

Dimensionering och modellering av erosionsskydd

Karin Odén
Lars Johansson

Varia	Statens geotekniska institut (SGI) 581 93 Linköping
Beställning	SGI Informationstjänsten Tel: 013-20 18 04 Fax: 013-20 19 09 E-post: info@swedgeo.se Internet: www.swedgeo.se
ISSN	1100-6692
ISRN	SGI-VARIA--05/558--SE
Projektnummer SGI	12054
Dnr SGI	1-0404-0309

Foto omslag: Ystad kommun.

FÖRORD

Statens geotekniska institut (SGI) har på regeringens uppdrag ett samordningsansvar för stranderosion i Sverige. I detta arbete ingår att göra sammanställning av kunskap som finns i samhället inom olika delområden avseende stranderosion. Resultaten från dessa kunskapssammanställningar görs allmänt tillgängliga för myndigheter, kommuner, konsulter, entreprenörer och allmänheten.

SGI genomför dessa kunskapssammanställningar i samverkan med övriga aktörer inom området som myndigheter, länsstyrelser, kommuner, konsulter och forskare.

Denna kunskapssammanställning om ”Dimensionering och modellering av erosionsskydd” har sammanställts av Karin Odén och Lars Johansson, SGI. Rapporten har granskats av professor Hans Hanson, Lunds Tekniska Högskola och Bengt Rydell, SGI.

Linköping i mars 2005

Författarna

INNEHÅLL

Förord	3
Summary	6
Sammanfattning	8
1 Syfte	10
2 Dimensionering av erosionsskydd	11
2.1 Dimensioneringsanvisningar	11
3 Principer för dimensionering av erosionsskydd	13
3.1 CEM – Coastal Engineering Manual	13
3.2 Grundläggningsförutsättningar	13
3.2.1 Laster	13
3.2.2 Undergrundens respons	14
3.2.3 Geotekniska undersökningar	14
3.3 Material och produktionsförutsättningar	15
3.4 Dimensioneringsförutsättningar/principer	15
3.4.1 Generell dimensioneringsgång	15
3.4.2 Hydraulisk respons	17
3.4.3 Vågbelastning och motsvarande respons hos konstruktionsdelarna	18
4 Modellering	19
4.1 Inledning	19
4.2 Olika typer av modelleringsverktyg	19
4.3 Metodik vid numerisk simulering	20
4.4 Ingångsdata	21
5 Exempel på numeriska modelleringsprogram	22
5.1 Program från Lunds tekniska högskola (LTH)	22
5.1.1 GENESIS – modellering av kustparallell sedimenttransport och förändring av kustlinjen.	22
5.1.2 SBEACH – verktyg för modellering av sedimenttransport vinkelrätt mot kusten och förändring av bottenprofiler	24
5.2 Program från DHI, Danmark	24
5.2.1 MIKE21 – tvådimensionell modellering av kustnära vatten och hav	24
5.2.2 LITPACK – modellering av kustparallell sedimenttransport av friktionsjord och kustlinjeförändringar	25
5.3 Program från Delft Hydraulics, Nederländerna	25
5.3.1 DELFT3D – generellt verktyg för modellering i tre dimensioner	25
5.3.2 UNIBEST – modellering av sedimenttransport och kustlinjeförändringar	25
5.4 UCIT	27
6 Diskussion och förslag till fortsatt arbete	28
Referenser	30

SUMMARY

This report is intended to contribute to the expansion of knowledge within Swedish society concerning coastal erosion. It is a continuation of an earlier report concerning the same area of knowledge, 'Coastal protection systems' (SGI Varia 532), and presents the principles of available design tools within the area. The report is aimed at persons working in the field of designing coastal protection systems, either as authorities, clients, consulting engineers or contractors, and at others interested in the field. The content is intended to be an easily accessible briefing of the present situation, a form of state-of-the-art in this field.

Few Swedish design rules and design instructions concerning erosion protection systems have been published. Erosion processes and associated problems are described in general terms in various geotechnical handbooks, such as 'Handboken Bygg, Band Geoteknik' (1984), and in textbooks in the field of hydraulics. In cases where this literature, together with the knowledge of the coastal engineer, is insufficient in solving a coastal problem, most designers use the handbooks in coastal engineering published by the U.S. Army Corps of Engineering (USACE). The American handbooks are well known and are used worldwide. As part of the work on this report, an inventory of relevant institutions in the Netherlands and Denmark was carried out. The institutions provided a description of the handbooks and design instructions in use. In every case, the American handbooks were named as the first choice, together with local experience and practise. As in the case of Sweden, no national rules or design instructions have been published.

In **Chapter 3** of this report, the principles of design are described according to one of the handbooks, the 'Coastal Engineering Manual' (CEM), from USACE (in preparation). A draft of the manual is available for downloading from the homepage of USACE, www.erd.usace.army.mil. This manual replaces an earlier manual, the 'Shore Protection Manual', published at the beginning of the 1980s. When designing an erosion

protection system, three aspects are taken into account: (1) foundation/geotechnical requirements (loads, foundation soil responses, geotechnical investigations); (2) material and construction considerations, and (3) principles of design (general procedure, hydraulic response, wave loading). These aspects are further described in Chapters 3.2, 3.3 and 3.4 respectively.

To choose a suitable erosion protection system and to determine the appropriate extent, the magnitude of erosion and accumulation of material before and after an established protection system must be estimated, i.e. the effects/consequences of different possible erosion protection systems. One way of estimating the magnitude of erosion and accumulation is to create numerical models of the sediment transport along the shoreline in question. In **Chapter 4**, different modelling tools are described, together with the procedure for numerical simulations. In principle, there are three groups of modelling tools; group 1 are large, complex systems that are somewhat abstract and not really practical; group 2 are large systems that are practical but require a large amount of work, and group 3 are relatively small, simple systems that are practical from an engineer's point of view.

All types of modelling require a large amount of input data, such as loads (waves, water level, wind force), geotechnical conditions (soil strata and mechanical/physical properties of the soil), and geometric conditions (shoreline and bathymetry), as well as structures that influence the currents and sedimentation processes (harbours, jetties and groins). A common methodology for numerical modelling of shore erosion problems is to gather field observations of the shoreline position over several years in such a quantity that the data can be used both for calibration and for verifying the model. It is of great importance that both the persons performing the modelling work and the persons using the results are aware of the possibilities and limitations of the model. The quality of the calibrations and the verifications is often dependent on the number of simulations allowed (a

question of time and money). The more advanced models (a larger quantity of input data with variation in time and space) have the disadvantage in comparison to small, simple models that it is too costly to perform the same number of simulations and they are therefore not verified to the same extent. Numerical modelling is mostly performed with the 'small simple modelling tools' and often simulations are carried out with a combination of different modelling tools in order to obtain the best possible result.

Chapter 5 describes some of the modelling tools available, including their usefulness. The modelling tools described in this report, which are used internationally, have mainly been developed in co-operation between different institutions and organisations, such as Lund Technical University in co-operation with the US Army Corps of Engineers in the USA, DHI Water & Environment in Denmark in cooperation with Lyngby Technical University, as well as Delft Hydraulics in co-operation with Delft Technical University in the Netherlands. These modelling tools mainly belong to Groups 2 and 3 mentioned above.

In the **final chapter**, it is emphasised that no satisfactory design instructions for Swedish conditions are available. Field measurements of wave, wind and water levels around the Swedish coastline should be systematised and complemented in order to correspond to other countries' field measurement programs, and to adapt international instructions to Swedish conditions.

SAMMANFATTNING

Denna rapport syftar till att vara ett led i sammanställningen av kunskap som finns i samhället inom olika delområden avseende stranderosion. Rapporten är en fortsättning på en tidigare rapport inom delområdet erosionskydd (SGI Varia 532) och beskriver principer för tillgängliga dimensioneringsverktyg inom området. Den vänder sig till dem som kommer i kontakt med dimensionering och utformning av kustskydd, antingen som granskande myndighet, beställare, konsult/entreprenör eller till den som har ett intresse för dessa frågor i största allmänhet. Framställningen gör inte anspråk på att vara komplett, utan ska ses som en lättillgänglig sammanfattning av nuvarande situation, en sorts state-of-the-art inom området.

Det finns få svenska regler och dimensioneringsanvisningar för erosionskydd publicerade. Erosionsproblematiken finns i generella ordalag beskriven i olika geotekniska handböcker, t.ex. Handboken Bygg, Band Geoteknik (1984) och i läroböcker i vattenbyggnadsteknik. I den mån dessa handböcker tillsammans med kustingenjörens samlade erfarenhet inte är tillräcklig, är det brukligt att någon av de handböcker som U.S. Army Corps of Engineers (USACE) har gett ut används som underlag för dimensionering och utformning. De amerikanska handböckerna har naturligt fått stor genomslagskraft runtom i världen, och används rutinemässigt i många länder. Inom föreliggande projekt har även en inventering gjorts hos relevanta institutioner i våra närliggande grannländer, där dessa har ombetts beskriva vilka dimensioneringsanvisningar som används inom respektive institution. Inventeringen har omfattat Danmark och Holland. I samtliga fall har de amerikanska handböckerna nämnts som ett huvudalternativ tillsammans med samlad lokal, praktisk erfarenhet. Precis som Sverige finns få, eller inga, nationella regelverk och dimensioneringsanvisningar utarbetade.

I **kapitel 3** i denna rapport, Principer för dimensionering av erosionskydd, beskrivs principerna för hur dimensionering görs enligt en av de handböcker som USA-

CE håller på att ta fram, Coastal Engineering Manual (CEM). Det finns en vad som skulle kunna kallas förhandsversion av manualen tillgänglig, som kan hämtas från U.S. Army Corps of Engineer's hemsida; www.erdc.usace.army.mil. Denna handbok ersätter en tidigare utgiven handbok, Shore Protection Manual, som togs fram av USACE under början av 1980-talet. Vid dimensionering av erosionskydd beaktas tre olika aspekter: grundläggningsförutsättningar (laster, undergrundens respons och geotekniska förhållanden), material och produktionsförutsättningar samt dimensioneringsprincip (generell dimensioneringsgång, hydraulisk respons, vågbelastning), vilka alla beskrivs närmare under respektive kapitel.

För att kunna välja lämplig typ av erosionskydd och omfattningen av skyddet måste man kunna uppskatta erosion respektive ackumulation av material före och efter anlagt erosionskydd, dvs. uppskatta konsekvenserna av olika typer av skydd. Ett sätt att göra detta är att utföra numeriska modelleringar av sedimenttransporten utmed aktuella kuststräckor. I **kapitel 4**, Modellering, beskrivs olika typer av modelleringsverktyg samt metodiken vid numerisk simulering. Det finns i princip tre grupper av modelleringsverktyg; Grupp 1 är stora sofistikerade, komplicerade system som många gånger är abstrakta och inte direkt praktiskt tillämpbara; Grupp 2 är stora system som är praktiskt tillämpbara, men kräver omfattande arbetsinsatser; Grupp 3 är förhållandevis små, enkla och för enkla system som är ingenjörsmässiga och praktiskt användbara. All typ av modellering kräver en stor mängd ingångsdata, såsom i detta fall, laster (vågor, vattenstånd och vindstyrkor), geotekniska förhållanden (jordlagerföljd och jordlagrens fysikaliska/mekaniska egenskaper), geometriska förhållanden (kustlinjer och bottenprofiler) samt konstruktioner som påverkar strömnings- och sedimentationsförhållandena (t.ex. hamnar, kajer och hövder). En vanlig metodik vid numerisk modellering av stranderosionsproblem är, att samla in mätningar från fält, t.ex. av strandlinjens läge, i så stor omfattning att dessa kan

användas både för kalibrering och verifiering av de verktyg som valts för analysen. Det är viktigt att såväl den som utför analysen som den som skall nyttja resultaten är medveten om och känner till varje verktygs möjligheter och begränsningar, allt i syfte att tolka resultaten på ett så korrekt sätt som möjligt. Kvalitén på kalibrering och verifiering är ofta beroende på hur många modellkörningar man har råd och tid att göra. Mer omfattande modeller (fler ingångsparametrar som varierar i tid och rum) kan således inte köras i samma omfattning som enklare modeller, och blir följaktligen ofta sämre verifierade. Eftersom modellering i huvudsak genomförs med enklare verktyg, är det inte ovanligt att analyser med flera olika beräkningsverktyg kombineras för att ge ett så bra resultat som möjligt.

I **kapitel 5** beskrivs ett antal tillgängliga modelleringsverktyg inklusive deras användningsområde. Modelleringsverktygen som beskrivs här och som används internationellt sett är framförallt utvecklade i samarbete mellan olika institutioner och organisationer. De som beskrivs har utvecklats av bland annat Lunds tekniska högskola i samarbete med US Army Corps of Engineers i USA, DHI Water & Environment i Danmark i samarbete med Lyngby tekniska universitet respektive av Delft Hydraulics i samarbete med Delft tekniska universitet i Nederländerna. Dessa modelleringsverktyg tillhör framförallt Grupperna 2 och 3 ovan.

I det avslutande kapitlet, Diskussion och förslag till fortsatt arbete, poängteras att inga fullgoda dimensioneringsanvisningar för svenska förhållanden finns att tillgå samt att mätningar av vågor, vindar och vattenstånd borde systematiseras och kompletteras efter jämförelser med mätprogram som andra länder har och rutinmässigt tillämpar, i syftet att anpassa och förbättra internationella anvisningar för svenska förhållanden.

1 SYFTE

Syftet med kunskapssammanställningen som redovisas i denna rapport är att sammanfatta och beskriva metoder och metodik för dimensionering och modellering av erosionsskydd. I begreppet erosionsskydd inryms skydd mot erosion från främst vågor längs stränder vid kuster och sjöar. En tidigare utgiven rapport (SGI Varia 532) innehåller en beskrivning av vanligt förekommande typer av erosionsskydd i Sverige, varför denna rapport koncentreras kring dimensionering, modellering och utformning av erosionsskydd.

Denna rapport vänder sig till dem som kommer i kontakt med dimensionering och utformning av kustskydd, antingen som granskande myndighet, beställare, konsult/entreprenör eller till den som har ett intresse för dessa frågor i största allmänhet. Framställningen gör inte anspråk på att vara komplett, utan ska ses som en lättillgänglig sammanfattning av nuvarande situation, en sorts state-of-the-art inom området.

2 DIMENSIONERING AV EROSIONSSKYDD

Det kan ofta vara svårt att hitta regler och dimensioneringsanvisningar för erosionsskydd. Skredkommissionen har utarbetat en rapport avseende erosionsskydd längs vattendrag (Skredkommissionen Rapport 1:94), men denna behandlade främst erosion av strömmande vatten i vattendrag. U.S. Army Corps of Engineers har utarbetat olika handböcker, t.ex. Shore Protection Manual och Coastal Engineering Manual, och dessa används i flera länder.

I SGI Varia 532 konstaterades att utformning och dimensionering av erosionsskydd ofta baseras på den enskilde kustingenjörens personliga erfarenheter. Även om detta kan ge en konstruktion som med tillfredsställande säkerhetsnivå uppfyller de krav som ställs, är det svårt för t ex granskande myndigheter och andra att följa och förstå de antaganden som gjorts under dimensioneringsarbetet. Ytterligare en viktig aspekt i sammanhanget är vilka laster som konstruktionen antas utsättas för under sin livstid, d.v.s. huvudsakligen vatten-, vind- och våglaster. Hur dessa bestäms, påverkar självfallet i stor utsträckning hur erosionsskyddet i slutändan kommer att utformas. En likartad metodik att ansätta laster, t ex som vid beaktande av vindlaster på byggnader, skulle således vara ett stort steg framåt för att ”harmonisera” utformning och dimensionering av erosionsskydd

2.1 DIMENSIONERINGSANVISNINGAR

Det saknas, som tidigare nämnts, lämpliga svenska dimensioneringsanvisningar för erosionsskydd. Erosionsproblematiken finns beskriven, i generella ordalag, i geotekniska handböcker, t.ex. Handboken Bygg, Band Geoteknik (1984) och i läroböcker i vattenbyggnadsteknik. Vägverket har gett ut en informationsskrift, ”Erosionsskydd i vatten vid väg- och brobyggnad” (Olofsson, 1987). Den samlade kunskapen i början av nittio-talet vad gäller erosion längs vattendrag redovisades av Skredkommissionen i rapporten ”Erosionsskydd i samband med förstärkningsåtgärder för slänter” (Johansson, 1994).

I den mån dessa handböcker tillsammans med kust-

ingenjörens samlade erfarenhet inte är tillräcklig, är det brukligt att någon av de handböcker som U.S. Army Corps of Engineers (USACE) har gett ut, används som underlag för dimensionering och utformning. Handboksserien börjar med *Shore Protection Manual* (SPM) som i sin senaste version gavs ut 1984. Den var då en relativt komplett framställning, för åtminstone nordamerikanska förhållanden. Många av de modelleringsverktyg som har utvecklats sedan dess bygger därför på angreppssätt och metodik som beskrivs i SPM. Utvecklingen har dock gått framåt, och i slutet av 1990-talet fanns ett behov av att uppdatera manualen. Samtidigt poängterades i större utsträckning ett helhetstänkande vid bedömning av erosionsproblematiken längs kuststräckor och inte bara en identifiering och åtgärd av det lokala problemet. Begrepp som ”Coastal management” (planering och underhåll av kuststräckor) introducerades, som senare övergick i begrepp som ”Integrated Coastal Management”, kanske för att ytterligare betona vikten av att samordna och ta i beaktande många olika faktorer och aspekter vid utformning och dimensionering av erosionsskydd. Vid uppdateringen av Shore Protection Manual föll valet på att samla information från flera olika, vid den tidpunkten, existerande källor och sammanföra till en volym. I slutet av 1990-talet inleddes därför arbetet med att sammanställa *Coastal Engineering Manual* (CEM). Detta har dock visat sig vara en tidsödande insats och arbetet med att slutföra manualen fortgår alltjämt (2004). Det finns dock en vad som kan kallas förhandsversion tillgänglig, som kan hämtas från U.S. Army Corps of Engineer’s hemsida; www.erdc.usace.army.mil. Vissa kapitel har där markerats som ”ej färdigställda”, medan andra kapitel kan anses vara färdiga, och saknar således ”Draft”-markering. Samtidigt som arbetet med CEM har bedrivits har inga uppdateringar av SPM gjorts, utan denna skulle kunna sägas ha inarbetats i CEM.

De amerikanska handböckerna har naturligt fått stor genomslagskraft runtom i världen, och används rutinmässigt i många länder. I den mån annan erfarenhet och kun-

skap inte finns tillgänglig används de även i Sverige.

Utöver de amerikanska handböckerna kan sannolikt även andra nationella anvisningar finnas utarbetade, möjligtvis inga generella såsom CEM, utan snarare mer orienterade för att ge vägledning för specifika problemställningar. Inom föreliggande projekt har en inventering gjorts hos relevanta institutioner i våra närliggande grannländer vilka dimensioneringsanvisningar som används där. Inventeringen har omfattat Danmark och Holland. I samtliga fall har de amerikanska handböckerna nämnts som ett huvudalternativ tillsammans med samlad lokal, praktisk erfarenhet. Någon ytterligare nationell handbok eller standard har inte omnämnts. Det har därför ansetts ligga utanför innevarande projekts ramar att ytterligare inventera dimensioneringsanvisningar som tillämpas i andra länder.

3 PRINCIPER FÖR DIMENSIONERING AV EROSIONSSKYDD

Eftersom den allmänna bilden är att CEM används av kustingenjörer i de nordiska länderna, har vi valt att i detta kapitel beskriva vilka aspekter som beaktas vid dimensionering av erosionsskydd enligt CEM. Beskrivningen ska betraktas som en allmän beskrivning av översiktlig karaktär. Vi har därför valt att inte redovisa ekvationer och andra samband som används vid dimensionering och utformning, utan hänvisar läsaren i detta fall till originalverket. I denna rapport beskrivs de allmänna anvisningarna och råden som ges, oberoende av vilken typ av erosionsskydd som är aktuellt att uppföra. För exempel på typiska erosionsskydd hänvisas bland annat till SGI Varia 532.

3.1 CEM – COASTAL ENGINEERING MANUAL

Coastal Engineering Manual (CEM) är en mycket omfattande handbok, som behandlar råd och anvisningar för många konstruktioner i vatten. I första hand är handboken skapad för att förbättra navigeringsförutsättningarna i kommersiella hamnar, för fiskeindustrin samt för rekreationssjöfarten. För att möjliggöra en förbättring av navigeringsförutsättningarna behövs ofta kustskyddsåtgärder för att i möjligaste mån eliminera, eller i vart fall minimera, icke önskvärda konsekvenser av dessa ”förbättringar”. Åtgärder för att begränsa erosionsangrepp längs kusten, liksom skyddsåtgärder mot orkan och stormpåverkan, ger en minskning av vågskadeverkan samt översvämningsskydd för kustområden med kommersiella, urbana och turistmässiga intressen.

Vid dimensionering av erosionsskydd beaktas tre olika aspekter:

- grundläggningsförutsättningar,
- material och produktionsförutsättningar samt
- dimensioneringsförutsättningar

Dessa aspekter beskrivs närmare i följande avsnitt.

3.2 GRUNDLÄGGNINGSFÖRUTSÄTTNINGAR

Konstruktioner som exponeras för vågor och strömmar utsätts för olika typer av belastningar. För typiska kustskydds konstruktioner som exponeras för vågor och strömmar utsätts undergrunden för **statiska laster**, **dynamiska laster** samt **olyckslaster**. Undergrunden utgörs av det material som erosionsskyddet är grundlagt eller utlagt på. När undergrunden utsätts för belastning, ger den en respons, och den måste förmå bära den last som förs ner via konstruktionen, inklusive konstruktionens egentynngd. Interaktionen mellan konstruktion och undergrund är därför en mycket viktig parameter vid dimensioneringen. Som grund för bedömningar av undergrundens respons på de olika lasterna som verkar på den, utförs geotekniska undersökningar för att etablera grundläggande egenskaper hos jorden.

3.2.1 Laster

De laster som verkar på erosionsskydd kan delas in i **statiska laster**, **dynamiska laster** och **olyckslaster**. Beroende på typ av konstruktion, teknisk livslängd o.s.v. kan olika laster vara aktuella som dimensionerande laster, till exempel 50-årslaster, 100-årslaster. Oavsett vilken konstruktion som skall uppföras skall samtliga specifika laster som kan påverka undergrundens stabilitet identifieras under dimensioneringsarbetet.

De **statiska** lasterna består av *egentyngden* av konstruktionen och dess grundläggning, och är relativt konstanta under konstruktionens tekniska livslängd. Vattenståndets variation påverkar dock den belastning som undergrunden utsätts för. Den lastfördelning på undergrunden som konstruktionen ger upphov till samt eventuell ojämn belastning måste utvärderas och beaktas, särskilt för gravitationskonstruktioner på större vattendjup, alternativt grundlagda på inhomogena jordlager. Horisontallaster på grund av ojämnt vattentryck måste också beaktas.

De **dynamiska** lasterna uppstår på grund av normala vågor, strömmar, tidvatten, stormvågor samt vindar. I vissa områden tas även hänsyn till dynamiska laster på grund av jordbävningar och dylikt. De dynamiska lasterna varierar inom stora gränser, både vad gäller tidpunkt, varaktighet och intensitet. Det kan många gånger vara svårt att ansätta representativa dynamiska laster, just därför att variationen är så stor och kunskap baserad på mätningar under långa tidsperioder ofta saknas. Därför bör man vid dimensionering ansätta den mest ofördelaktiga, men fortfarande troliga, lastkombinationen.

Olyckslaster kan orsakas av t.ex. fartygskollisioner, kollisioner med isflak eller brott i en del av konstruktionen. Olyckslastens betydelse avgörs av typ av konstruktion och storleken på lasten. Exempelvis absorberar en vågbrytare uppbyggd av stenfyllning i ordnat mönster en del av olyckslasten, medan ett erosionsskydd uppbyggt i form av en betongmonolit överför större delen av lasten ned i undergrunden, antingen som skjuvkrafter eller som stjälpande (brottpådrivande) moment. Jämfört med de krafter som konstruktionen utsätts för är storleksordningen på de krafter som överförs till undergrunden mindre, tack vare betongkonstruktionens stora massa och gynnsamma egenfrekvens.

3.2.2 Undergrundens respons

De belastningar som påverkar konstruktionen förs ned till och ger upphov till en respons hos undergrunden som, beroende på jordart och tillstånd, kan ta sig olika uttryck.

Konsolidering av undergrunden sker under statisk belastning under lång tid, t.ex. på grund av konstruktionens egentyngd. Konsolideringen ger med tiden en ökning av hållfastheten i den underliggande jorden. Hur lång tid en sådan hållfasthetsökning kan ta och i vilken utsträckning hållfastheten ökar beror på jordart och vattengenomsläpplighet. För en vattengenomsläpplig friktionsjord sker konsolideringen i princip momentant vid uppförandet av erosionsskyddet. För en kohesionsjord kan konsolideringen ta många år. Konsolidering av undergrunden leder till sättningar, vilket kan påverka och till och med äventyra konstruktionens funktion. Sättningar kan också orsakas av utpressning/undanpressning av mycket lösa underliggande jordlager, eller genom kollaps av håligheter i undergrunden. Under dimensioneringsskedet är därför en bedömning av sättningarnas stor-

lek nödvändig, dels för att avpassa konstruktionens höjd (tyngd), dels för att kunna bedöma stabiliteten hos konstruktioner som är känsliga för till exempel differentialsättningar.

Skjuvspänningar alstras i jorden på grund av horisontalkrafter och stjälpande moment som förs ned i undergrunden via erosionsskyddet/kustskyddet. Om jordens skjuvhållfasthet överskrids, uppstår bärighetsbrott antingen lokalt eller inom ett större område. Snabba lastökningar kan ge upphov till en uppbyggnad av poröverttryck med en minskning av den dränerade skjuvhållfastheten till följd, vilket kan leda till att jorden börjar flyta (liquefaction). Cyklisk belastning kan också ge upphov till poröverttryck och kan, i kombination med stora accelerationer (vibrationer) från exempelvis jordbävningar, leda till liquefaction i sandjordar. Detta ger i sin tur upphov till bärighetsbrott i jorden med katastrofala följder. Återkommande cykliska belastningar kan leda till att bestående poröverttryck byggs upp i mindre vattengenomsläppliga jordar, t.ex. silt och siltiga jordar.

Erosion av material antingen under en konstruktion eller precis invid en konstruktion måste också beaktas vid dimensioneringen. Erosion kan orsakas av poröverttryck, portrycksgradienter, samt av strömmar och strömningsriktningar, vilka kan påverkas och/eller förändras vid uppförandet av ett kustskydd.

3.2.3 Geotekniska undersökningar

Geotekniska undersökningar kan delas in i tre nivåer med avseende på skedet i planerings- och byggprocessen:

- Nivå 1: områdesförutsättningar,
- Nivå 2: preliminär exploatering respektive
- Nivå 3: detaljerad utredning.

Nivå 1: Områdesförutsättningar

Denna undersökningsnivå utförs i syfte att karakterisera det aktuella området vad gäller jordlagerföljd, geologiska formationer/geologisk historia, grundvattenförhållanden och eventuell seismisk aktivitet. Undersökningarna bedrivs vanligtvis genom inventering av befintliga utredningar (arkivborning), analys av topografiska, hydrogeologiska och geologiska kartor, analys av flygbilder och flygbildstolkning. Efter genomförd utredning under nivå 1 skall behovet av eventuella kompletterande geotekniska undersökningar vara förtydligt.

Nivå 2: Preliminär exploatering

Under nivå 2 ska geotekniska problemställningar identifieras och underlag för bedömningar av lämplig typ och lokalisering av olika åtgärder arbetas fram. Undersökningarna ska som resultat ge jordlagerföljder, djup och mäktighet hos jordlager, djup till fast botten, variationer i grundvattennivån, uppskattning av kritiska jordparametrar, samt möjliga materialtäcker för konstruktionen, alternativt möjliga typer av prefabricerade konstruktioner.

Det finns en mängd olika geofysiska metoder som kan användas under nivå 2 för att erhålla relevant information för ett stort område till en rimlig kostnad. Det krävs emellertid en gedigen erfarenhet för att tolka resultatet från geofysiska metoder och som komplement måste därför provtagning i kritiska punkter utföras, bland annat i syfte att kalibrera resultatet från de geofysiska metoderna.

Nivå 3. Detaljerad utredning

Insatser på denna nivå skall ge specifika data för den slutliga designen. Det är nödvändigt att göra fältundersökningarna så att man får med alla problemområden. En välplanerad fältinsats kan spara mer än det kostar om man istället får göra ”överdimensionerade” konstruktioner.

3.3 MATERIAL OCH PRODUKTIONS-FÖRUTSÄTTNINGAR

Vid val av material för erosionskydd är det många olika faktorer som beaktas, exempelvis:

- laster som konstruktionen kommer att utsättas för
- krav på beständighet
- undergrundens beskaffenhet (till exempel risk för stora sättningar)
- estetiska krav
- krav på tillgänglighet till kustområdet efter slutförd åtgärd
- miljömässiga krav (till exempel flora, fauna)
- tillgänglighet av material (mängd och plats)

De miljömässiga krav som ställs på materialvalet omfattar även en strävan att minimera fordonstransporter och därmed minska den totala miljöbelastningen i samband med uppförandet av erosionskyddet. Även störningar i samband med anläggningsarbetet, t ex buller, grumling av vatten m.m., måste beaktas.

Produktionsförutsättningar, eller kanske rättare val av produktionsmetod, baseras på flera olika, ibland motstridiga, faktorer. I slutändan är det naturligtvis önskvärt att uppnå en så god ekonomi som möjligt i varje enskilt projekt. Dock kan krav som ställs på produktionsmetod, eller begränsningar med vissa produktionsmetoder, införa restriktioner. Val av produktionsmetod är ofta en, i varierande grad subjektiv, optimering mellan ett flertal aspekter.

3.4 DIMENSIONERINGSFÖRUTSÄTTNINGAR/PRINCIPER

3.4.1 Generell dimensioneringsgång

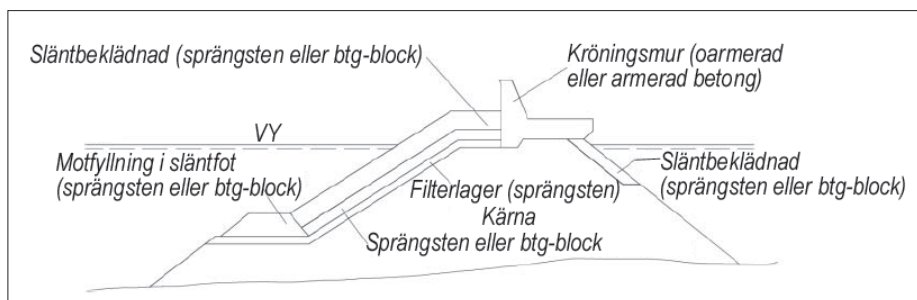
Schematiskt kan dimensioneringsgången beskrivas med nedanstående punkter:

- Specificering av funktionskrav och konstruktionens tekniska livslängd.
- Fastställande av havets lokala korttids- och långtidsförhållanden (vattenstånd, våghöjd m.m.), liksom uppskattning av möjliga geomorfologiska förändringar.
- Val av dimensioneringsnivåer för den hydrauliska responsen avseende vågors höjd, period, uppspolningsnivå, överspolningsmängd, vågtransmission och vågreflektion (t.ex. 20 procent sannolikhet att överspolningsmängden överskrider $10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ under 1 h under en 50-årsperiod).
- Bedömningar avseende produktionsutrustning, produktions sätt, se exempel i Figur 3.1, samt tillgång på och hållbarhet för byggmaterialet. Exempelvis är det tänkbart att endast landbaserad utrustning är tillgänglig till en rimlig kostnad samt att bergmaterial av tillräcklig storlek finns lättillgängligt.
- Alternativa konstruktionsgeometrier kan behöva utredas. Om någon form av gabioner ursprungligen valts kan till exempel betongkassuner respektive sprängstensfyllningar med eller utan kröningsmurar utredas, se exempel på stenfyllning med kröningsmur i Figur 3.2.
- Identifiering av möjliga brottmekanismer för de valda konstruktionerna (till exempel förskjutning av släntbeklädningen), se exempel i Figur 3.3
- Val av konsekvensnivåer för de identifierade brottmekanismerna (t.ex. 50 procents sannolikhet att 5 procent av släntbeklädningen förskjutits inom 50 år).

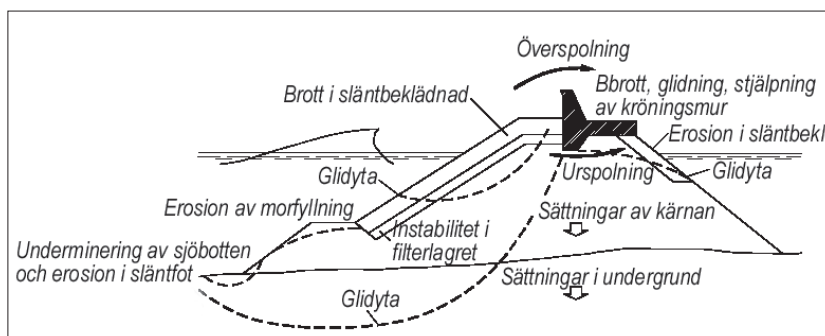


Figur 3.1 Exempel på produktionssätt för vågbrytare med sprängstensbeklädad.

www.nab.usace.army.mil/projects/Maryland/PoplarIsland/projectinfo/containmentdikes.pdf



Figur 3.2 Exempel på vågbrytare uppbyggd av stenfyllning med kröningsmur (bild från CEM).



Figur 3.3 Exempel på brottmekanismer för en vågbrytare av stenfyllning (bild från CEM).

- Konceptuell dimensionering av konstruktionen baserad på valda dimensioneringskriterier för brottmekanismer och hydraulisk respons (till exempel bestämning av blockstorlek på ytskiktet och höjd hos vågbrytare).
- Utvärdering av kostnaderna för olika alternativ och val av alternativ för en mer detaljerad analys.
- Detaljdimensionering av valt alternativ inklusive ekonomisk optimering och en värdering av konstruktionens totala säkerhet. Här ingår också att optimera material- och produktionsaspekter. I detta steg ingår ofta modellförsök och/eller avancerade datoranalyser för stora konstruktioner av icke-standardmässigt utförande.

För alla steg bör ett sannolikhetsbaserat tillvägagångssätt användas, eftersom det är svårt att exakt ange till exempel vilka laster en konstruktion kommer att utsättas för.

Vid dimensioneringen tas hänsyn till samverkan mellan våg och konstruktion, dels genom att titta på den hydrauliska responsen hos konstruktionen, dels genom att titta på våglaster och motsvarande respons hos de ingående konstruktionsdelarna. Detta kommer att förklaras ytterligare i de följande avsnitten.

3.4.2 Hydraulisk respons

Vid dimensionering av erosionsskydd ingår det att ta fram villkor för **uppspolningsnivå**, **överspolning**, **vågtransmission** och **vågreflektion**.

- **Uppspolningsnivån**, se Figur 3.4, ger en dimensionerande konstruktionshöjd, i det fall ingen överspolning accepteras, t.ex. vid väg- och järnvägsbankar, strandskoning och vågbrytare med gångtrafik. I de fall överspolning kan accepteras bestämmer skillnaden mellan uppspolningsnivå och konstruktionens krönhöjd överspolningsmängden (se nedan).
- **Överspolning**, inträffar där konstruktionshöjden är lägre än uppspolningsnivån. Tillåten överspolningsmängd är dimensionerande för krönhöjd, den övre delen av konstruktionen och inte minst för läsidan av konstruktionen. Accepterad överspolningsmängd varierar, från stora mängder för friliggande vågbrytare eller yttre vågbrytare utan intilliggande infrastruktur, till små mängder där det finns skyddsvärda intressen



Figur 3.4 Illustration av uppspolningsnivå. Strandskonings höjd måste anpassas till risken för överspolning. (Bild: Karin Odén)

på litet avstånd bakom skyddet eller där läsidan eller bakomliggande områden hotas av erosions-skador till följd av för mycket överspolat vatten.

- **Vågtransmission**, kan antingen uppstå då en konstruktion överspolas och nya vågor genereras på "baksidan" av konstruktionen eller genom att vågen passerar genom en permeabel konstruktion. Vid en nedsänkt (dränkt) konstruktion fortsätter den inkommande vågen mer eller mindre på samma sätt efter att ha passerat konstruktionen som före passagen. Dimensionerande värden för vågtransmissionen baseras på hur det skyddade området skall användas.
- **Vågreflektion** på grund av skyddande konstruktioner, såsom vågbrytare och pirar bestämmer i stort sett hur vågklimatet ändras/störs inom en hamnbassäng. Vågreflektionen påverkar dessutom manövreringsmöjligheterna i hamninloppet. Vågreflektion som skapar höga och branta vågor och "krabbsjö" gör det mycket svårt för framförallt mindre fartyg att manövrera. Dessutom kan vågreflektion på grund av vågbrytare och pirar påverka erosionsförloppet för närliggande stränder.

3.4.3 Vågbelastning och motsvarande respons hos konstruktionsdelarna

En viktig del i dimensioneringsprocessen för erosions-skydd är bestämningen av laster och tillhörande spänningar, deformationer samt stabilitetsvillkor för ingående konstruktionsdelar.

För en konstruktion som byggs upp av stenfyllning kan inte ovan angivna angreppssätt användas, eftersom vågbelastningen på enskilda stenar inte kan bestämmas, varken i teorin, i modellförsök eller vid mätning på verkliga konstruktioner. I detta fall betraktar man istället konstruktionen som ”en svart låda” (man betraktar konstruktionen som en monolit istället för enskilda element) där man genom försök försöker fastställa relationen mellan ett särskilt vågklimat och konstruktionens respons vanligen uttryckt i termer som rörelser av släntbeklädningen. I många fall, särskilt för mer komplicerade konstruktioner, utförs modellförsök för att undersöka beteende och respons. Spänningsnivåer är kända endast för ett fåtal typer av block, där särskilda undersökningar har utförts.

För vertikala ”monoliter”, som mekaniskt påminner om och fungerar som stödmurar, är det möjligt att antingen i teorin eller via experiment uppskatta vågbelastningen och därigenom spänningar, deformationer och stabilitetsförhållanden.

4 MODELLERING

4.1 INLEDNING

Som framgår av föregående avsnitt, som behandlar dimensionering, är modellering, antingen i form av försök (såväl i modellskala som i fullskala) eller i form av numeriska simuleringar ofta nödvändiga för mer komplicerade erosionskydd. I vilken utsträckning numeriska simuleringar verkligen utförs beror dock ofta på den ”dimensioneringskultur” som lokalt råder. Framförallt i USA är det väsentligt vanligare att en rutinmässig dimensionering kontrolleras eller verifieras med hjälp av numeriska simuleringar. Även i några europeiska länder, till exempel Nederländerna, har en sådan dimensioneringskultur vuxit fram. I Sverige däremot finns ingen tradition av numeriska och teoretiska analyser och detta gäller kanske särskilt inom det geotekniska området. Därför utförs numeriska simuleringar och verifieringar relativt sällan i Sverige, utan vanligare är överslagsmässiga analyser.

Det finns flera olika numeriska verktyg som kan användas för modellering av erosionskydd. Med modellering avses här dels en hjälp vid utformningen av själva skyddet, dels värdering och bedömning av inverkan på omgivande områden. Genom att till exempel minska erosionsangreppen längs en viss kuststräcka, som av olika skäl har ansetts behöva skyddas, minskar mängden transporterat material i vattnet – eftersom en mindre mängd material lösgörs från den skyddade sträckan. Detta innebär även att en mindre mängd material kommer att avsättas nedströms det aktuella området, vilket i sig kan uppfattas som en tilltagande erosion där. Det är också tänkbart att uppförandet av erosionskydd påverkar strömningsförhållandena på ett sådant sätt, att nya erosionsområden utbildas, oberoende av mängden transporterat material i vattnet. Omfattningen av effekter liknande dessa kan, i varje fall relativt, bedömas med hjälp av numeriska simuleringar.

Utveckling av programvaror och numeriska verktyg är kostsamt och därför har med åren några olika centra vuxit upp, vilka i sin tur ofta samarbetar med andra insti-

tutioner. För närvarande bedrivs ett aktivt utvecklingsarbete främst vid följande centra:

- Lunds Tekniska Högskola (LTH), Sverige / U.S. Army Corps of Engineers, USA
- DHI Water & Environment, Danmark
- Delft Hydraulics, Nederländerna

Många andra institutioner medverkar ofta på något sätt i processen. DHI samarbetar till exempel med Tekniska Universitetet i Lyngby och Delft Hydraulics med Tekniska Universitetet i Delft. Därutöver deltar många organisationer genom att till exempel tillämpa verktyg utvecklade inom andra organisationer eller genom hjälp med kalibrering och validering av de modeller som tas fram. Exempel på en sådan organisation är HR Wallingford i England.

På grund av att erosionsförlopp är mycket komplexa är så gott som samtliga praktiska verktyg utvecklade för tvådimensionell analys. Svårigheterna att modellera problemen innebär att det ofta riktas kritik mot att använda numeriska verktyg. I slutändan är det dock de enda verktyg som står till buds, när de enklare analytiska verktygen visar sig otillräckliga.

4.2 OLIKA TYPER AV MODELLERINGSVERKTYG

I princip kan modelleringsverktyg delas upp i tre huvudgrupper:

- **Grupp 1:** Stora sofistikerade, komplicerade system, många gånger abstrakta och inte direkt praktiskt tillämpbara.
- **Grupp 2:** Stora system som är praktiskt tillämpbara, men kräver omfattande arbetsinsatser.
- **Grupp 3:** Förhållandevis små, enkla och förenklade system som är ingenjörsmässiga och praktiskt användbara.

Grupp 1, stora system som inte är praktiskt tillämpbara, får kanske mest ses som akademiska verktyg. De tjänar självfallet ett syfte ur pedagogisk och akademisk synvinkel, men är alltför teoretiska för att praktiskt kunna tillämpas. De innehåller ofta parametrar och kalibreringsfaktorer som inte alltid är fysikaliskt väldefinierade och därför svåra att både förstå och hantera av ingenjörer som inte aktivt deltagit i processen att utveckla verktygen.

De verktyg/system som ingår i den andra gruppen använder sig visserligen av fysikaliskt mer väldefinierade parametrar, men är ofta stora och omfattande i den bemärkelsen att de dels söker beskriva många enskilda processer, dels kräver mycket datorkraft, stora mängder ingångsdata osv. Användningen är således begränsad till större projekt där detta kan tillåtas ur ekonomiska och tidsmässiga aspekter.

Den tredje gruppen slutligen omfattar verktyg som är enklare till sin natur och inriktade på att analysera enskilda processer. De parametrar och kalibreringsfaktorer som används är fysikaliskt väldefinierade och omfattningen rimlig för att ge acceptabel handläggnings- och analys-tid och därmed en acceptabel kostnad. Beskrivningen i denna rapport kommer att fokuseras på verktyg som ingår i den tredje huvudgruppen.

Några enskilda processer som kan identifieras är t.ex.:

- kustparallell sedimenttransport,
- sedimenttransport vinkelrätt mot kusten samt
- inverkan på strandlinjen av höga vattenstånd och höga vågor (stormförhållanden).

För varje sådan enskild process kan således ett verktyg från den tredje gruppen identifieras och användas. Varje verktyg har dock sina möjligheter och sina begränsningar, och en stor och viktig del av en analys är just att värdera om det problem som avses behandlas inte bryter mot någon/några av de grundläggande antagandena/begränsningarna i det verktyg som valts.

Även om indelningen uttryckts i praktiskt användbara program, kan dock den totala analys- och utvärderingstiden vara omfattande. För vissa program kan noggranna analyser kräva flera månaders och översiktliga analyser någon/några månaders arbete.

4.3 METODIK VID NUMERISK SIMULERING

De stora problemen vid numerisk simulering, oavsett vilket geotekniskt problem som ska analyseras, ligger i svårigheten att modellera problemet. Det finns ett flertal osäkerheter och ibland även helt okända parametrar. Traditionellt kalibreras modeller mot resultat från omfattande serier med laboratorieförsök, som utförs enligt ett förutbestämt program, i syfte att täcka in de aspekter som anses nödvändiga. Vad gäller stranderosion kan i och för sig vissa typer av motsvarande kalibreringar utföras på laboratorium, men kalibrering mot mätningar i full skala i fält är nödvändig för att uppnå tillräcklig noggrannhet i analyserna.

En vanlig metodik vid numerisk modellering av stranderosionsproblem är, att samla in mätningar från fält, t.ex. av strandlinjens läge, i så stor omfattning så att dessa kan användas både för kalibrering och verifiering av det verktyg som valts för analysen. En platsspecifik kalibrering måste alltid göras, eftersom förhållandena är olika från plats till plats, t.ex. vad gäller exponering för vågor, geotekniska förhållanden etc. Kalibreringen ger bl.a. värden på olika koefficienter som ingår i modellerna. De modellverktyg som finns tillgängliga idag använder sig alltså av en sorts historisk beskrivning för kalibreringen och kan därefter förutsäga hur kusten kommer att förändra sig i framtiden, förutsatt att förhållandena i stort bibehålls. Stora osäkerheter med ett sådant angreppssätt är just den ringa kunskapen om vilket beteende systemet uppvisar om det utsätts för laster och lastnivåer som aldrig inträffade under den tidsperiod som ligger till grund för kalibreringen. Det är därför viktigt att bära i minnet att det inte är möjligt att utföra några exakta analyser.

Numeriska simuleringar ska främst ge underlag för relativa jämförelser, till exempel underlag för att jämföra effekten av olika alternativa erosionskydd och utformningar av dessa relativt varandra. Några exakta svar på hur situationen kommer att vara efter ett visst antal år kan alltså inte erhållas. Den slutliga dimensioneringen och konstruktionsutformningen av skyddet utförs med analytiska metoder, eftersom dessa fortfarande är bättre än numeriska simuleringar.

Eftersom varje program (verktyg) i gruppen ingenjörsmässiga och praktiskt användbara program är avsett för att analysera en viss, specifik problemställning, är det inte ovanligt att analysen utförs med en kombination av

olika verktyg, dels för att täcka in olika problemställningar, men också för att analysera en given problemställning med olika verktyg och jämföra resultaten sinsemellan.

Det är viktigt att såväl den som utför analysen som den som skall nyttja resultaten är medveten om och känner till varje verktygs möjligheter och begränsningar, allt i syfte att tolka resultaten på ett så korrekt sätt som möjligt. Det tjänar att framhålla, att många av dem som utför analyser betonar att ju mer avancerad programvaran (analysverktyget) är, desto större och djupare kunskap krävs. Mer avancerade modeller beskriver fler processer och kanske också deras variation i tid och rum, vilket förutsätter att användaren har kunskap om dessa. Det finns således inte några ”nyckelfärdiga” modeller där användaren bara kan trycka på en knapp för att köra simuleringar och få ut resultat. Det är därför inte heller så att en mer avancerad modell nödvändigtvis ger bättre resultat än en enklare modell. Ju fler ingångsparametrar som behövs och ju mer dessa varierar i tid och rum, ju större är risken att tillförlitliga indata i tillräcklig omfattning inte finns tillgängliga. Kvaliteten på kalibrering och verifiering är ofta beroende på hur många modellkörningar man har råd och tid att göra. Mer omfattande modeller kan således inte köras så mycket som enklare modeller och blir följaktligen ofta sämre verifierade.

4.4 INGÅNGSDATA

Oavsett vilket modellverktyg som används erfordras i stort sett är samma typ av ingångsdata:

- **Uppgift om laster.** Lasterna utgörs av främst av vågor och vattenstånd. Lastbeskrivningen är viktig, men samtidigt kanske en av de svåraste att utföra. Våg-, vatten- och vindlaster varierar på ett komplicerat och svårbeskrivbart sätt. Det är i och för sig inte en helt ovanlig situation för geotekniska analyser, där många laster uppvisar motsvarande typ av variation. För att överhuvudtaget kunna genomföra analyser erfordras någon form av förenklad, representativ beskrivning av lasterna. Ofta görs sådana approximationer utifrån statistiska betraktelsesätt.
- **Geotekniska förhållanden.** Jordlagerföljd och jordlagrens fysikaliska/mechaniska egenskaper måste beskrivas för att dess erosionsbenägenhet ska kunna beaktas i analyserna. Även detta görs många gånger

approximativt på representativ basis. Det kan till exempel vara att ansätta jorden en medelkornstorlek som ger en viss erosion under vissa givna betingelser.

- **Geometriska förhållanden.** En beskrivning av rådande förhållanden, t.ex. kustlinjer, bottenprofiler, liksom de eventuella olika åtgärder/ingrepp som avses göras och som ska analyseras, måste göras i termer som passar den modell/det verktyg som kommer att användas.
- **Konstruktioner.** Konstruktioner som påverkar strömnings- och sedimentationsförhållandena, t.ex. hamnar, kajer och hövder, längs de strandområden som analyseras ska beskrivas på ett sätt som är avpassat för det verktyg som avses användas. Det är bl.a. viktigt att beskriva graden av vattengenomsläpplighet.

5 EXEMPEL PÅ NUMERISKA MODELLERINGSPROGRAM

5.1 PROGRAM FRÅN LUNDSTEKNISKA HÖGSKOLA (LTH)

Vid avdelningen för Teknisk vattenresurslära (TVRL) inom LTH har modellering och programutveckling skett under mer än 20 år. Detta arbete har skett i nära samverkan med US Army Corps of Engineers (USACE). Verksamheten bedrivs framförallt inom Grupp 3 (Enkla och förenklade ingenjörsmässiga verktyg). Modelleringsverktygen ingår i ”paket” med ett flertal olika program från USACE, som sinsemellan kan kommunicera med varandra.

För modellering av kustzoner erbjuder TVRL/USACE följande modelleringsverktyg:

- GENESIS för analys av regional sedimenttransport och kustutveckling över flera årtionden.
- SBEACH för analys av bottenprofilutveckling under inverkan av varierande vågor och vattenstånd. Tidskalan är här veckor med speciell fokus på inverkan av svåra stormar.

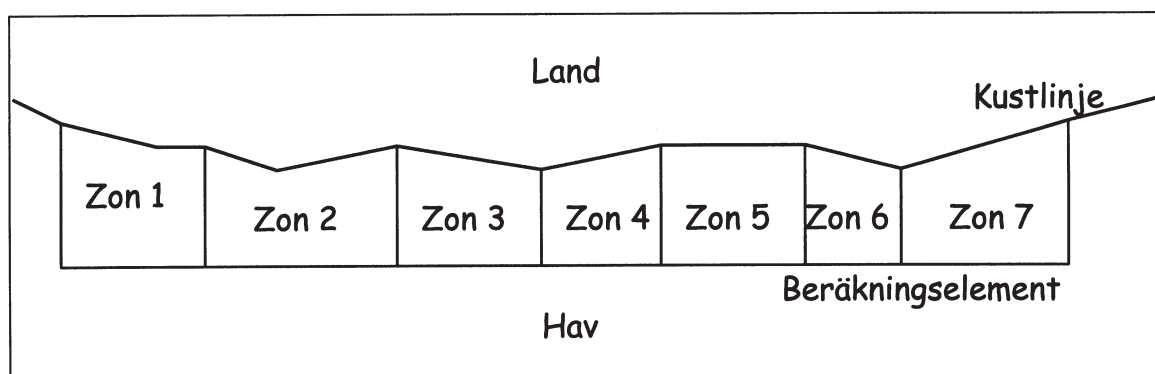
Programvarorna (paketen) kommer att beskrivas utförligare i följande avsnitt.

5.1.1 GENESIS – modellering av kustparallell sedimenttransport och förändring av kustlinjen

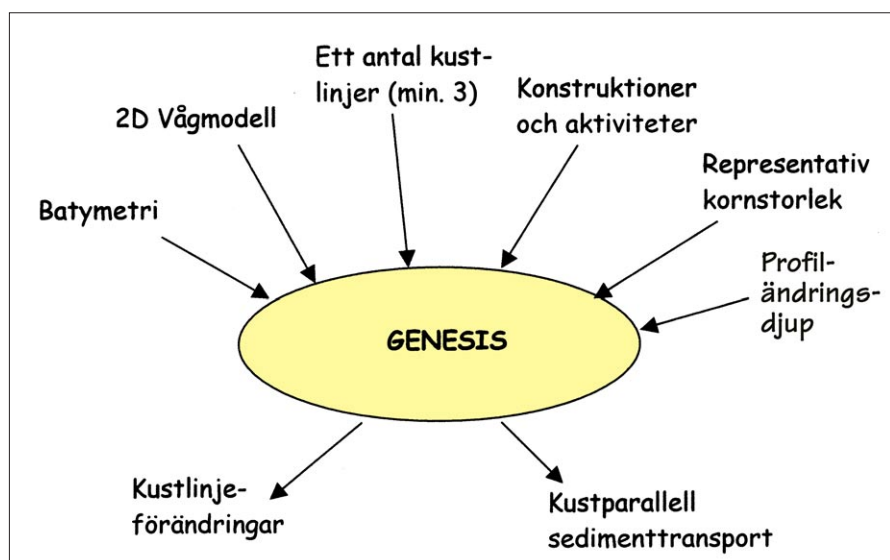
GENESIS (GENERALized model for Simulating Shoreline change) är ett program för tvådimensionell modellering av kustparallell sedimenttransport och därmed förändrade kustlinjeförändringar, främst under vågors inverkan men även tidvattenförändringar. Programmet baseras på s.k. one-line theory, vilket innebär att enbart förändringar i kustlinjens läge modelleras, medan bottenprofilerna antas förbli oförändrade, utom i det kustnära området.

Analysen inleds med att den aktuella sträckan delas upp, diskretiseras, i ett antal beräkningselement. Den våginducerade sedimenttransporten beräknas på ränderna till varje element. En kontinuitetsberäkning görs för varje element (ca 5 till 50 m breda) i varje tidssteg (ca 3 till 6 timmar) för att bestämma hur erosion respektive ackumulation varierar i tid och rum utmed den studerad kusten, se Figur 5.1.

Konstruktioner av olika slag modelleras med hjälp av linjära segment. För olika typer av konstruktioner erfordras olika grad av beskrivning. Det behövs till exempel mer ingångsdata för en friliggande vågbrytare än för en hövd. Ingångsdata och beräkningsresultat från GENESIS exemplifieras i Figur 5.2.



Figur 5.1 Kustrens indelad i beräkningselement för analys med GENESIS.



Figur 5.2 Exempel på ingångsdata och beräkningsresultat från GENESIS.

Ingångsdata

Batymetri eller bottenprofiler erfordras för den geometriska beskrivningen av problemet. Ju fler bottenprofiler som finns uppmätta och kan användas, desto bättre förutsättningar för en god kalibrering och verifiering av modellen för de platsspecifika förhållandena finns. Bottenprofilerna uppdateras inte, som tidigare nämnts, under beräkningarna annat än i det kustnära området, där kustlinjeförändringen även påverkar bottenprofilen.

2D vågmodellen används för att beskriva de laster som verkar på stranden och som ger upphov till erosion-sangrepp. Vågklimatet uppdateras vanligen var sjätte timme i GENESIS, dvs. någon form av medelvågklimat per sex timmar används vid analysen. Ett antal *kustlinjer*, minst tre, behöver beskrivas för att modellen ska kunna kalibreras och verifieras. Ju fler kustlinjer som finns tillgängliga, desto bättre förutsättningar för en god kalibrering och verifiering finns. En av de största svårigheterna med modelltillämpningen är att etablera ett representativt vågklimat. Övriga ingångsdata är i stort sett enbart uppmätningar av fysikaliska parametrar, vilket i och för sig kan vara komplicerat, men möjligt att utföra med godtagbar noggrannhet. Vågklimatet däremot är ständigt föränderligt och inte lika lätt att beskriva. Under sådana förhållanden etableras ett ekvivalent vågklimat

Den *representativa kornstorleken* utgör den geotekniska beskrivningen av jorden. I GENESIS används en

enkel beskrivning med mediankornstorleken, d_{50} . Värdet på d_{50} erhålls genom att jämföra olika strandprofiler med ansatta värden till dess att överensstämmelse, eller åtminstone godtagbar överensstämmelse, erhålls.

Konstruktioner och aktiviteter beskrivs, som tidigare nämnts, med hjälp av linjära segment som ges olika hydrauliska egenskaper. Segmenten har en längd men ingen bredd, och tjänar i analysen syftet att simulera hur olika typer av åtgärder eller konstruktioner påverkar strömnings- och sedimentationsförhållandena. GENESIS kan representera pirar, friliggande kustparallella vågbrytare, utvinning och utläggning av sand samt mekanisk förbiledning av sand ("bypassing").

Profiländringsdjup (closure depth) är en morfodynamisk parameter som anger till vilket djup vågorna förorsakar djupförändringar.

Beräkningsresultat

Som resultat från analysen erhålls *kustlinjeförändringar* och uppgifter om *kustparallell sedimenttransport*. Det kan inte förväntas att en simulering resulterar i en exakt beskrivning av kustlinjen om 20 år, eller om 50 år eller om hundra år eller vilken tidsperiod simuleringen utförs för. Däremot kan analysen ge information om vilken av ett antal olika föreslagna åtgärder som är mest gynnsam, för att på motsvarande tid ge ett visst önskat resultat.

5.1.2 SBEACH – verktyg för modellering av sedimenttransport vinkelrätt mot kusten och förändring av bottenprofiler

Även SBEACH har utvecklats vid Lunds Tekniska Högskola, Avdelning för Teknisk Vattenresurslära i samarbete med U.S. Army Corps of Engineers. SBEACH används för att modellera sedimenttransporten vinkelrätt mot kusten och de därmed orsakade förändringarna av bottenprofilen.

Programmet utvecklades ursprungligen för att analysera hur bottenprofilen närmast stranden eroderas under en storm vid högvatten. Det går dock även att analysera återhämtning/återställande efter en storm liksom årstidsbundna variationer hos bottenprofilen vid stranden. Bottenprofilerna tillåts alltså variera till skillnad från GENESIS.

Ingångsdata

I stort sett krävs motsvarande indata till SBEACH som har beskrivits ovan för GENESIS:

- *Vågklimat* bestående av riktning, våghöjd och period (våglängd).
- *Vattenstånd*
- *Ursprunglig bottenprofil*
- *Sedimentkaraktäristika* såsom kornstorlek, densitet osv.

Vågklimatet är återigen bland de svåraste ingångsdata att bestämma. Så är fallet för samtliga analysverktyg, och därför används också någon form av representativ ”medelvärdesbeskrivning”.

Därutöver innehåller modellen parametrar, vars värden bestäms genom kalibrering för plats specifika förhållanden.

Beräkningsresultat

Som resultat från en simulering erhålls förändringar i bottenprofilen. Sekundära resultat i form av sedimenttransport och volym eroderat material under en storm kan också erhållas.

5.2 PROGRAM FRÅN DHI, DANMARK

Vid DHI har modellering och programutveckling genomförts under mer än 20 år. Verksamheten bedrivs framförallt inom grupp 2 enligt kapitel (stora verktyg, med be-

hov av stor datorkraft) och grupp 3 (enkla och förenklade ingenjörsmässiga verktyg), se kapitel 4.2.

Modelleringsverktyg ingår ofta i ”paket” med ett flertal olika program, som ibland också sinsemellan kan kommunicera med varandra. För modellering av kustzoner erbjuder DHI följande modelleringsverktyg i olika ”paket”:

- MIKE21 för tvådimensionell analys av kustnära vatten och hav.
- LITPACK för endimensionell analys av kustparallell sedimenttransport av friktionsjordar och kustlinjeförändringar.

Programvarorna (paketen) beskrivs utförligare i följande avsnitt.

5.2.1 MIKE21 – tvådimensionell modellering av kustnära vatten och hav

MIKE21 är DHI:s mest använda modellpaket. Paketet är uppbyggt av en mängd olika moduler, varav följande är av intresse vid analys av erosionsproblem:

- **PP** är en modul för för- och efterprocessering av in- och utdata
- **HD** är en hydrodynamisk modul som simulerar förändringar i vattennivå och vattenflöde som resultat av inverkan av olika laster.
- **ST** är en avancerad sedimenttransportmodell med möjlighet att analysera ström- och våggenererad materialtransport.
- **STQ3** är en tilläggsmodul till ST som ger möjlighet att analysera sekundära effekter.
- **CAMS** är en modul för analys och modellering av kustmorfologi. Här integreras våg-, flödes- och sedimenttransportmodeller till en helhet i form av en dynamisk morfologisk modell.
- **NSW** (Near Shore Spectrac Wind-Wave Model) beskriver propagering, tillväxt och avklingande av vågor med kort våglängd och liten amplitud i kustnära områden.

Olika typer av konstruktioner, såväl erosionskydd som andra konstruktioner, kan analyseras och beaktas i MIKE21. Det är möjligt att analysera/modellera såväl vanliga som nedsänkta vågbrytare, dvs. vågbrytare vars krön inte når upp över vattenytan.

5.2.2 LITPACK – modellering av kustparallell sedimenttransport av friktionsjord och kustlinjeförändringar

LITPACK är ett program för endimensionell analys av sedimenttransport av friktionsjord på grund av vågor, vind, strandförskjutning och förändringar av bottenprofilen. Det är ett enkelt program och förutsätter uniforma förhållanden, dvs. långsträckta, likartade stränder.

Även LITPACK är uppbyggt av olika moduler:

- **LITSTP** för analys av transport av icke-kohe-siva sediment i enskilda punkter. Detta är samma typ av beräkning som utförs i MIKE21.
- **LITDRIFT** för analys av strandförskjutning, dvs. analys av den kustparallella sedimenttransporten i form av årlig netto och bruttotransport.
- **LITLINE** för analys av kustlinjeutvecklingen.
- **LITPROF** för analys av bottenprofilförändringar på grund av sedimenttransporter vinkelrätt mot kustlinjen.

Vid analys kan fyra olika typer av erosionskydd/kustskydd beaktas, nämligen *hövder*, *vågbrytare*, *friliggande vågbrytare* och *strandskoning*.

5.3 PROGRAM FRÅN DELFT HYDRAULICS, NEDERLÄNDERNA

I princip så har även programtillverkarna vid Delft Hydraulics utvecklat motsvarande verktyg som vid LTH i Lund respektive vid DHI i Danmark. Självfallet kan problemställningarna vara olika i skilda delar av världen, vilket gör att verktygen i större eller mindre utsträckning kan spegla specifika processer.

Bland de verktyg/program från Delft Hydraulics, som är av intresse för analys av stranderosionsproblem kan nämnas Delft3D och UNIBEST. Bägge dessa verktyg utgör ett sorts moderprogram med ett antal moduler under sig, var och en med syfte att analysera specifika processer. Programmen tillhör grupp 2 och 3 enligt kapitel 4.2.

5.3.1 Delft3D – Generellt verktyg för modellering i tre dimensioner

Delft3D är ett verktyg för analys i två eller tre dimensioner av vattenflöde, vågor, vattenkvalitet, ekologi, sedimenttransport och bottenmorfologi. Programmet kan under analysen integrera effekten av samtliga dessa processer och beakta interaktionen dem emellan. Även om

det i företagets presentationsmaterial ges en bild av ett allmängiltigt analysverktyg, är det naturligtvis fortfarande så, att de interaktiva processerna måste vara matematiskt beskrivna och implementerade i programmet för att kunna beaktas i analysen. Möjligheten att beakta dem begränsas således av hur dessa matematiska formuleringar är gjorda. Det kan tänkas att de beskrivningar som finns i programverktyget inte alls är applicerbara för processer i vissa områden i världen, medan de beskriver processerna mycket bra i andra delar. Men å andra sidan är det alltid fallet vid numerisk modellering, att en stor begränsning ligger i just den modell/de modeller som finns implementerade i programvaran.

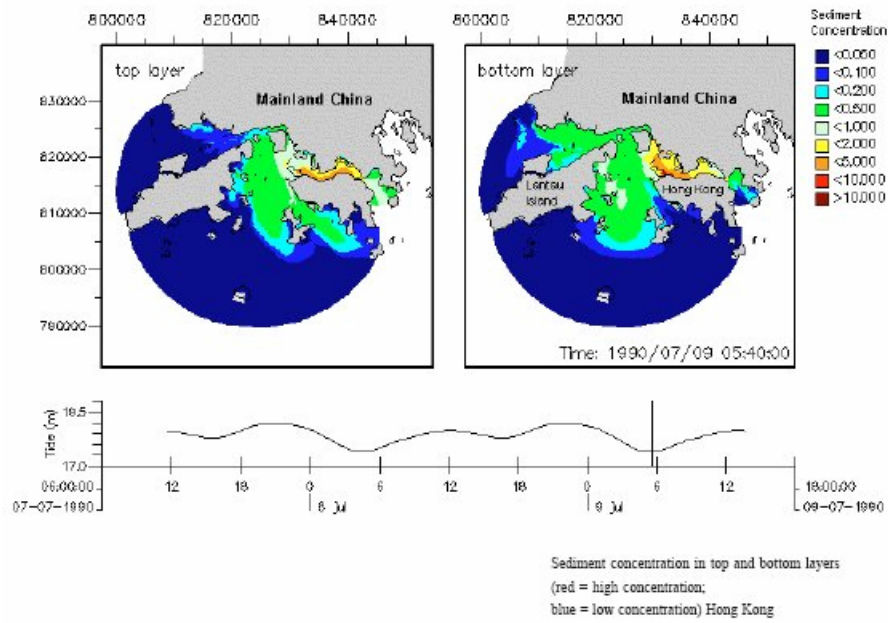
Delft3D är uppbyggt av följande moduler av intresse för analys av stranderosionsproblem:

- **Delft3D-FLOW** är en hydrodynamisk modul och som i princip simulerar icke stationärt flöde i relativt grunda vatten.
- **Delft3D-WAVE** är en modul som beräknar icke-stationär utbredning av vågor med begränsad amplitud över en ojämn botten taget de flesta hydrauliska förutsättningarna i beaktande.
- **Delft3D-SED** simulerar transport, erosion och avsättning av kohe-siva och icke-kohe-siva, organiska och icke-organiska, suspenderat eller sedimenterat material. Förändringar i bottenpografi beaktas inte, varför enbart korttidsanalyser är möjliga, se Figur 5.3.
- **Delft3D-MOR** beräknar morfologiska bottenförändringar på grund av gradienter i sedimenttransport och tidsberoende randvillkor som definieras av programanvändaren.

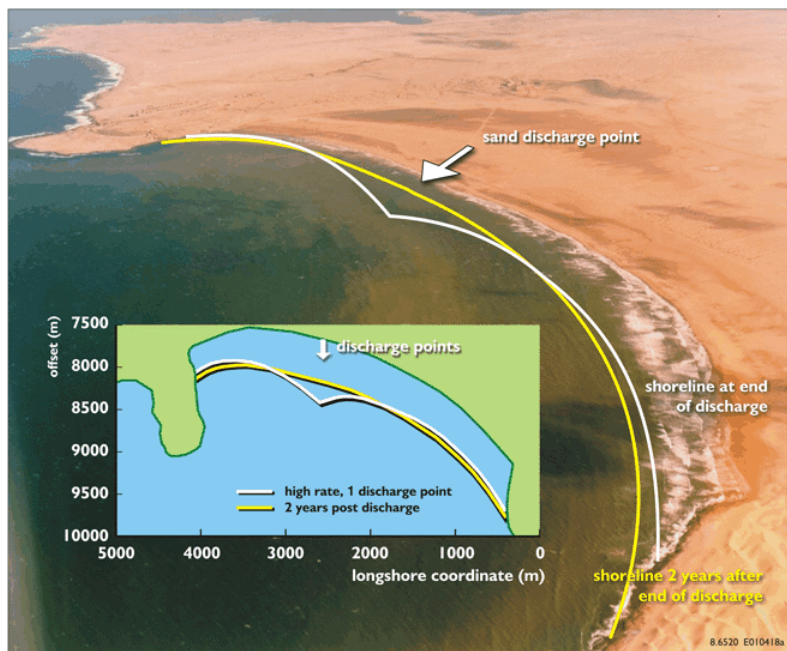
5.3.2 UNIBEST – modellering av sedimenttransport och kustlinjeförändringar

UNIBEST-familjen består av tre olika moduler:

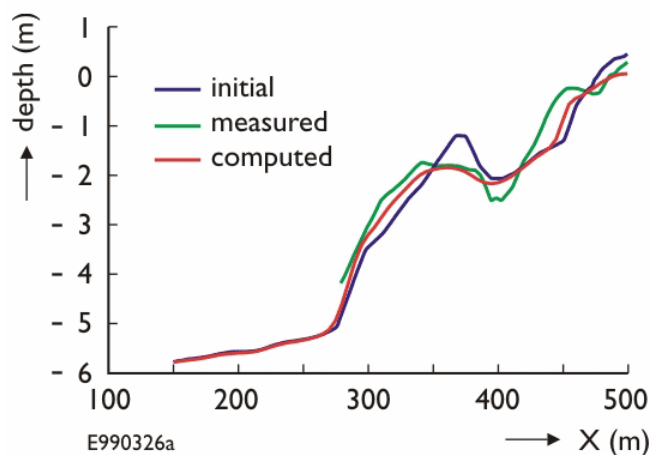
- **UNIBEST-CL+** som används för analys av kustparallell sedimenttransport och kustlinjeförändringar i huvudsak baserad på massbalansanalyser, se Figur 5.4.
- **UNIBEST-TC** som används för analys av sedimenttransport vinkelrätt mot kusten och de därigenom uppkomna förändringarna av bottenprofilen, se Figur 5.5.
- **UNIBEST-DE** analyserar förändringar i bottenfiler under stormförhållanden.



Figur 5.3.
Exempel på modellering av sedimenttransport med Delft3D (Delft Hydraulics).



Figur 5.4
Exempel på modellresultat med UNIBEST-CL+ (Delft Hydraulics).



Figur 5.5
Exempel på modellresultat med UNIBEST-TC (Delft Hydraulics).

De olika programmodulerna kan antingen användas tillsammans eller var för sig.

5.4 UCIT

Ytterligare ett verktyg som förtjänas att nämnas är UCIT, även det utvecklat vid Delft Hydraulics i Nederländerna (Koningsveld, Mark van, 2003). Det är i egentlig mening inte något program för modellering av sedimenttransport, bottenpografiförändringar eller bottenprofilförändringar, utan snarare ett program för att på ett systematiskt sätt kunna hantera, behandla och analysera en stor mängd data. Längs nederländernas Atlantkust finns ett stort antal tvärprofiler som regelbundet mäts upp. Därutöver sker videoövervakning/mätning av åtminstone delar av kuststräckor med hjälp av det s.k. Argussystemet. De två olika mätsystemen skall ses som komplement till varandra, där manuella uppmätningar av bottenprofiler på grund av såväl praktiska som ekonomiska skäl enbart kan göras vid ett fåtal tillfällen, medan det med videoövervakningssystemet är möjligt att få bilder t.ex. varje timme, eller även tätare än så om det skulle vara nödvändigt.

Den information som samlas in förs in i ett och samma system, det s.k. UCIT-systemet. Med hjälp av detta system kan sedan analyseras dels vilka kuststräckor som utsätts för erosion, dels i vilken omfattning erosion förekommer. Trendanalys är möjligt, eftersom stora datamängder föreligger, och systemet används idag bland annat för att prognosticera var någonstans och i vilken omfattning sandåterföring är nödvändig. Verktöget har möjliggjort en systematisk värdering av underhållsbehovet längs den nederländska Atlantkusten.

6 DISKUSSION OCH FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE

Det saknas, som tidigare nämnts, lämpliga svenska dimensioneringsanvisningar för erosionskydd. Erosionsproblematiken finns beskriven, i generella ordalag, i geotekniska handböcker. I den mån dessa handböcker tillsammans med kustingenjörens samlade erfarenhet inte är tillräcklig, är det brukligt att någon av de handböcker som U.S. Army Corps of Engineers (USACE) har gett ut, används som underlag för dimensionering och utformning.

En viktig aspekt i sammanhanget är vilka laster som konstruktionen (erosionskyddet) antas utsättas för under sin livstid, dvs. huvudsakligen vatten-, vind- och våglaster. Hur dessa bestäms, påverkar självfallet i stor utsträckning hur erosionskyddet i slutändan kommer att utformas.

Modellering och simulering av kustprocesser, antingen det rör sig om sedimenttransport parallellt med eller sedimenttransport vinkelrätt mot kusten och bottenprofilförändringar, är komplicerade och kräver dels en djup förståelse och kunskap inom området, dels mycket indata. De modelleringsverktyg som används måste kalibreras, vilket förutsätter relativt stora mängder ingångsdata. Desto mer ingångsdata som finns tillgänglig, ju bättre precision erhålls i analyserna.

De modeller som finns implementerade i de olika programverktygen är av olika slag, allt från enkla, ingenjörsmässiga till komplicerade och i huvudsak av akademiskt intresse. Även för de enkla, ingenjörsmässiga modellerna måste operatören dock besitta ingående kunskaper vad gäller kustmorfologi och morfologiska processer för att kunna bygga upp sin modell och utföra en så korrekt analys som möjligt.

I och med att verktygen kalibreras mot befintliga data, en sorts bakåtanalys, är det egentligen inte möjligt att analysera systemets respons för förhållanden i framtiden som det ännu inte utsatts för. Detta är i och för sig en begränsning med verktygen, men samtidigt en möjlighet. Om man kan acceptera att verktygen inte ska användas för absoluta analyser, utan enbart för relativa analy-

ser, där t.ex. effekten av olika åtgärder/alternativt ingen åtgärd alls vägs mot varandra, utan att göra anspråk på att presentera exakta förhållanden om såg 50 år eller 100 år, kan analyser tjäna som ett mycket värdefullt underlag i både besluts- och projekteringsprocesser av erosionskydd. En annan begränsande faktor för bestämning av framtida förhållanden är naturligtvis att man inte kan förutsäga det framtida vågklimatet exakt.

Flera olika verktyg/programpaket finns utvecklade. Det finns både likheter och olikheter dem emellan. Både innan en modellering genomförs och efteråt, när resultatet tolkas och värderas, måste respektive verktygs möjligheter och begränsningar vara kända. Många gånger kan den som utför modelleringen frestas att använda ett verktyg för att analysera förhållanden som egentligen inte är möjliga. Återigen är det av största vikt att operatören av programverktygen dels är tillräckligt insatt i verktygen som sådana, dels även i de teorier som verktygen bygger på och de processer de modellerar.

Kostnaden för numeriska modelltillämpningar på ingenjörsmässiga problem är relativt stor. I Sverige finns heller inte någon teoretisk tradition att använda numeriska modelltillämpningar inom de geovetenskapliga disciplinerna. Därför genomförs modellsimuleringar relativt sällan. I andra länder, där utvecklingen har varit annorlunda än i Sverige, används däremot numeriska modelltillämpningar i betydligt större omfattning, inte bara vad gäller stranderosion utan geotekniska problemställningar i allmänhet. Eftersom simuleringarna ger värdefullt underlag för en beslutsprocess och också möjligheten att i alla fall relativt enkelt väga och värdera effekten av olika tänkbara alternativ mot varandra, vore det önskvärt att verktygen användes mer i Sverige. Dels skulle erfarenheten av verktygen som sådana att öka, dels skulle även kalibreringsvärden specifika för svenska förhållanden kunna sammanställas på ett mer systematiskt sätt.

Vid dimensionering och modellering av erosionskydd krävs en mängd mätningar/ingångsdata för att få bästa möjliga resultat. Lämpligt hade varit att man uti-

från andra länders kunskaper om mätningar inför dimensionering/modelleringsarbeten jämför med vad som redan idag mäts inom Sverige genom bland annat SMHI:s och Sjöfartsverkets försorg. En sammanställning över mätpunkter och vilka parametrar som mäts bör göras. Dessa mätningar bör sedan kompletteras såpass att man kan komplettera andra länders dimensioneringsanvisningar så att de fungerar för svenska förhållanden. Det skulle dessutom vara lämpligt att en likartad metodik att ansätta laster, som vid beaktande av vindlaster på byggnader tas fram för att ”harmonisera” utformning och dimensionering av erosionsskydd.

REFERENSER

- CEM (2003).** Coastal Engineering Manual. Editor: J. Pope. US Army Corps Engineers.
www.erdc.usace.army.mil
- Delft 3D (2004).** Presentationsmaterial mjukvaruprogram. Delft Hydraulics, Nederländerna.
- GENESIS (2004).** Presentationsmaterial mjukvaruprogram. Institutionen för teknisk vattenresurslära, Lunds tekniska högskola, Lund.
- Hanson, H. (2004).** Personlig kontakt. Institutionen för teknisk vattenresurslära., Lunds tekniska högskola, Lund.
- Johansson, L. (2003).** Stranderosionsskydd, Typer – Dimensionering – Modelling. SGI Varia 532. Statens geotekniska institut, Linköping.
- Koningsveld, Mark van (2003).** Matching Specialist Knowledge with End User Needs, Universal Press, Veenendaal, The Netherlands, ISBN 90-365-1897-0.
- Lastrup, C. Knudsen, S.B., Madsen, H.T. & Sørensen, P. (2004).** Personlig kontakt. Kystdirektoratet (KDI), Lemvig, Danmark.
- LITPACK, (2004).** Presentationsmaterial mjukvaruprogram. DHI Water & Environment, Hørsholm, Danmark. www.dhi.dk
- MIKE21 (2004).** Presentationsmaterial mjukvaruprogram. DHI Water & Environment, Hørsholm, Danmark. www.dhi.dk
- Ohlsson, F., Hallingberg, A., Johansson, L. & Nyberg, M. (1994).** Erosionsskydd i samband med förstärkningsåtgärder i slänter. Rapport 1:94. Skredkommissionen, Linköping.
- Olofsson, T. (1987).** Erosionsskydd i vatten vid väg- och brobyggnad. Publikationsnr. 1987:18. Vägverket, Borlänge.
- Pedersen, N.H. (2004).** Personlig kontakt. DHI Water & Environment, Hørsholm, Danmark.
- SBEACH (2004).** Presentationsmaterial mjukvaruprogram. Institutionen för teknisk vattenresurslära, Lunds tekniska högskola, Lund.
- UNIBEST (2004).** Presentationsmaterial mjukvaruprogram, Delft Hydraulics, Nederländerna.



Statens geotekniska institut
Swedish Geotechnical Institute

SE-581 93 Linköping, Sweden

Tel: 013-20 18 00, Int + 46 13 201800

Fax: 013-20 19 14, Int + 46 13 201914

E-mail: sgi@swedgeo.se Internet: www.swedgeo.se