direkt utanpå befintligt erosionsskydd. Det nya skyddet bör då vila på en utfyllnad som fortsätter ända ned till dammtån med oförändrad släntlutning, 1V:2H. Materialet i denna stödfyllnad bör enligt [7] väljas med blockvikter M/15 - M/10. Ekonomiskt blir denna typ av skydd sannolikt mindre fördelaktigt än fortsatt underhåll av befintligt erosionsskydd i de flesta fall, men där förutsättningar är de rätta, mer fördelaktigt än att schakta bort befintligt erosionsskydd och bygga helt nytt.

7 Värdering ur miljösynpunkt

Miljöpåverkan av olika sorters erosionsskydd kan allmänt sammanfattas som följer, med tonvikt på inverkan av erosionsskydden i driftskedet:

- Erosionsskydd påverkar såväl den fysiska som biologiska miljön i vattnet och i viss mån även människans miljö ur praktisk och estetisk synpunkt
- Olika typer av erosionsskydd ger olika typer av miljöpåverkan bl.a. beroende på fysiska och kemiska egenskaper hos det använda materialet
- Erosionsskydd kan påverka vattenmiljön både positivt och negativt
- Genom ett aktivt val av material som används till erosionsskydd kan vissa positiva miljöeffekter tillskapas, t.ex. en ökning av den biologiska mångfalden
- Miljön som sådan kan även påverka erosionsskydd genom fysiska, kemiska och biologiska processer, t.ex. erosion, korrosion, urlakning, frostsprängning och påväxt.
- Obearbetat naturmaterial, t.ex. rundsten, är att föredra men även sprängsten, krossat grus är miljömässigt ett fullgott material i erosionsskydd
- Betongprodukter är ett sämre alternativ beroende bland annat på energibehovet vid cementproduktion
- Asfaltprodukter är miljömässigt det sämsta alternativet

Specificerade miljömässiga krav saknas som tidigare nämnts för vattenbyggnader och för anläggningskonstruktioner överhuvudtaget. Allmänt kan man dock förutsätta att en vald utformning inte får ge upphov till signifikanta emissioner eller till väsentliga estetiska eller biologiska problem. Man kan också genom val av material och utformning bidra till specifika miljöförbättringar.

De i denna studie diskuterade utformningarna av erosionsskydd kan således rangordnas ur miljösynpunkt på följande vis *med hänsyn till funktionen hos det färdiga erosionsskyddet*:

Bästa utformning	1. Flack slänt (strand) av sand, grus eller sten enligt 5.8
	2. Ordnat eller oordnat skydd av sprängsten enligt 5.1, 5.3 och 5.11
	3. Skydd av betong enligt 5.2, 5.4, 5.6, 5.7, 5.9 och 5.10
Sämsta utformning	4. Asfaltstabiliserad stenfyllning enligt 5.5

I det enskilda fallet kan den miljömässiga rangordningen emellertid mycket väl avvika från ovanstående beroende exempelvis på att erforderliga transporter kan variera i omfattning och att möjligheterna att uppbringa lämpliga byggnadsmaterial utan miljöstörningar kan vara olika. Ingrepp i form av nya, avlägsna bergtag kan mycket väl vara den största miljöstörningen från ett nytt eller ombyggt erosionsskydd.

8 Slutsatser

En jämförelse av erosionsskydd för svenska fyllningsdammar av å ena sidan naturmaterial som sten och grus och å andra sidan betongelement visar att erosionsskydd av naturmaterialen är att föredra ur såväl teknisk, ekonomisk som miljömässig synvinkel.

För erosionsskydd av olika slags betongelement saknas övertygande bevis angående motståndsförmågan mot ispåverkan. De flesta typerna används dessutom regelmässigt på slänter med betydligt flackare lutning än de som är vanliga på svenska fyllningsdammar, varför även verifikation av erosionsskyddens stabilitet vid vångangrepp kan saknas.

Erosionsskydd av betongelement är dessutom väsentligt dyrare än alternativen av sprängsten för praktiskt taget alla i Sverige aktuella situationer med möjligt undantag för mycket små arbeten.

Miljöeffekterna av de olika erosionsskydden är som regel måttliga eller små. Dock har de olika naturmaterialen ett försteg ur biologisk synvinkel. Speciellt lämpliga är obearbetade naturmaterial som sand, grus och rundsten. I den mån mer betydande miljöeffekter förekommer torde dessa härröra från öppnande av bergtag, transporter och cementproduktion.

Sammanfattningsvis, finns det ingen omedelbar anledning att vidareutveckla metoder baserade på olika slags prefabricerade betongelement eller betongfyllda geotextilmadrasser för användning på svenska fyllningsdammar. Ett undantag är situationer där en höjning av dammkrönet övervägs. I detta fall kan här beskrivna metoder med kopplade, bakåtförankrade betongblock vara av visst intresse.

Asfaltstabilisering av befintliga erosionsskydd förefaller ekonomiskt mest fördelaktigt av de alternativa metoderna. Dock är denna metod ännu inte tekniskt fullt demonstrerad, den är komplicerad att använda och dessutom miljömässigt sämst.

Slutsatsen av denna studie är att fortsatt underhåll av befintliga erosionsskydd av sprängsten är att föredra i de allra flesta fall. Dock bör man fortsättningsvis förstärka skydden med block som är tillräckligt stora för att vara stabila.

Där man av någon anledning föredrar att bygga nytt erosionsskydd, exempelvis därför att befintligt skydd är i så dålig kondition att dammsäkerheten skulle kunna bli lidande, bör man normalt välja att bygga ett erosionskydd av (1) oordnad sprängsten, av (2) ordnad sprängsten enligt norsk modell eller, om de lokala förhållandena medger det, anlägga (3) en flack strand av natursten och grus.

9 Referenser

- [1] Permanent International Association of Navigation Congresses, Guidelines for the Design and Construction of Flexible Revetments Incorporating Geotextiles in Marine Environment, 1992
- [2] VASO Dammkommittes rapport nr 10, Vågor i vattenkraftmagasin, 1995
- [3] VASO Dammkommittes rapport nr 11, Erosionsskydd för fyllningsdammars uppströmsslänt, 1995
- [4] Hans Alexandersson, SMHI, Sambandet mellan extrem nederbörd och vind, 1993-08-16
- [5] Haldo Vedin, SMHI, PM angående extrema vindförhållanden på de stora regleringsmagasinen i norra Sverige, 1988-03-30
- [6] US Army Corps of Engineers, Shore Protection Manual, 1977
- [7] US Army Corps of Engineers, Shore Protection Manual, 1984
- [8] Delft Hydraulics Publication No. 483, Conceptual Design of Rubble Mound Breakwaters, december 1993
- [9] Société d'énergie de la Baie James, Riprap Sizing Practical Guide, 1997
- [10] Ashton, George D, River and Lake Engineering, 1986
- [11] Transactions, Symposium on Ice Problems, Luleå 1978
- [12] Michel, Bernard, Ice Mechanics, 1978
- [13] PIANC, Reinforced vegetative bank protection utilising geotextiles, 1996
- [14] Andersson, Fossgaard, Pinella, Ramos, Fortuna Dam, Panama, ICOLD Bulletin 32a, 1982
- [15] ASCE Task Committee on Overtopping Protection, 1994
- [16] ICOLD Bulletin 32a, Bituminous concrete facings for earth and rockfill dams
- [17] US Bureau of Reclamation, Installation of Flexible Membrane Lining at Mt. Elbert Forebay Reservoir
- [18] University of New South Wales, Collapsible Block Mattress Wave flume physical model testing, WRL Technical Report 97/32, October 1997

Bilagor

A Bilaga 3.1 - LITTERATURSÖKNING VID KTHs BIBLIOTEK

Litteratursökningen vid KTHs bibliotek gjordes 1996-12-12. Databasvärd var "Dialog". Följande databaser genomfördes:

- **GeoArchive.** Coverage from 1974. Index to literature covering all aspects of the geosciences, with particular emphasis on economic geology, hydrology, water resources, the environment, and conservation.
- **Geobase.** Coverage from 1980. Coverage of the international literature on geography, geology, ecology, and their related disciplines.
- **GeoRef.** Coverage from 1785. Index to the worldwide technical literature on geology and geophysics.
- **Ei Compendex*Plus.** Coverage from 1970, conference materials from 1982. Wide-ranging coverage of the world's significant engineering and technology literature, including computers and robotics.
- **SciSearch:** a Cited Reference Science Database. Coverage from 1988. A multidisciplinary index to the international literature of science and technology, covering every area of the pure and applied sciences.
- **NTIS:** National Technical Information Service. Coverage from 1964. The results of U.S. government-sponsored research, development, and engineering; analyses from U.S. federal agencies, contractors, or grantees; and R&D sponsored by the governments of other industrialised nations.
- **PASCAL.** Coverage from 1973. A multidisciplinary database that abstracts international literature covering a wide range of topics in the life and physical sciences and engineering.

För sökningen definierades sökord som ordnades i sökgrupper som kombinerades enligt följande sammanställning:

Sök-grupp	Sökord	Antal funna titlar
S2	Wave or current or water	2931767
S4	Beach or foreshore or shore or groin or coast or dam	230636
S5	Erosion or scour	129270
S6	Apron or revetment or lining or facing or protection or riprap or armour or defence or stabilization	494397
S7	Canal or river or bank or waterway or spillway or breakwater or bund or dike or embankment	482399
S16	S7 and (S2 or ice) and S5 and S4 and S6	631
S17	Protection or stabilization or defence or control	2161082
S18	S16 and S17	564

Olika stavning för sökorden, t ex riprap, rip-rap, dike, dyke, groin, groyne etc beaktades. Ävenså beaktades både singular- och pluralformerna för sökorden.

Genom att begänsa sökgruppen S18 ytterligare med avseende på presentationen av resultatet av litteratursökningen kunde antalet funna titlar fås ned till hanterbara

B Bilagor 5.1 – 5.11 Släntskydd

B.1 Bilaga 5.1 – Oordnat stenskydd

Beskrivning	Enhet	Mängd	A-pris	Fall A Kostnad	Mängd	A-pris	Fall B Kostnad	Mängd	A-pris	Fall C Kostnad
Schakt i damm	m3	6 100	40	244 000	12 100	90	1 089 000	30 200	90	2 718 000
Övergångslager	m3	1 000	300	300 000	2 000	310	620 000	5 000	325	1 625 000
Erosionsskydd av sprängsten	m3	5 100	305	1 555 500	10 100	310	3 131 000	25 200	315	7 938 000

Proj. kontroll,
administration

150 000

225 000

300 000

Summa, inv.kostnad, SEK

2 249 500

5 065 000

12 581 000

Reinvestering,%
Intervall, år
Disk.ränta %
Nuvärde

-

-

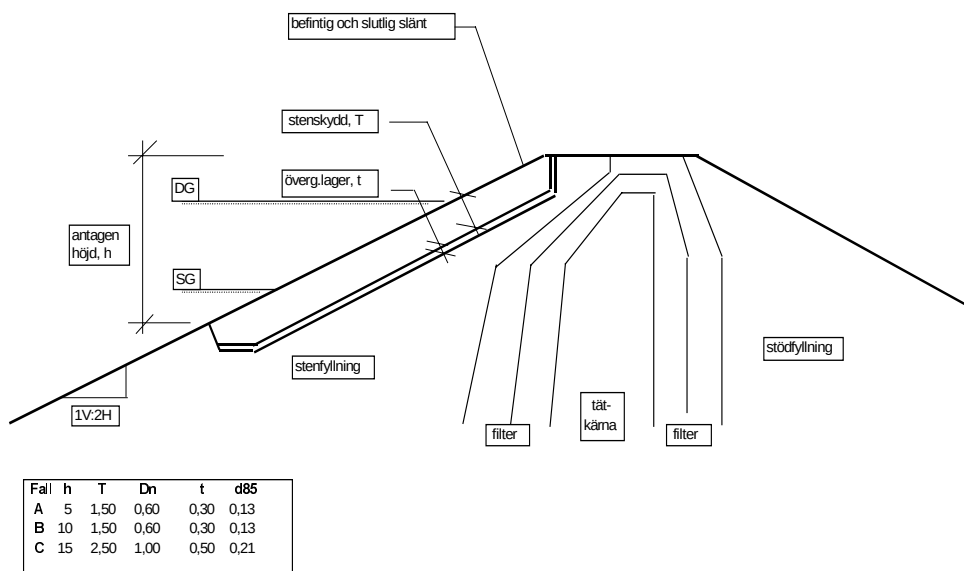
-

Total kostnad, SEK

2 249 500

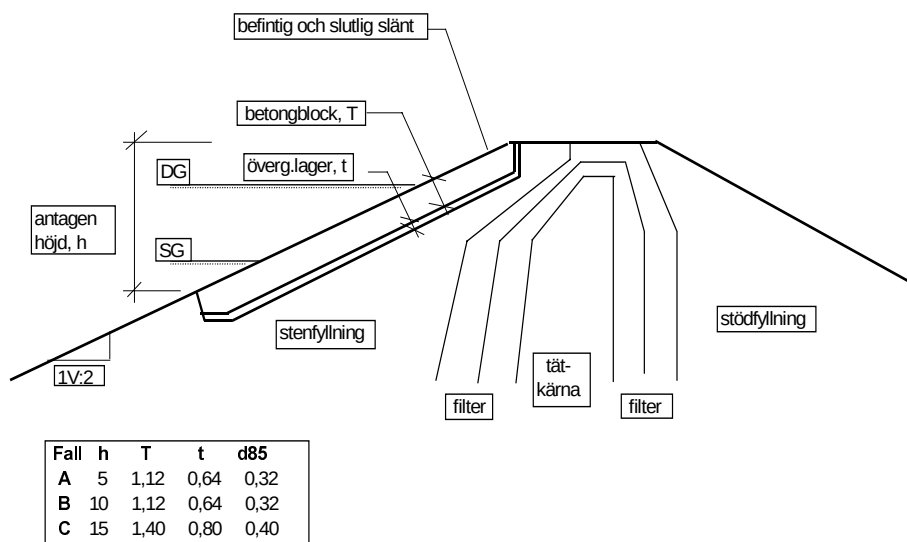
5 065 000

12 581 000



B.2 Bilaga 5.2 – Oordnade betongblock

Beskrivning	Enhet	Mängd	A-pris	Fall A Kostnad	Mängd	A-pris	Fall B Kostnad	Mängd	A-pris	Fall C Kostnad
Schakt i damm	m3	6 000	40	240 000	11 800	90	1 062 000	22 200	90	1 998 000
Övergångslager	m3	2 200	300	660 000	4 300	310	1 333 000	8 100	325	2 632 500
Erosionsskydd av betongblock typ Quadripods	m3	3 800	1 150	4 370 000	7 500	1 175	8 812 500	14 100	1 155	16 285 500
Proj. kontroll, administration				150 000			225 000			300 000
Summa, inv.kostnad, SEK				<u>5 420 000</u>			<u>11 432 500</u>			<u>21 216 000</u>
Reinvestering,%										
Intervall, år										
Disk.ränta %										
Nuvärde				-			-			-
Total kostnad, SEK				<u>5 420 000</u>			<u>11 432 500</u>			<u>21 216 000</u>

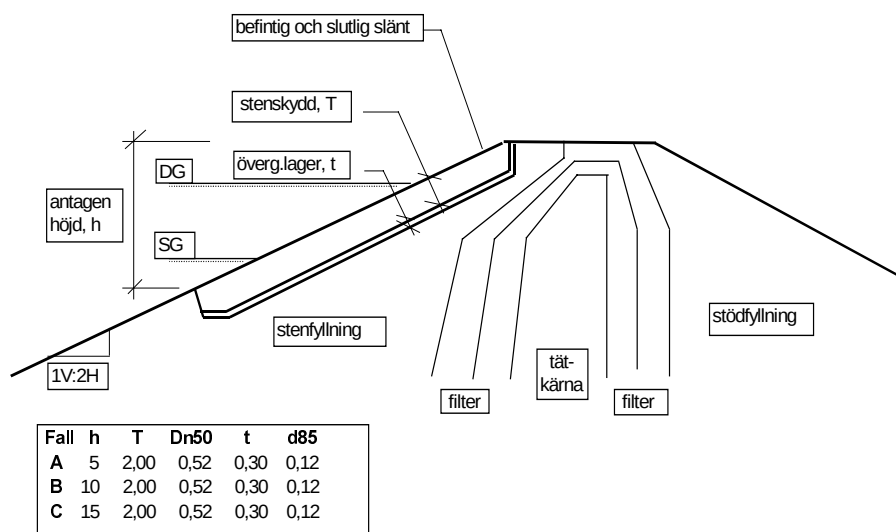


B.3 Bilaga 5.3 – Ordnat stenskydd

Beskrivning	Enhet	Mängd	A-pris	Fall A	Mängd	A-pris	Fall B	Mängd	A-pris	Fall C
				Kostnad			Kostnad			Kostnad
Schakt i damm	m3	7 700	40	308 000	15 400	90	1 386 000	23 100	90	2 079 000
Övergångslager	m3	1 000	300	300 000	2 000	310	620 000	3 000	325	975 000
Erosionsskydd av sprängsten	m3	6 700	360	2 412 000	13 400	395	5 293 000	20 100	400	8 040 000

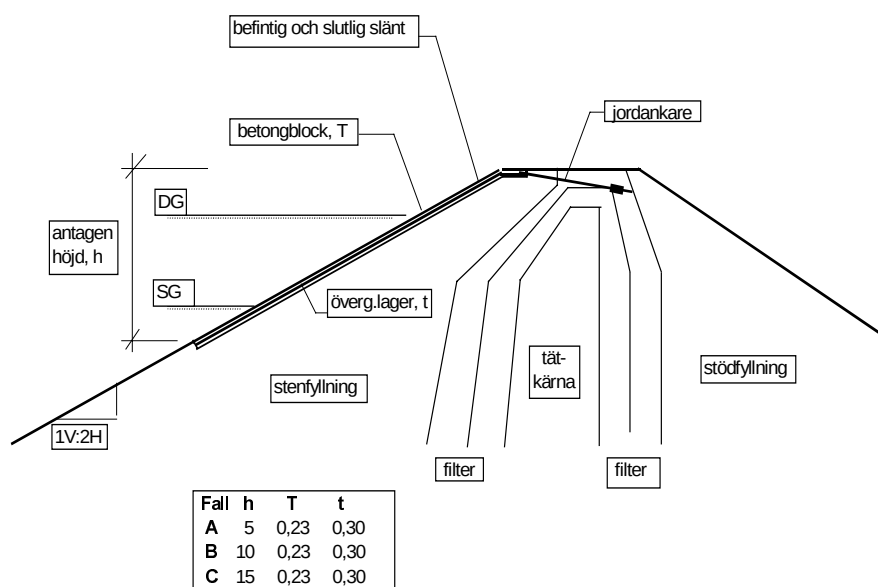
Proj. kontroll, administration			200 000				300 000			400 000
Summa, inv.kostnad, SEK				<u>3 220 000</u>			<u>7 599 000</u>			<u>11 494 000</u>

Reinvestering,%				-			-			-
Intervall, år										
Disk.ränta %										
Nuvärde										
Total kostnad, SEK				<u>3 220 000</u>			<u>7 599 000</u>			<u>11 494 000</u>



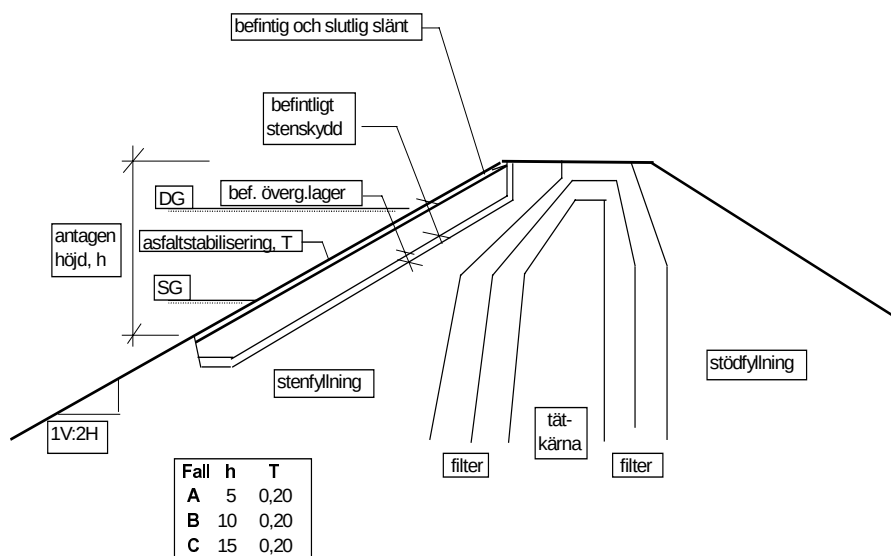
B.4 Bilaga 5.4 – Kopplade betongblock (1)

Beskrivning	Enhet	Mängd	A-pris	Fall A Kostnad	Mängd	A-pris	Fall B Kostnad	Mängd	A-pris	Fall C Kostnad
Schakt i damm	m3	3 490	50	174 500	4 890	160	782 400	6 350	160	1 016 000
Övergångslager	m3	2 600	300	780 000	3 250	310	1 007 500	3 950	325	1 283 750
Erosionsskydd av betongblock typ Amorfex 225 mm inkl. jordankare	m3	890	6 000	5 340 000	1 640	6 000	9 840 000	2 400	6 000	14 400 000
Proj. kontroll, administration	-			150 000			250 000			350 000
Summa, inv.kostnad, SEK				<u>6 444 500</u>			<u>11 879 900</u>			<u>17 049 750</u>
Reinvestering, %	75									
Intervall, år	30									
Disk.ränta %	5									
Nuvärde				1 118 334			2 061 556			2 958 696
Total kostnad, SEK				<u>7 562 834</u>			<u>13 941 456</u>			<u>20 008 446</u>



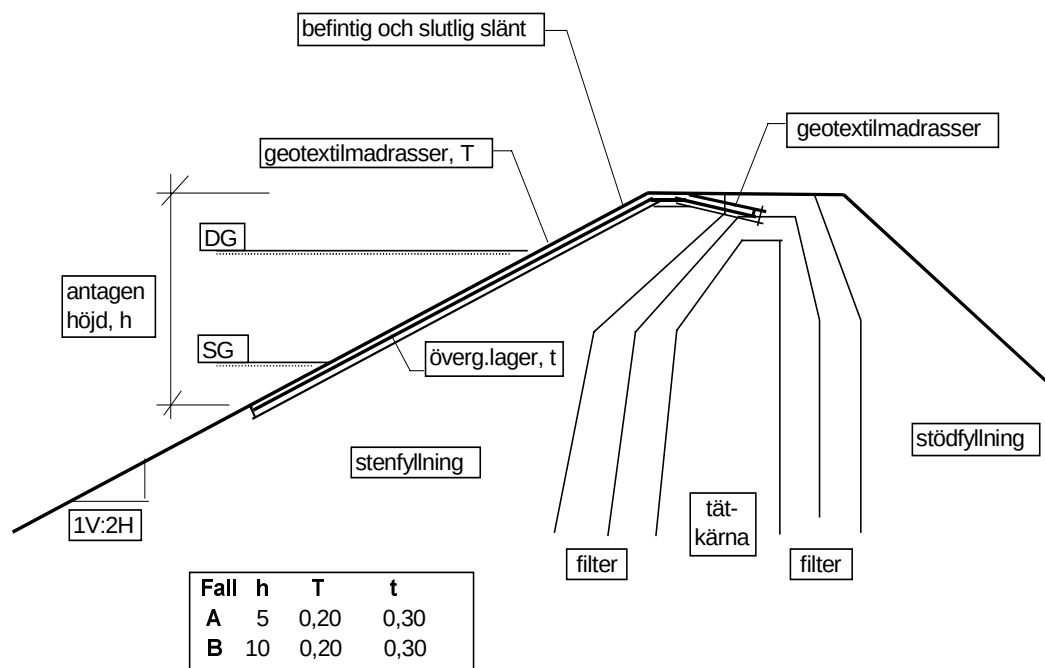
B.5 Bilaga 5.5 – Asfaltstabiliserad sten

Beskrivning	Enhet	Mängd	A-pris	Fall A		Fall B		Fall C		
				Kostnad	Mängd	A-pris	Kostnad	Mängd	A-pris	Kostnad
Högtryckstvättning av befintlig slänt	m2	4 200	3	12 600	7 500	3	22 500	10 900	3	32 700
Rep av bef slänt med sprängsten	m3	500	350	175 000	700	380	266 000	900	380	342 000
Pilotförsök asfaltstabilisering	m2	400	1 000	400 000	400	1 000	400 000	400	1 000	400 000
Asfaltstabilisering, 300 kg/m2	m2	4 000	315	1 260 000	7 300	315	2 299 500	10 700	315	3 370 500
Proj. kontroll, administration	-			200 000			275 000			350 000
Summa, inv.kostnad, SEK				2 047 600			3 263 000			4 495 200
Reinvestering,%	75									
Intervall, år	15									
Disk.ränta %	5									
Nuvärde 1				738 698			1 177 169			1 621 701
Nuvärde 2				355 326			566 238			780 066
Nuvärde 3				170 918			272 370			375 225
Total kostnad, SEK				3 312 542			5 278 778			7 272 192



B.6 Bilaga 5.6 – Geotextilmadrasser

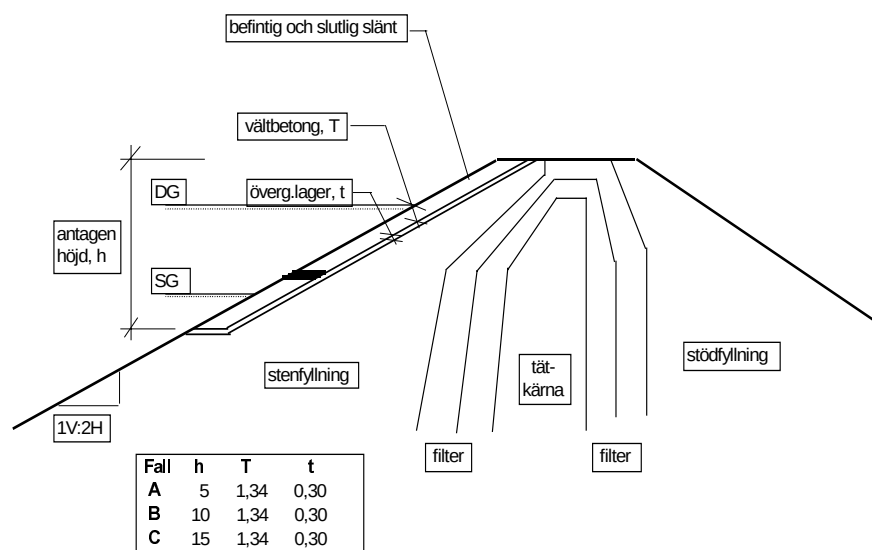
Beskrivning	Enhet	Mängd	A-pris	Fall A Kostnad	Mängd	A-pris	Fall B Kostnad
Schakt i damm	m3	7 800	50	390 000	14 650	160	2 344 000
Övergångslager (avjämn.)	m3	2 000	310	620 000	3 100	320	992 000
Erosionsskydd av betongfyllda dränerade geotextilmadrasser, typ Foreshore Protection 0,2m	m2	5 800	430	2 494 000	11 550	430	4 966 500
Proj. kontroll, administration	-			150 000			250 000
Summa, inv.kostnad, SEK				3 654 000			8 552 500
Reinvestering,%	75						
Intervall, år	20						
Disk.ränta %	5						
Nuvärde 1				1 032 866			2 417 510
Nuvärde 2				389 276			911 134
Total kostnad, SEK				5 076 142			11 881 145



B.7 Bilaga 5.7 – Vältbetong

Beskrivning	Enhet	Mängd	A-pris	Fall A Kostnad	Mängd	A-pris	Fall B Kostnad	Mängd	A-pris	Fall C Kostnad
Schakt i damm	m3	5 700	40	228 000	11 400	90	1 026 000	17 100	90	1 539 000
Övergångslager	m3	1 000	300	300 000	2 000	310	620 000	3 000	325	975 000
Vältbetong inkl dräner	m3	4 700	1 450	6 815 000	9 400	1 450	13 630 000	14 100	1 450	20 445 000

Proj. kontroll, administration	-			250 000			350 000			450 000
Summa, inv.kostnad, SEK				<u>7 593 000</u>			<u>15 626 000</u>			<u>23 409 000</u>
Reinvestering,%										
Intervall, år										
Disk.ränta %										
Nuvärde				-			-			-
Total kostnad, SEK				<u>7 593 000</u>			<u>15 626 000</u>			<u>23 409 000</u>



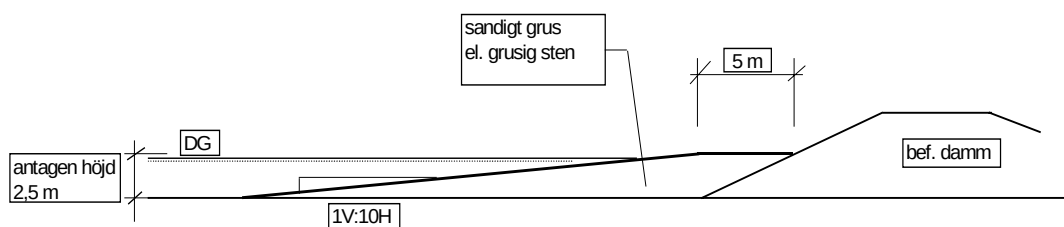
B.8 Bilaga 5.8 – Flack slänt (strand)

Beskrivning	Enhet	Mängd	A-pris	Fall A Kostnad
Fyllning av sandigt grus eller grusig sten	m3	11 300	187	2 113 100

Proj. kontroll, administration	-			100 000
-----------------------------------	---	--	--	---------

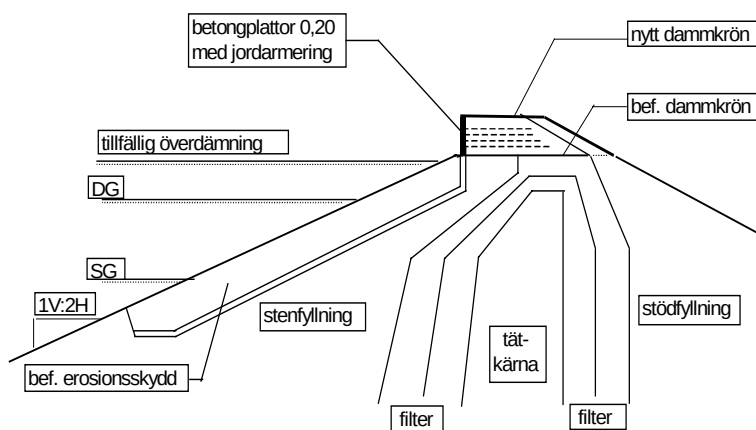
Summa, inv.kostnad, SEK				<u>2 213 100</u>
-------------------------	--	--	--	------------------

Reinvestering,%	75			
Intervall, år	20			
Disk.ränta %	5			
Nuvärde 1				625 571
Nuvärde 2				235 771
Total kostnad, SEK				<u>2 838 671</u>



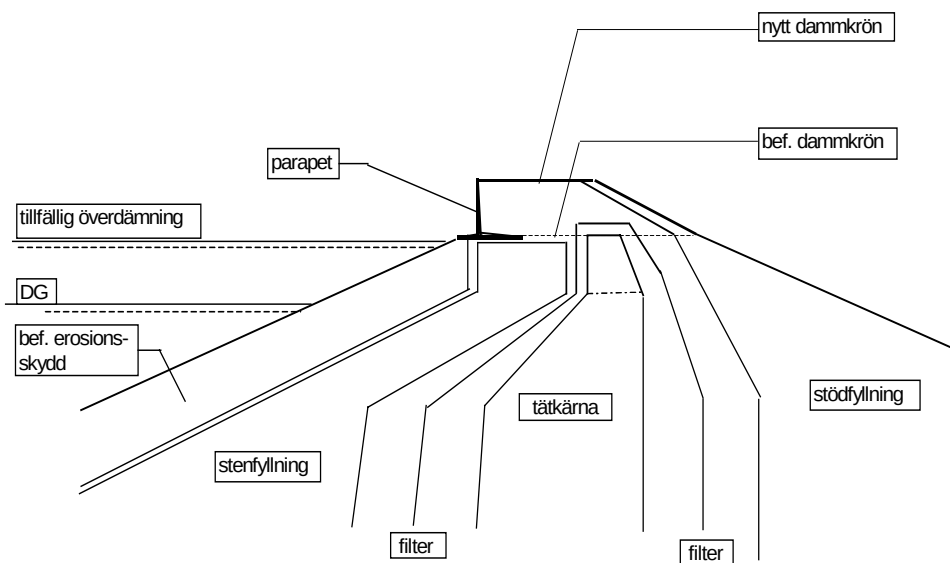
B.9 Bilaga 5.9 – Kopplade betongblock (2)

Beskrivning	Enhet	Mängd	Fall A, B C	
			A-pris	Kostnad
Schakt i damm	m3	300	30	9 000
Stödfyllning av sandigt grus	m3	3 900	200	780 000
Stödfyllning av sprängsten	m3	400	300	120 000
Betongplattor, 200 mm	m3	120	7 500	900 000
Jordarmering, rostskyddad	ton	3	15 000	45 000
Proj. kontroll, administration	-			250 000
Summa, inv.kostnad, SEK				2 104 000
Reinvestering,%	75			
Intervall, år	25			
Disk ränta %	5			
Nuvärde				465 988
Total kostnad, SEK				2 569 988



B.10 Bilaga 5.10 – Kopplade betongblock, parapet

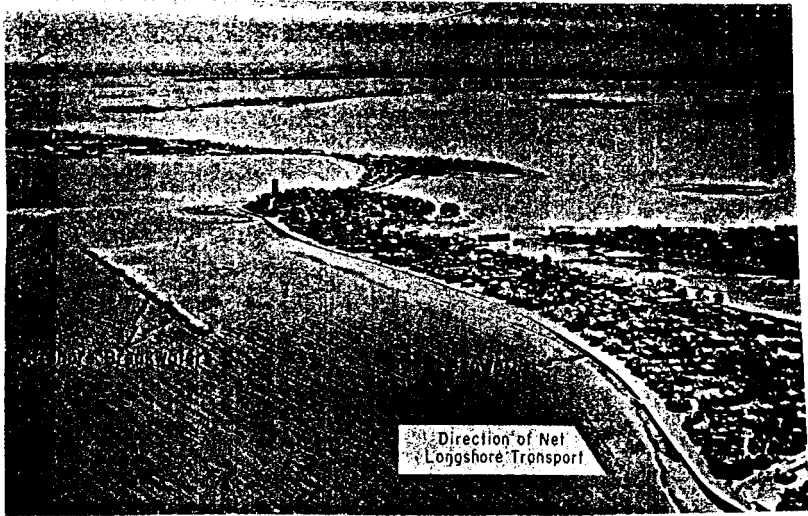
Beskrivning	Enhet	Mängd	Fall A, B, C	
			A-pris	Kostnad
Schakt i damm	m3	300	30	9 000
Stödfyllning av sandigt grus	m3	2 400	187	448 800
Stödfyllning av sprängsten	m3	400	300	120 000
Betongelement K35, vattentät	m3	380	7 500	2 850 000
Armering	ton	8	15 000	120 000
Proj. kontroll, administration	-			250 000
Summa, inv.kostnad, SEK				<u>3 797 800</u>
Reinvestering,%				
Intervall, år				
Disk.ränta %				
Nuvärde				-
Total kostnad, SEK				<u>3 797 800</u>

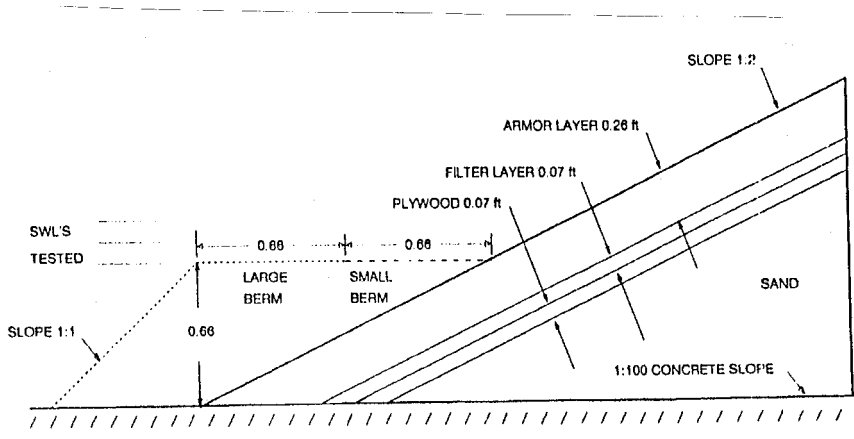


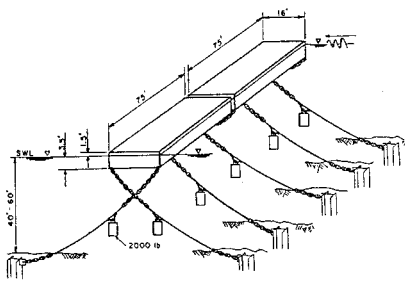
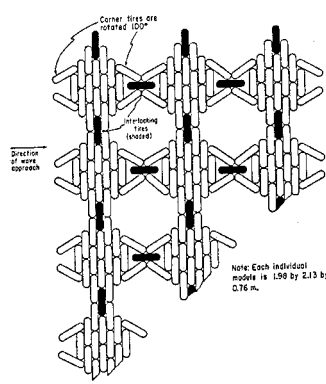
B.11 Bilaga 5.11 – Kostnader, underhåll av befintligt skydd

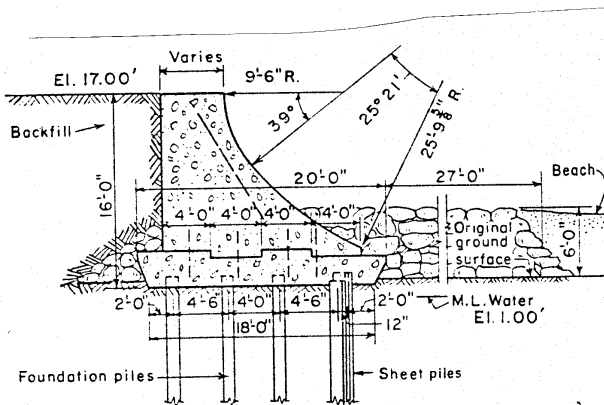
Beskrivning	Enhet	Mängd	A-pris	Fall A		Fall B		Fall C		
				Kostnad	Mängd	A-pris	Kostnad	Mängd	A-pris	Kostnad
Komplettering av sprängsten	m3	1 000	340	340 000	2 000	360	720 000	3 000	360	1 080 000
Proj. kontroll, administration	-			90 000			100 000			110 000
Summa, inv.kostnad, SEK				<u>430 000</u>			<u>820 000</u>			<u>1 190 000</u>
Reinvestering,%	100									
Intervall, år	10									
Disk.ränta %	5									
Nuvärde 1				263 983			503 409			730 557
Nuvärde 2				162 062			309 049			448 498
Nuvärde 3				99 492			189 730			275 339
Nuvärde 4				61 080			116 477			169 034
Total kostnad, SEK				<u>1 016 617</u>			<u>1 938 665</u>			<u>2 813 429</u>

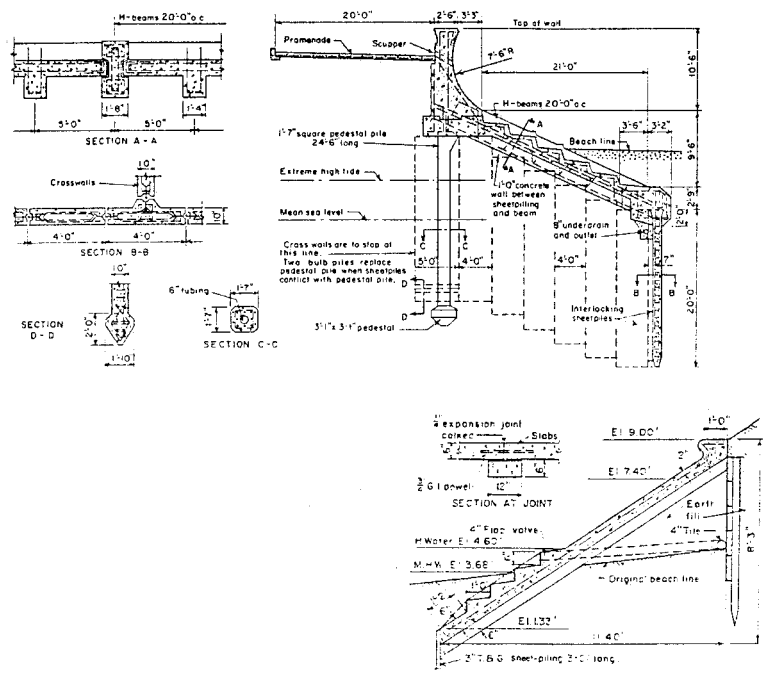
C Datablad

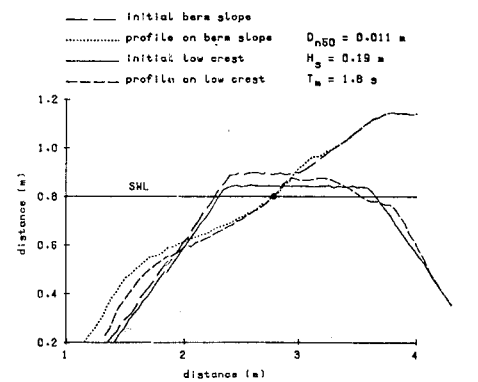
Erosionsskydd för svenska fyllningsdammar	Datablad A.1
21005017	
Beteckning: Vågbrytare	
Material: Sten, betong eller annat lämpligt material	
Användning: Vågerosionsskydd i kustområden	
Verifikation: Använt sedan länge i många länder	
Kommentarer: Bygger på idén att reducera angripande vågor så att befintliga erosionsskydd inte behöver förnyas och inga andra ingrepp göras på dammarna. Användbart för dammar endast vid största vattendjup upp till några meter, dvs liten eller ingen regleringshöjd.	
Referenser: Shore Protection Manual 1977, Sect. 5.9, Breakwaters - Offshore	
Kort beskrivning: Byggs parallellt med och på visst avstånd från dammslanten. Kan utföras helt under (högsta) vattenytan som tunga konstruktioner av sten, betong eller gabioner på filter. Eller som bottenförankrade lätta konstruktioner t ex av flytande bildäck eller träpålar med påträdde bildäck, alt. stålspont. Vågbrytarna behöver inte nödvändigtvis vara kontinuerliga.	
	

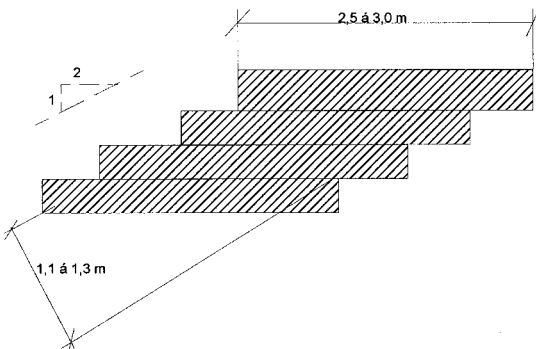
Erosionsskydd för svenska fyllningsdammar	Datablad A.2
21005017	
Beteckning: Banketter	
Material: Stenfyllning	
Användning: Fyllningsdammars uppströmsslänt	
Verifikation: Hydrauliska modellförsök	
Kommentarer: Bygger på idén att reducera angripande vågors energiinnehåll och uppspolning så att befintliga erosionsskydd inte behöver förnyas och inga andra ingrepp göras på dammarna. Användbart endast under speciella omständigheter.	
Referenser: Use of a rubble berm for reducing runup, overtopping and damage on a 1V to 2H riprap slope. Experimental model investigation, Coastal Engineering Research Center	
Kort beskrivning: Byggs parallellt med och på visst avstånd från dammslänten. Kan utföras helt under (högsta) vattenytan som tunga konstruktioner av sten, betong eller gabioner på filter. Eller som bottenförankrade lätta konstruktioner t ex av flytande bildäck eller träpålar med påträdade bildäck, alt. stålspons. Vågbrytarna behöver inte nödvändigtvis vara kontinuerliga.	
 NOTE: All measurements are in feet. Test structure cross section including both berms tested	

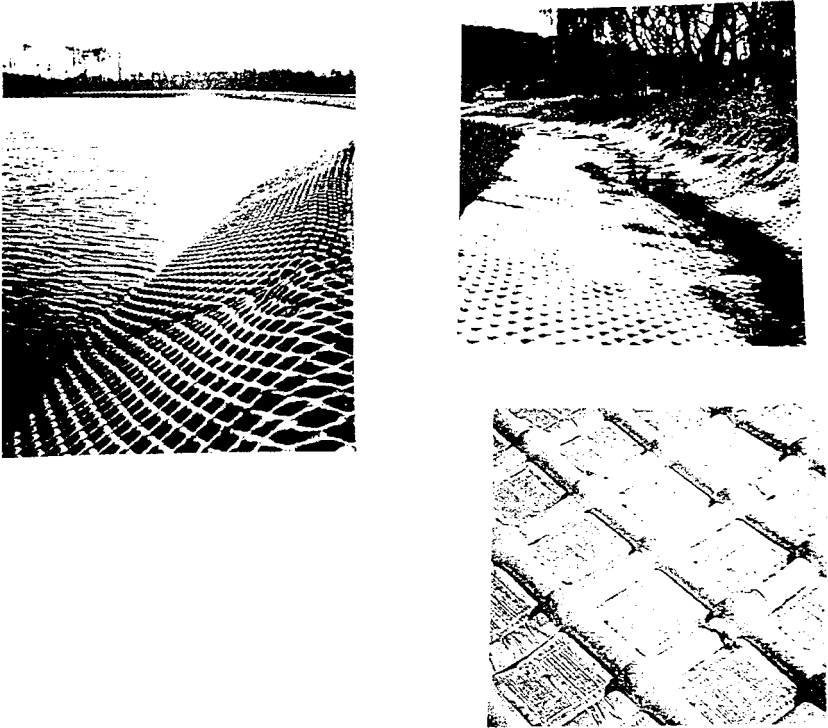
Erosionsskydd för svenska fyllningsdammar	Datablad A.3
21005017	
Beteckning: Vågbrytande pontoner	
Material: Betong, bildäck med flytkroppar mm	
Användning: Vågbrytare eller vågerosionsskydd	
Verifikation: Hydrauliska modellförsök	
Kommentarer: Bygger på idén att reducera angripande vågors energiinnehåll och uppspolning så att befintliga erosionsskydd inte behöver förnyas och inga andra ingrepp göras på dammarna. Användbart för dammar endast vid största vattendjup upp till några meter, d v s liten eller ingen regleringshöjd.	
Referenser: Werner, G., Experiences with Floating Breakwaters; A Literature Review, PIANC, Bulletin 1988, No. 63.	
Kort beskrivning: Förtöjs parallellt med och på visst avstånd från dammslanten. Kan även förläggas helt under (högsta) vattenytan som fastspända, stramförankrade konstruktioner. Vågbrytarna behöver inte nödvändigtvis vara kontinuerliga.	
	
	

Erosionsskydd för svenska fyllningsdammar	Datablad A.4
21005017	
Beteckning: Vågavvisare (parapeter)	
Material: Betong	
Användning: Vågerosionsskydd i kustområden och på dammar	
Verifikation: Spridd användning sedan lång tid över hela världen.	
Kommentarer: Lämpliga att förtillverkas. Standardstorlekar? Relativt dyrt, men kanske alternativ till dammhöjning.	
Referenser: Shore Protection Manual 1984, chapter 6	
Kort beskrivning: Kan göras i ett antal varianter med olika storlek och stabilitet, t ex mha stödplattor eller korta pålar (spont). Kan lätt kombineras med erosionsskydd av betong. 	

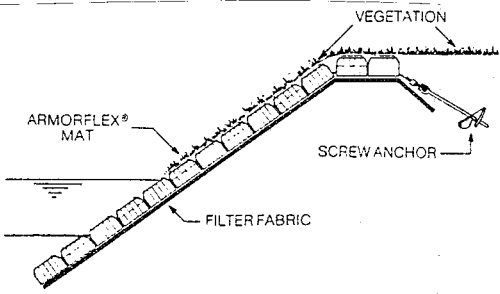
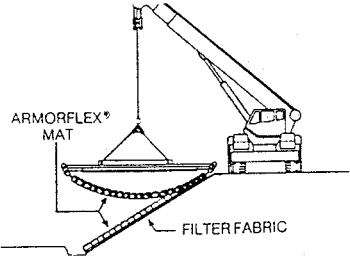
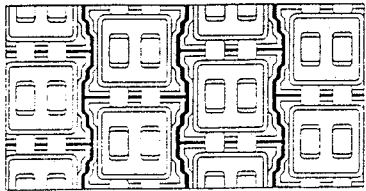
Erosionsskydd för svenska fyllningsdammar	Datablad A.5
21005017	
Beteckning: Trappstegsformade betongplattor, ev med parapet	
Material: Betong	
Användning: Vågerosionsskydd i kustområden	
Verifikation: Spridd användning sedan lång tid bl a i USA.	
Kommentarer: Lämpliga att förtillverkas. Standardstorlekar? Relativt dyrt? Borde kunna kombineras med vegetation ovan DG för att ge acceptabel eller t o m god landskapsbild.	
Referenser: Shore Protection Manual, 1984, chapter 6	
Kort beskrivning: Finns i ett antal varianter med olika stegform och mått. Kombinerar ofta med en kraftig avslutning upptill, t ex en vågavvisare (parapet) och förankring av korta pålar (spont). Placeras på filterduk och filterlager, undersidan dräneras, tillverkas i bredder om typiskt 2-3 m, som skarvas i sidled m h a balkelement, trapptjocklekar typiskt 0,3-0,6 m. 	

Erosionsskydd för svenska fyllningsdammar	Datablad B.1
21005017	
Beteckning: Utfyllnad med överskottsmaterial (offermaterial) eller till mindre släntlutning	
Material: Lokalt tillgängligt material (exempelvis morän eller fyllnadsmassor)	
Användning: Strandskydd	
Verifikation: Metoden med "beach nourishment" är allmänt använd internationellt för erosionskänsliga sandstränder. Offermaterial i strandskoningar och vågbrytare "reshaping breakwaters" har använts tidigare i viss utsträckning.	
Kommentarer: Grundläggande idé är att fylla på så mycket material att det med mycket god marginal klarar en dimensionerande storm. Efter-som denna storm sannolikt inte inträffar under en hundraårsperiod blir det genomsnittliga underhållet begränsat och intervallen långa. Endast användbart vid små vattendjup. Troligen dyrt om inte tippmassor kan användas eller annan nytta åstadkommas. Kan kombineras med vegetationstäckning.	
Referenser: Shore Protection Manual 1984, Chap. 6, Protective Beaches. Delft Hydraulics Publ. No. 470, Berm Breakwaters, 1992	
Kort beskrivning: Stenmaterial med otillräcklig storlek läggs ut i överskott i slänt i viss brant lutning. Genom vågverkan kommer stenmaterialet i området kring vattenytan att transporteras nedför slänten tills slänten intar ett jämviktsläge med flackare slänt.	
 — Initial berm slope profile on berm slope - - - Initial low crest - . - profile on low crest $D_{n50} = 0.011 \text{ m}$ $H_s = 0.19 \text{ m}$ $T_m = 1.8 \text{ s}$ SHL distance (m)	

Erosionsskydd för svenska fyllningsdammar	Datablad C.1
21005017	
Beteckning: Jord-cementblanding	
Material: Jord blandad med cement och vatten	
Användning: Erosionsskydd på små och relativt stora dammar	
Verifikation: Referens 3 nedan rapporterar om 20 års erfarenhet. I ref. 4 nedan anges att metoden använts på 24 dammar med gott resultat i USA.	
Referenser: 1. ICOLD Bulletin 91, 1993. 2. ICOLD Bulletin 54, 1986. 3. Bureau of Recl., Performance of Soil-Cement Dam Facings, REC-ERC-84-25, 1984. 4. Koller E.R., Nussbaum P.J., Developing Technology in Soil-Cement for Dams, Vol.5, Communi. 007, Montreal 10, 1970. 5. Davis F.J., Gray E.W., Jones C.W., Use of Soil-Cement for Slope Protection, Vol.3, Q. 42, R.014, Madrid 11, 1973. 6. Taylor K.V., Slope Protection on Earth and Rockfill Dams, Vol.3, Q.42, R.013, MADRID 11, 1973. 7. Design Standards No. 13, Embankment Dams, Chapter 17, Soil-Cement Slope Protection, Bureau of Recl., Denver, Oct. 1990.	
Kort beskrivning: Cementstabiliserad jord kan vara ett alternativ för erosionsskydd där lämpligt stenmaterial ej finns tillgängligt. Blandningen av jord, cement och vatten läggs ut i ca 0,15 m tjocka horisontala skikt trappstegsvis uppför slänten och packas med vibrationsvält. Bredden på skikten beror på lägningsutrustningen och är typiskt ca 2,5 m.	
	

Erosionsskydd för svenska fyllningsdammar	Datablad C.2
21005017	
Beteckning: Betongfyllda, dränerande mattor av syntetväv, fabrikt Foreshore Protection/Tecomatic	
Material: Betongfyllda mattor av polyesterväv	
Användning: Vågerosionsskydd i kustområden, vid broar, kanalslänter mm	
Verifikation: Använt under längre tid t ex i Australien och i Sverige sedan mer än tio år.	
Kommentarer: Kan placeras under vatten, fult, men kan enl uppgift kombineras med vegetation. Oklart beträffande vågerosionsmotstånd.	
Referenser: Tecomatic AB, produktbeskrivningar	
Kort beskrivning: Mattor läggs ut på lämpligt dränerande underlag och injekteras med betong K50. Dränerad med hjälp av genomgående filterpunkter. Kan göras med olika storlek, form och färg.	
	

Erosionsskydd för svenska fyllningsdammar	Datablad C.4
21005017	
Beteckning: Lösa betongelement	
Material: Betong, som regel oarmerad	
Användning: Vågbrytare för hamnar	
Verifikation: Använt sedan länge internationellt och i Sverige	
Kommentarer: Mer än 30 olika varianter finns, utvecklade i Norge, Holland, Sydafrika, USA, Japan, England m fl. Många, men inte alla skyddas av patent. Lång fälterfarenhet finns.	
Referenser: Shore Protection Manual 1984, Ch. 6	
Kort beskrivning: Förtillverkas. De flesta varianterna placeras oordnat i två lager på (dubbla) filterlager. Tål alla aktuella våghöjder och släntlutningar.	
The diagrams illustrate four types of concrete armor units: Dolos (DOLOSSE, plural): Shown in Plan, Bottom, and Elevation views. It has a cross-like shape with four arms. Tribar: Shown in Plan, Bottom, and Elevation views. It has a Y-shaped or three-lobed structure. Quadripod: Shown in Plan, Bottom, and Elevation views. It has a four-lobed, star-like shape. Tetrapod: Shown in Plan, Bottom, and Elevation views. It has a four-lobed shape with rounded ends.	

Erosionsskydd för svenska fyllningsdammar	Datablad C.5
21005017	
Beteckning: Flexibla betongblock sammanhållna med kablar, t ex fabrikat Armorflex	
Material: Betongelement sammankopplade med stålkablar till madrasser	
Användning: Vågerosionsskydd i kustområden och på dammar, kanalslänter mm	
Verifikation: Utvecklat i början av 1980-talet och använt i Alaska och Canada och sedemera även i Europa	
Kommentarer: Uppges klara vågor upp till $H_s = 1,5$ à 2 m. Kan kombineras med vegetation.	
Referenser: Armortec Inc: Technical Proposal for Man-made Gravel Islands in the Beaufort Sea. Armorflex produktkatalog.	
Kort beskrivning: Blocken förtillverkas och kopplas med genomgående stållinor till mattor. Mattorna läggs med kran på förberett underlag av filter och filterduk. Tjocklek upp till ca 0,2 m. Kan förankras i överändan och säkras nedtill. Blocken är dränerande.	
  	

Erosionsskydd för svenska fyllningsdammar

Datablad C.6

21005017

Beteckning: Flexibla sammanlänkade betongplattor

Material: Betong

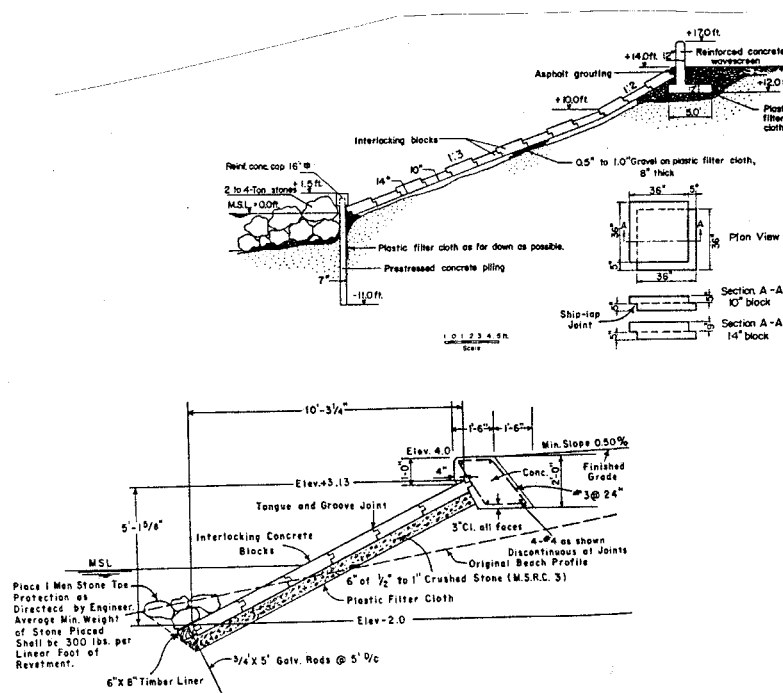
Användning: Vågerosionsskydd i kustområden

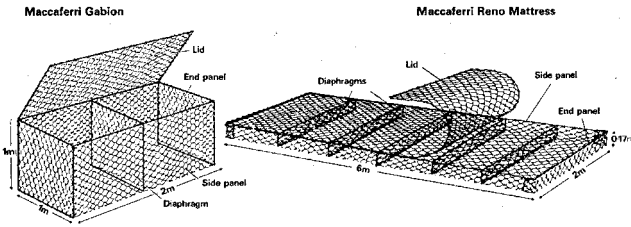
Verifikation: Spridd användning sedan lång tid i Holland, England och USA. Fullskaleförsök finns.

Kommentarer: Lokala skador av t ex frost eller vandalisering kan bli kritiska, eftersom systemet kräver heltäckande erosionsskydd. Fria kanter måste skyddas särskilt.

Referenser: Shore Protection Manual 1984, chapter 6

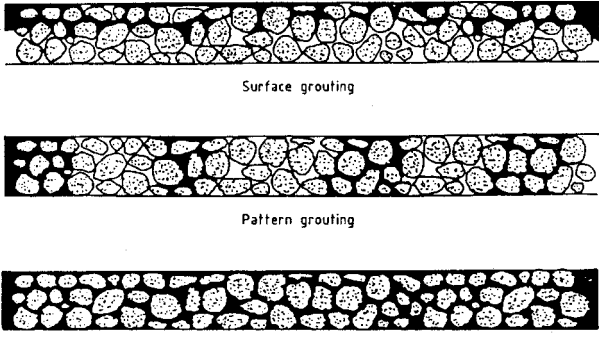
Kort beskrivning: Finns i en mängd varianter med olika plattform, olika låsgrepp och ytråhet. Kombinerar ofta med någon styvare avslutning upptill och förankring av korta pålar nedtill. Placeras på filterduk och filterlager, storlek typiskt 0,5-1,0 m, kvadratiska eller rektangulära, tjocklek typ. 0,1-0,3 m

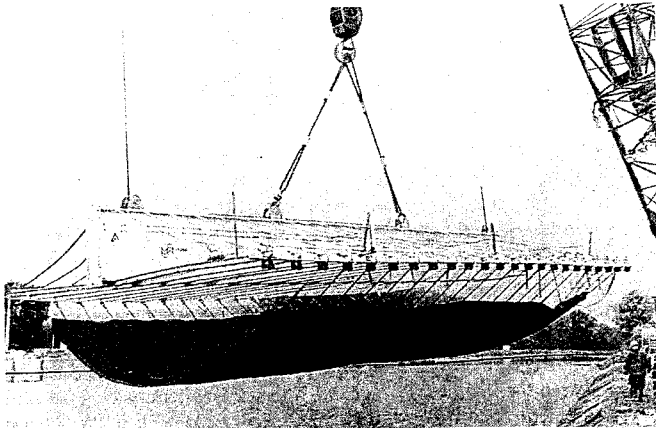


Erosionsskydd för svenska fyllningsdammar	Datablad C.7
210 05017	
Beteckning: Släntbeklädning av gabioner	
Material: Stålnät, sten	
Användning: Strandskoningar och mindre vågbrytare	
Verifikation: Använt sedan länge internationellt.	
Kommentarer: Stålnätets korrosionsskydd kan nötas av rörelser hos fyllningsmaterialet och utsättas för skadegörelse. Ihopsättningen av gabionerna är arbetsintensiv.	
Referenser: 1. PIANC, PTC2-WG21, 1991 2. PIANC, PTC1-WG4, 1986 3. CIRIA Special Publ 83/CUR Report 154, 1991 4. Stephenson, D., Rockfill in Hydraulic Engineering, Elsevier, 1979. 5. Agostino, R., and Ciarla, M., Flexible Reno Mattress and Gabion Structures in Coastal Protection Works, 5th Symposium on Coastal and Ocean Management, Seattle, Washington, 1987.	
Kort beskrivning: En gabion är en låd- eller madrassformad behållare gjord av stålnät. Vanligen finns mellanväggar. Gabionerna fylls med sten. Lådformade behållare används för att bygga upp stödmurar medan madrasser används som beklädnad på slänter. Dimensionerna är typiskt ca: • Lådor: längd 2 - 4 m, bredd 1 m, höjd 0,5 - 1 m • Madrasser: längd 6 m, bredd 2 m, höjd 0,2 - 0,3 m	
	

Erosionsskydd för svenska fyllningsdammar	Datablad C.8
21005017	
Beteckning: Betongfyllda, flexibla, dränerande mattor av syntetväv, fabrikt Foreshore Protection/Tecomatic	
Material: Betongfyllda mattor av polyesterväv	
Användning: Vågerosionsskydd i kustområden, vid broar, kanalslänker mm	
Verifikation: Använt under längre tid t ex i Australien och i Sverige sedan mer än tio år.	
Kommentarer: Kan placeras under vatten, fult, men kan enl uppgift kombineras med vegetation. Oklart beträffande vågerosionsmotstånd.	
Referenser: Tecomatic AB, produktbeskrivningar	
Kort beskrivning: Mattor läggs ut på lämpligt dränerande underlag och injekteras med betong K50. Dränerad med hjälp av genomgående filterpunkter. Kan göras med olika storlek, form och färg. Genom blockstruktur blir madrassen flexibel.	
	

Erosionsskydd för svenska fyllningsdammar	Datablad C.9
21005017	
Beteckning: Släntbeklädnad av öppen stenasfalt	
Material: Sten, asfalt	
Användning: Vågbrytare, strandskoningar	
Verifikation: Används som skydd på kanalslänter i Nederländerna	
Kommentarer: Läggning är inte möjlig under vatten.	
Referenser: PIANC, PTC2-WG21, 1991 PIANC, PTC1-WG4, 1986 CIRIA Special Publ 83/CUR Report 154, 1991 SPM 1977 SPM 1984	
Kort beskrivning: Skyddslagret på en slänt kan utföras med öppen stenasfalt. Vanliga tjocklekar av ca 0,10 m och 0,15 m. Ett ca 0,4 m tjockt lager stenasfalt kan motstå våghöjder ca $H_s = 3$ m.	
	
Open stone asphalt revetment under construction in 'dry' conditions	

Erosionsskydd för svenska fyllningsdammar	Datablad C.10
21005017	
Beteckning: Stenslänt med asfaltförstärkning	
Material: Sten, asfalt	
Användning: Vågbrytare, strandskoningar	
Verifikation: Används på vågbrytare och som skydd på kanalslänter i Nederländerna.	
Kommentarer: Kan utföras under vatten	
Referenser: PIANC, PTC2-WG21, 1991 PIANC, PTC1-WG4, 1986 CIRIA Special Publ 83/CUR Report 154, 1991 SPM 1977 SPM 1984	
Kort beskrivning: Stabiliteten hos en stenslänt kan förbättras genom förstärkning med asfalt. Asfalten hälls eller sprids ut över, och tränger ned i stenbeklädningen på slänten. Denna injektering kan utföras enligt tre principer: • Ytlig injektering: Asfalten sprids jämnt över stenslänten. Ger viss permeabilitet. • Partiell injektering: 50-80 % av hålrummen fylls. • Fullständig injektering: Stenslänten injekteras fullständigt. Ger helt tät yta. Med tät slänt fås ökade lyftkrafter. Asfaltförstärkning kan göras om våghöjden $H_s < 3$ à 4 m.	
 Surface grouting Pattern grouting Full grouting	

Erosionsskydd för svenska fyllningsdammar	Datablad C.11
21005017	
Beteckning: Släntbeklädning av förtillverkade asfaltmadrasser	
Material: Sten, asfalt	
Användning: Strandskoningar	
Verifikation: Används som skydd på kanalslänter i Nederländerna.	
Kommentarer: Kan installeras under vatten	
Referenser: PIANC, PTC2-WG21, 1991 PIANC, PTC1-WG4, 1986 CIRIA Special Publ 83/CUR Report 154, 1991 Dredging and Port Construction, Nov. 1996, pp 14	
Kort- beskrivning: Skyddslagret på en slänt kan utföras med förtillverkade asfaltmadrasser. Madrasser tillverkade av Bitumar för utläggning i en kanal i Nederländerna år 1996/97 hade planmått 10 m ggr 6,8 m och vikten 200 kN. Madrasserna gjordes av en öppen stenasfalt med fibertillsats.	
 INSTALLATION OF PREFABRICATED FIBROUS OPEN STONE ASPHALT MATTRESSES	



ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS – ELFORSK – AB
Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 2530. Telefax 08-677 2535
www.elforsk.se