

Fördjupningsstudie om erosion i vattendrag

*Bengt Rydell, Håkan Persson, Linda Blied
Sofia Åström och Walter Gyllenram*

GÄU - delrapport 2

Linköping 2011





STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

Göta älvutredningen - delrapport 2

Fördjupningsstudie om erosion i vattendrag

In-depth study on erosion in rivers

Bengt Rydell, SGI
Håkan Persson, SGI
Linda Blied, SGI
Sofia Åström, SMHI
Walter Gyllenram, SMHI

**Göta älvutredningen
delrapport 2**

Beställning

Dnr SGI

Uppdragsnr SGI

Statens geotekniska institut (SGI)
581 93 Linköping

SGI
Informationstjänsten
Tel: 013-20 18 04
Fax: 013-20 19 14
E-post: info@swedgeo.se
www.swedgeo.se

6-1001-0033

14091

FÖRORD

Göta älvutredningen (GÄU)

För att möta ett förändrat klimat och hantera ökade flöden genom Göta älv har Regeringen gett Statens geotekniska institut (SGI) i uppdrag att under en treårsperiod (2009-2011) genomföra en kartläggning av stabiliteten och skredriskerna längs hela Göta älv-dalen inklusive del av Nordre älv. Tidigare utförda geotekniska undersökningar har sammanställts och nya undersökningar har utförts längs hela älven. Metoderna för analys och kartering av skredrisker har förbättrats. Nya och utvecklade metoder har tagits fram för att förbättra skredriskanalyser och stabilitetsberäkningar, förbättra kunskapen om erosionsprocesserna längs Göta älv, bedöma effekten av en ökad nederbörd på grundvattensituationen i området, utveckla metodiker för kartläggning och hantering av högsensitiv lera (kvikklera) samt utveckla metodik för konsekvensbedömning. Utredningen har genomförts i samverkan med myndigheter, forskningsinstitutioner samt nationella och internationella organisationer.

Denna delrapport är en del i SGI:s redovisning till Regeringen.

Fördjupningsstudie om erosion i vattendrag

Denna rapport är ett komplement till den rapport som framtagits över erosionsförhållandena i Göta älv och som publicerats som GÄU delrapport 1. Avsikten med denna fördjupningsstudie har varit att beskriva och fördjupa kunskapen om olika förhållanden som påverkar erosion i vattendrag och speciellt där kohesionsjord dominerar. I rapporten redovisas bland annat grundläggande mekanismer för erosion, olika metoder för att undersöka erosionsegenskaper och exempel på hur erosionsförhållanden kan modelleras och beräknas.

I utredningen om erosionsförhållanden har det framkommit behov av ytterligare kunskapsuppbyggnad och FoU inom området. I fördjupningsstudien redovisas de behov av ny kunskap som sammanställts under utredningens gång.

Utredningen har genomförts av Bengt Rydell (uppdragsledare), Linda Blied och Håkan Persson, SGI tillsammans med Sofia Åström och Walter Gyllenram, SMHI. I den Expertgrupp som medverkat i erosionsutredningen har ingått Magnus Larson, Lunds universitet och Leo van Rijn, Deltares, Nederländerna och deras kunskap och erfarenhet har tillförts även denna fördjupningsstudie.

Linköping 2011

Marius Tremblay

Uppdragsledare, Göta älvutredningen

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

SAMMANFATTNING.....	6
1 BAKGRUND OCH SYFTE	8
2 GENOMFÖRANDE	9
3 MEKANISMER VID EROSION OCH SEDIMENTTRANSPORT	10
3.1 Erosion och bottenmaterial.....	10
3.2 Morfologi och erosionsprocesser i Göta älv	11
3.2.1 Erosion och släntstabilitet.....	11
3.2.2 Vågors mekanism och eroderande verkan.....	12
3.2.3 Vattenreglering.....	15
3.3 Strömmande vatten och dess interaktion med botten.....	16
3.3.1 Turbulens	16
3.3.2 Strömförluster.....	16
3.3.3 Friktion mot botten	17
3.3.4 Bottenskjuvspänning	17
3.3.5 Modellering av friktionskrafter	18
3.4 Erosion av friktionsmaterial	18
3.4.1 Rouse tal och Stokes' lag.....	19
3.4.2 Kritisk bottenskjuvspänning för friktionsmaterial.....	19
3.5 Erosion av kohesionsmaterial	20
3.5.1 Kritisk bottenskjuvspänning för kohesiva material	20
3.5.2 Modellering av erosion av kohesiva sediment.....	20
3.6 Sedimenttransport	21
3.6.1 Sedimentbudget	22
4 BERÄKNINGSMODELLEN DELFT 3D	23
4.1 Modellbeskrivning.....	23
4.2 Nödvändiga indata	24
4.3 Kalibrering och validering	24
5 PRINCIPER FÖR UNDERSÖKNINGAR.....	26
5.1 Inventering av tidigare utredningar	26
5.2 Översiktliga undersökningar.....	26
5.3 Detaljerade undersökningar.....	26
6 UNDERSÖKNINGSMETODER.....	28
6.1 Undersökning av bottensediment genom provtagning	28
6.1.1 Bottenlandare.....	28
6.1.2 ISEF-provtagare.....	29
6.1.3 SETEG-analys	30
6.1.4 HET (Hole Erosion Test)	31
6.2 Undersökning av bottensediment med akustiska metoder.....	31
6.2.1 Multibeamekolod	31
6.2.2 Backscatteranalys	32
6.2.3 Sidescan sonar	33
6.3 Metoder för mätning av suspenderat material.....	35
6.4 Mätningar av vattenstånd och strömförhållanden	35
7 DETALJERADE STRÖMMÄTNINGAR	36
7.1 Metodik	36
7.2 Resultat av detaljerade strömmätningar.....	36
7.3 Beräkning av bottenskjuvspänning utifrån mätdata.....	38

8	EROSIONSPARAMETRAR - ANALYS AV UNDERSÖKNINGAR I PROVFÄLT	41
8.1	Provfält.....	41
8.2	Resultat från geotekniska undersökningar.....	42
8.3	Analys av sedimentprover – SETEG-systemet.....	43
8.3.1	Kritisk bottenskuvspänning.....	44
8.3.2	Densitet.....	45
8.3.3	Erosionshastighet.....	47
8.3.4	Diskussion.....	48
8.4	Samband mellan erosionsegenskaper och geotekniska egenskaper	48
8.4.1	Erosionsbenägenhet för bottensediment i Göta älv.....	48
8.4.2	Samband mellan geotekniska egenskaper och erosionsbenägenhet i litteraturen	50
8.5	Slutsatser.....	51
9	BERÄKNING AV EROSION	52
9.1	Tillämpning av Delft3D-MOR.....	52
9.1.1	Indata till demonstrationsberäkningen.....	53
9.1.2	Demonstration av beräkning med Delft3D-MOR	53
9.2	GIS-analyser	54
9.2.1	Grundberäkning för genomförd GIS-analys.....	55
9.2.2	Resultat av GIS-analyser	57
9.3	Diskussion om beräkningsresultat.....	58
9.3.1	Osäkerheter vid erosionsberäkningar.....	58
9.3.2	Exempel på osäkerheter i indata och hur de påverkar det beräknade slutresultatets totala osäkerhet.....	59
10	BEHOV AV FORSKNING OCH UTVECKLING	60
10.1	Konceptuell förståelse för erosionsprocesserna.....	60
10.2	Metodik för provtagning och analys av bottensediment	61
10.3	Undersökning av sedimenttransport.....	61
10.4	Erosionsskydd	61
10.5	Beräkning av erosion.....	62
10.6	Fartygstrafikens effekter	62
	REFERENSER	63

Bilagor

1. Sammanställning av laboratorieundersökningar av bottensediment från Göta älv

SAMMANFATTNING

Bakgrund och syfte

I den utredning om erosionen i Göta älv som utförts inom Göta älvutredningen konstaterades tidigt att kunskapen om erosionsförhållanden i kohesionsjord är begränsade. Det har därför funnits behov av att i samarbete med svenska och internationella experter klargöra underlag och förutsättningar för beräkningar av erosionsförhållandena. En fördjupningsstudie har genomförts för att beskriva erosionsproblematiken för erosion i vattendrag med främst kohesiva sediment. I detta arbete har utförts inventering av modellverktyg, bakgrundsteorier, erforderliga indata m.m. Särskild vikt har lagts vid mekanismer och styrande parametrar/förhållanden för erosion i kohesionsjord och hur egenskaperna för dessa kan bestämmas genom fält- och laboratorieundersökningar. Dessa förhållanden diskuteras mer översiktligt medan andra förhållanden beskrivs mer detaljerat.

Denna rapport är en sammanfattning av de inventeringar och diskussioner som genomförts under utredningen av erosionen i Göta älv. Redovisningen gör inte anspråk på att behandla alla förekommande förhållanden som kan vara aktuella i motsvarande utredningar.

Mekanismer för erosion och sedimenttransport

En beskrivning görs av grundläggande mekanismer för erosion och sedimenttransport. Erosion och sedimenttransport kan studeras utifrån olika utgångspunkter. En kortfattad översiktlig beskrivning ges av några morfologiska förändringar orsakade av naturliga förlopp eller av mänsklig påverkan. Därefter redovisas mer detaljerat erosionsprocesser till följd av strömmande vatten och tillhörande hydrauliska förhållanden och materialegenskaper. Grundläggande hydraulik redovisas för förståelse av de krafter som strömmande vatten skapar mot botten samt de olika mekanismer som styr erosion i olika material.

Undersökningar och mätningar

Principer för undersökningar av erosionsförhållanden redovisas. Inledningsvis bör de processer som styr erosionen klargöras för att få en bild av de morfologiska förändringar som orsakas av naturliga processer och av påverkan från olika mänskliga aktiviteter. För beräkning av erosion och sedimenttransport behöver egenskaper hos bottensediment klargöras liksom de hydrauliska och hydrodynamiska förhållandena.

Ett lämpligt sätt att klargöra förhållanden som styr erosionen i vattendrag är att inledningsvis göra översiktliga undersökningar som underlag för mer detaljerade mätningar och undersökningar. Undersökningar i vattenområden är ofta tidskrävande och kostsamma, vilket innebär att detaljerade undersökningar bör koncentreras till de områden som är representativa för stora områden i älven.

I syfte att undersöka erosionsegenskaper hos bottensedimenten har inom Göta älvutredningen olika undersökningsmetoder föreslagits, testats och använts. Fyra metoder har studerats närmare och redovisas i rapporten. Som ett komplement till sedimentprovtagning kan akustiska metoder som skannar botten användas.

Tre olika typer av mätningar av hydrauliska förhållanden har utförts, nämligen vattenstånd, strömmar längs flera tvärsnitt och en detaljerad vertikal strömprofil vid en be-

stämmd position. Syftet med att mäta en vertikal strömhastighetsprofil har varit att främst (lokalt) validera bottenskjuvspänningarna i den hydrauliska beräkningsmodellen. Resultaten redovisas och diskuteras i rapporten.

För att undersöka och analysera erosionsegenskaperna hos bottensedimenten har utförts provtagning av sediment inom ett mindre område längs älven. Erosionsegenskaper och geotekniska egenskaper har undersökts i laboratorium och redovisas i rapporten tillsammans med en analys av uppmätta egenskaper. Resultaten från erosionsundersökningarna har analyserats för att klargöra hur de undersökta parametrarna varierar inom enskilda prov, mellan prover från samma plats och mellan olika platser samt av eventuella samband med djupet under botten.

Beräkning av erosion

Avsikten var inledningsvis att beräkna erosion med en kopplad hydrodynamisk/morfologisk beräkningsmodell (Delft3D-MOR). Med modellen kan beräknas erosion och sedimentation för en längre tidsperiod. Under tiden som modellen arbetar uppdateras bottennivån med de förändringar som erosion/sedimentation medför. Det visade sig emellertid att det inte var möjligt att inom utredningen ta fram tillräckligt detaljerat underlag för att göra sådana beräkningar. För att demonstrera användningen av beräkningsmodellen valdes därför att göra en demonstrationsberäkning med modellen i ett mindre område av Göta älv.

Förenklade beräkningar av erosionen kan även göras med GIS-analys, där bottennivåerna förblir konstanta i beräkningen även där erosion sker. I analysen används de bottenskjuvspänningar som beräknats i den hydrodynamiska modellen. Inledningsvis diskuterades två olika GIS-baserade beräkningsmetoder. Den metod som slutligen genomfördes baseras på en storskalig sedimentbudget för älven där de eroderade mängderna uppskattats för olika delsträckor. Denna metod beskrivs närmare i rapporten. Den andra metoden baseras på en jämförelse av bottennivåerna vid två olika tidpunkter. Skillnaden mellan bottennivåerna extrapoleras framåt i tiden. Extrapolationen kan dock relateras till hur bottenskjuvspänningarna förändras till följd av eventuella framtida förändrade flöden.

Det finns flera källor till osäkerhet i beräkningar av erosion, bland annat hur tillämpliga använda beräkningsformler är för de förhållanden som råder i Göta älv, antaganden i bottensedimentens egenskaper, noggrannhet i batymetriska mätningar och bottenskjuvspänningar. Detta diskuteras kortfattat i rapporten.

Behov av kunskap

Utredningen om erosionsförhållandena i Göta älv har ökat förståelsen för erosionen i älven och processer kopplade till denna samt gett underlag till en översiktlig beskrivning av erosionsförhållandena. Samtidigt har konstaterats att det erfordras ytterligare kunskap för att kunna beskriva erosionen och i synnerhet de lokala förhållandena. Med utgångspunkt från erfarenheter från utredningen av erosionsförhållandena har behov av ökad kunskap, forskning och utveckling sammanställts, primärt för erosionsförhållandena i Göta älv men som även har tillämpning på andra vattendrag.

1 BAKGRUND OCH SYFTE

I den utredning om erosionen i Göta älv som utförts inom Göta älvutredningen konstaterades tidigt att kunskapen om erosionsförhållanden i kohesionsjord är begränsad. Eftersom huvuddelen av jordmaterialet längs Göta älv består av sådan jord var det väsentligt att särskild uppmärksamhet ägnades åt denna fråga.

Det har därför funnits behov av att i samarbete med svenska och internationella experter klargöra underlag och förutsättningar för beräkningar av erosionsförhållandena. En fördjupningsstudie har därför genomförts för att beskriva erosionsproblematiken för erosion i vattendrag med främst kohesiva sediment. I detta arbete har utförts inventering av modellverktyg, bakgrundsteorier, erforderliga indata m.m. Särskild vikt har lagts vid mekanismer och styrande parametrar/förhållanden för erosion i kohesionsjord och hur egenskaperna för dessa kan bestämmas genom fält- och laboratorieundersökningar. Vissa förhållanden diskuteras mer översiktligt medan andra förhållanden beskrivs mer detaljerat.

Denna rapport är en sammanfattning av de inventeringar och diskussioner som genomförts under utredningen av erosionen i Göta älv. Redovisningen gör inte anspråk på att behandla alla förekommande förhållanden som kan vara aktuella i motsvarande utredningar.

Utredningen av erosionsförhållandena i Göta älv har genomförts med utgångspunkt från de erfarenheter som successivt vuxit fram under arbetets gång. Vissa metoder och arbetsmoment som varit önskvärda att genomföra har inte kunnat utföras på grund av begränsningar i tid och resurser medan andra valts bort där alternativ befunnits vara mer lämpliga.

2 GENOMFÖRANDE

Det underlag som redovisas i denna fördjupningsstudie har sammanställts av en arbetsgrupp med deltagare från SGI och SMHI. Arbetet har genomförts i samverkan med Deltares och Lunds tekniska högskola för att få tillgång till dessas erfarenhet. En utbildning har genomförts i användning av beräkningsprogrammet Delft3D:s (Delft hydraulics software) moduler för erosion och morfologi.

Ett led i den erosionsutredning som utförts inom Göta älvutredningen har varit att utifrån SGI:s och SMHI:s kompetensområden sammanställa en teoretisk bas som beskriver de hydrodynamiskt inducerade erosionsprocesserna i Göta älv. SGI:s uppgift har även varit att ta fram och värdera erforderliga data om bottensedimentens erosions- och materialegenskaper inklusive metoder för undersökning i fält och på laboratorium som underlag för hydrodynamiska/morfologiska modellberäkningar och GIS-analyser av erosionsförhållanden. SMHI:s uppgift har även varit att etablera, kalibrera och validera en hydrodynamisk beräkningsmodell för hela Göta älv och Nordre älv samt att modellera morfologiska processer utifrån indata och kalibrerings-/valideringsunderlag som levererats av SGI.

3 MEKANISMER VID EROSION OCH SEDIMENTTRANSPORT

Med erosion menas i följande text den erosion som till följd av strömmande vatten sker på botten och slänter i ett vattendrag. Med sedimentation eller ackumulation menas deposition på botten av tidigare suspenderat material eller material som tillförs via biflöden.

Erosionsprocesser är komplexa och beror av ett flertal naturliga processer men även av åtgärder som vidtas för bebyggelse och infrastruktur på stränder, fartygstrafik och reglering av vattenkraft.

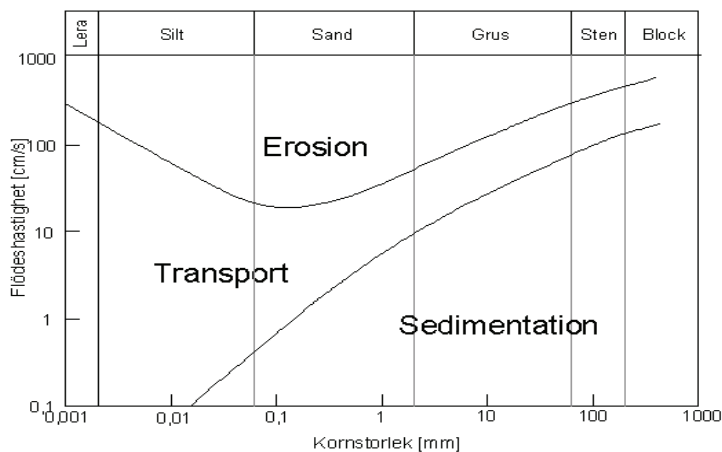
Erosion och sedimenttransport kan studeras utifrån olika utgångspunkter. I detta avsnitt ges inledningsvis en översiktlig beskrivning av några morfologiska förändringar orsakade av naturliga förlopp eller av mänsklig påverkan. Detta avsnitt är relativt kortfattat.

Därefter redovisas mer detaljerat erosionsprocesser till följd av strömmande vatten och tillhörande hydrauliska förhållanden och materialegenskaper. Grundläggande hydraulik redovisas för förståelse av de krafter som strömmande vatten skapar mot botten samt de olika mekanismer som styr erosion av kohesiva och icke-kohesiva material. Samtliga processer är i verkligheten mycket komplexa och nedanstående redovisning utgör en översiktlig beskrivning.

3.1 Erosion och bottenmaterial

Erosionsförhållandena beror av bottenmaterialets egenskaper och detta kan indelas i kohesiva och icke-kohesiva material. I kohesiva material, exempelvis lera och gyttja, hålls partiklarna främst samman av elektrokemiska krafter. Icke-kohesiva material kallas även friktionsmaterial, eftersom partiklarna hålls samman främst på grund av friktion mellan partiklarna. Exempel på friktionsmaterial är sand och grus. Silt betraktas ofta som ett mellanmaterial, vars egenskaper styrs både av friktion och kohesion mellan partiklarna. Även i ett rent kohesivt eller friktionsmaterial varierar partikelstorleken inom vissa intervall. Generellt sett är partiklarna större i friktionsmaterial och därför spelar även gravitationen en större roll.

Ett materials eroderbarhet minskar med högre friktionskrafter (större partiklar) och med högre kohesionskrafter (mindre partiklar). Detta medför att det är de mellanstora partiklarna, företrädesvis i intervallet mellan grovsilt och mellansand, som är mest känsliga för erosion. Detta visas i Hjulströms diagram, se Figur 3-1. Av diagrammet framgår att de riktigt små partiklarna, som i lera och finsilt, inte sedimenterar ens vid låga flöden.



Figur 3-1. Förutsättningar för erosion, transport och sedimentation vid olika flöden och jordarter (efter Hjulström, 1935).

I Göta älv består bottenmaterialet ofta av en blandning av kohesiva och icke-kohesiva sediment. Huvudsakligen förekommer glacial lera, som ofta täcks av yttligare skikt av postglacial lera och gytta samt tunna lager av sand och grus.

När sediment eroderats transporteras dessa längs med älven på olika sätt, vilket beskrivs närmare i kapitel 3.6.

3.2 Morfologi och erosionsprocesser i Göta älv

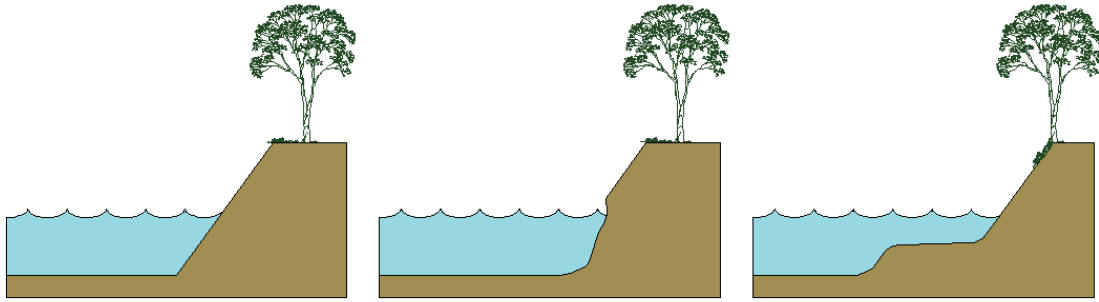
I ett vattendrag som Göta älv har det strömmande vattnet störst inverkan på erosionen. Dessutom finns andra processer som påverkar erosionen, bland annat genom att friktionsmaterial (sand och grus) som transporteras längs älvens botten nöter på underliggande lera och silt, så kallad korrasion. Detta innebär kortfattat att denna nötning får leran att gå i suspension vid bottenskjuvspänningar som är lägre än den kritiska bottenskjuvspänningen för själva lermaterialet. Korrasion är en mycket komplicerad process och en studie av korrasionsprocessen ligger utanför ramarna för denna utredning.

I de följande kapitlen beskrivs detaljerat den strömningsinducerade erosionen i såväl friktions- som kohesionsjord. Innan dess redogörs dock översiktligt för andra förlopp som mer eller mindre omfattande också påverkar älvens morfologi.

3.2.1 Erosion och släntstabilitet

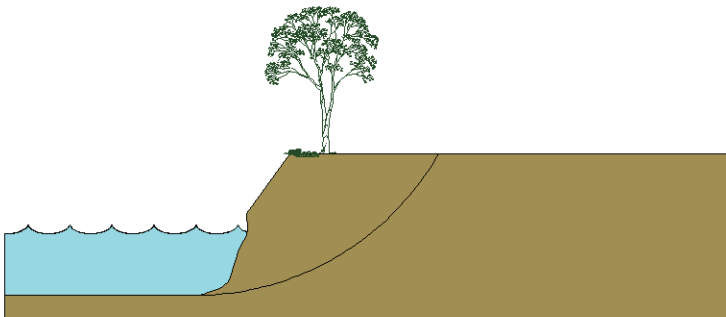
Erosion i strömfåran orsakad av strömmade vatten kan inducera ras och skred även i undervattenslänter och ovan vattenytan. Om naturliga processer får verka i en erosionsjord kommer denna att ställa in sig i sin friktionsvinkel. Denna vinkel beror av jordart och lagringstäthet och kan normalt anges till ca 26-33 grader för silt och ca 35-45 grader för morän (Larsson, 2009). Om material från släntfoten eroderar kommer slänten att bli brantare, varpå ras sker till dess att friktionsvinkeln uppnås och slänten åter befinner sig i jämvikt. På detta sätt kommer slänten, när ytterligare erosion sker i släntfoten, att parallellförflyttas bakåt in mot stranden. Det utrasade materialet (som också kan ha eroderat till följd av t.ex. tjäle och nederbörd) avsätts vid släntfoten. Om vattenhastigheten är så låg att materialet sedimenterar bildas ett strandplan, vilket man kan se på många sträckor längs Göta älv. Om vattenhastigheten är tillräckligt hög förs materialet ned-

ströms och erosionen i släntfoten fortgår. En illustration av erosionsförloppet visas i Figur 3-2.



Figur 3-2. Erosion av slänt i friktionsjord i vattendrag. Initialt befinner sig slänten i jämvikt och står i friktionsvinkel (t.v.). När släntfoten eroderas bort av vågorna (mitten) blir slänten brantare och materialet längre upp i slänten faller ner. På så sätt står slänten åter i sin rasvinkel men parallellförflyttad inåt land (t.h.).

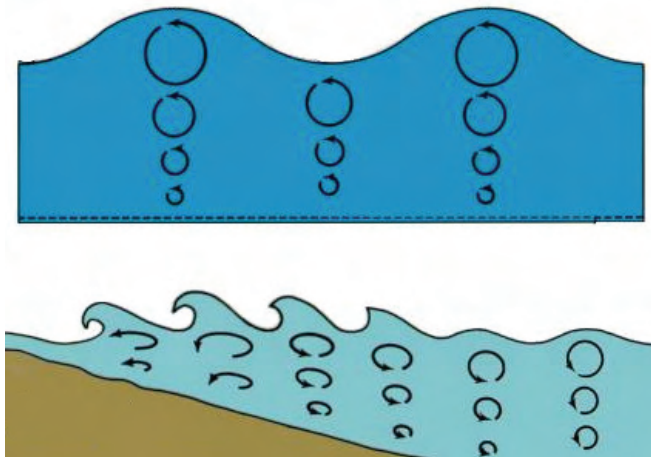
I kohesionsjord kan erosion även orsaka stabilitetsproblem och skred. En slänt i lera eller silt går till brott om den pådrivande kraften överstiger den mothållande kraften. Detta brukar uttryckas som att om säkerhetsfaktorn $F = \tau_f / \tau_{mob} < 1$, där τ_f är skjuvhållfasthetens medelvärde utefter en tänkt glidyta och τ_{mob} är motsvarande mobiliserade skjuvspänning. Vid erosion i släntfot eller djupfåra kommer den massa som håller emot att minska varpå det finns en risk att den påtryckande kraften dominerar och ett skred uppkommer, se Figur 3-3.



Figur 3-3. Erosion i kohesionsjord orsakad av vågor. Då släntfoten eroderas finns förutsättningar för att en glidyta uppkommer, här illustrerad av cirkelsegmentet.

3.2.2 Vågors mekanism och eroderande verkan

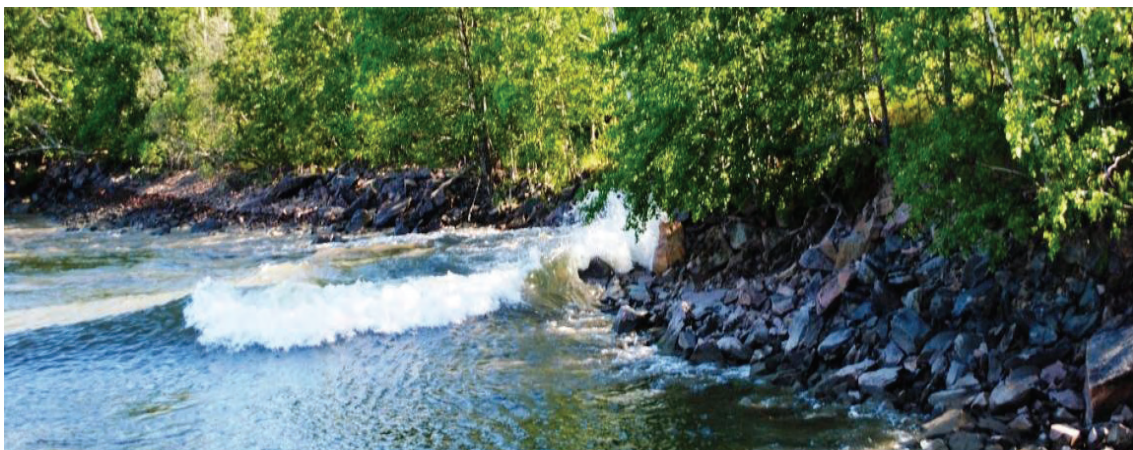
Längs med framförallt kuster och sjöstränder kan den våginitierade erosionen vara av stor betydelse. På en vattenyta med lång stryklängd (fetch) bygger vinden upp vågor som när de rullar in mot land eroderar strandzonen i en process som kallas för abrasion. En våg som transporteras framåt består egentligen av oscillerande partiklar, se Figur 3-4. När det blir tillräckligt grunt överskrider vattenpartiklarnas hastighet vågens utbredningshastighet, vilket leder till att vågformen kollapsar och vågen bryter. Den brutna vågen kommer sedan att utsättas för stark turbulens och sköljer upp på stranden innan den avstannar och den rinner tillbaka. Den vågpåverkade zonen kan indelas i tre huvudområden: grundvattenzonen (till ett djup av cirka halva våglängden) där det är tillräckligt grunt för att botten ska påverkas av vågrörelsen, bränningszonen där vågen bryter och slutligen svallzonen där den brutna vågen utsätts för turbulens.



Figur 3-4. Vågor byggs upp av oscillerande rörelser och vid grundare vatten bryts vågen (efter <http://academic.keystone.edu>, november 2011).

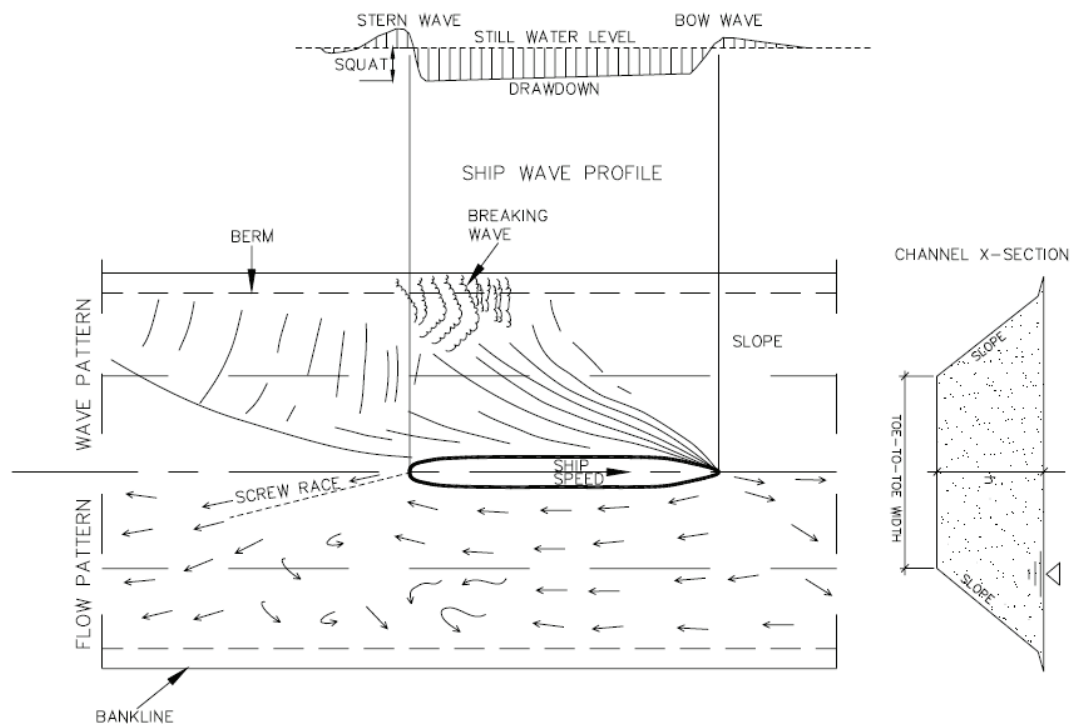
I ett vattendrag är stryklängden oftast liten och vindgenererade vågor kan i stort sett endast uppstå om vindens riktning sammanfaller med vattendragets längdriktning. Även i detta fall blir dock vågorna mindre än med samma stryklängd på en bredare vattenyta. Sundborg och Norrman (1963) konstaterade att vid en vindhastighet av 12 m/s i älvens längdriktning vid dess längsta raka sträcka uppgår våghöjden till 0,3 m. För en fördubblad våghöjd krävs en vindhastighet av 18 m/s.

I Göta älv har sannolikt de fartygsgenererade vågorna större effekt för erosionen och då inte bara i strandzonen utan också i djupfåran. Althage (2010) studerade vågor genererade vid 17 fartygspassager i Göta älv och observerade våghöjder på upp till drygt 0,6 m. Detta betyder att i Göta älv genererar fartyg regelbundet vågor med samma höjd som vindar med kulingstyrka under ideala förhållanden, se Figur 3-5.



Figur 3-5. Fartygsgenererade vågor vid Göta älv (Althage, 2010).

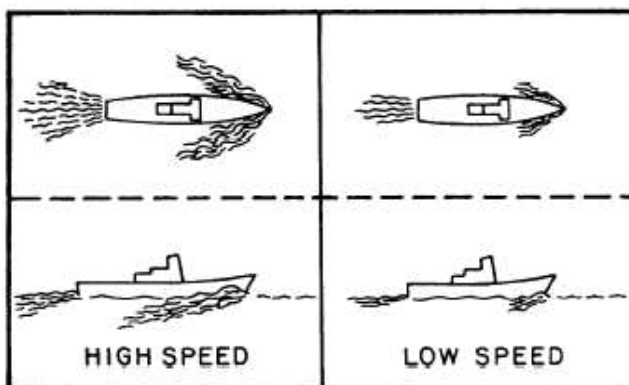
Ett fartyg orsakar strömningar genom förträngning av vattenmassan samt genom att propellern som driver fartyget framåt skjuter en vattenstråle bakåt. Förträngningen av vattenmassan genererar en divergerande bogvåg, en avsänkning av vattenytan längs fartygets skrov samt en divergerande aktervåg, se Figur 3-6. Till detta bildas bakom fartyget bakåtriktade transversella vågor. När fartyget färdas i ett smalt vattendrag eller i en kanal är utrymmet för den undantryckta vattenmassan begränsat och vågorna blir högre än vad de skulle bli på en fri vattenyta.



Figur 3-6. Våg- och flödesmönster då ett fartyg passerar genom ett smalt vattendrag eller en kanal (US Army Corps of Engineers, 2006).

Althage (2010) observerade en markant ökad turbiditet efter fartygspassage i Göta älv. Sannolikt kan detta vara en följd av att ytliga och lösa sediment rörs upp och kommer i suspension men som åter sedimenterar när fartyget passerat.

Fartygets påverkan på omgivningen är starkt beroende av dess hastighet. Vågornas utbredning i såväl plan som på djupet ökar med en ökad hastighet, se Figur 3-7. Vidare medför en högre hastighet en kraftigare propellerström och effekten förstärks av att fartyget då ligger djupare i vattnet så att avståndet till älvbotten minskar.



Figur 3-7. En ökad hastighet ger en större vågutbredning i såväl plan- som i djupled (efter <http://www.tpub.com>, november 2011)

Sedan 1970-talet är strandskoning utlagd längs stora delar av Göta älvs stränder och erosion i strandzonen till följd av vågor bedöms därför ha minskat i betydelse. Strandskoningens status och utbredning under vattenytan är dock okänd och det kan antas att erosionen här fortgår i samma omfattning som tidigare.

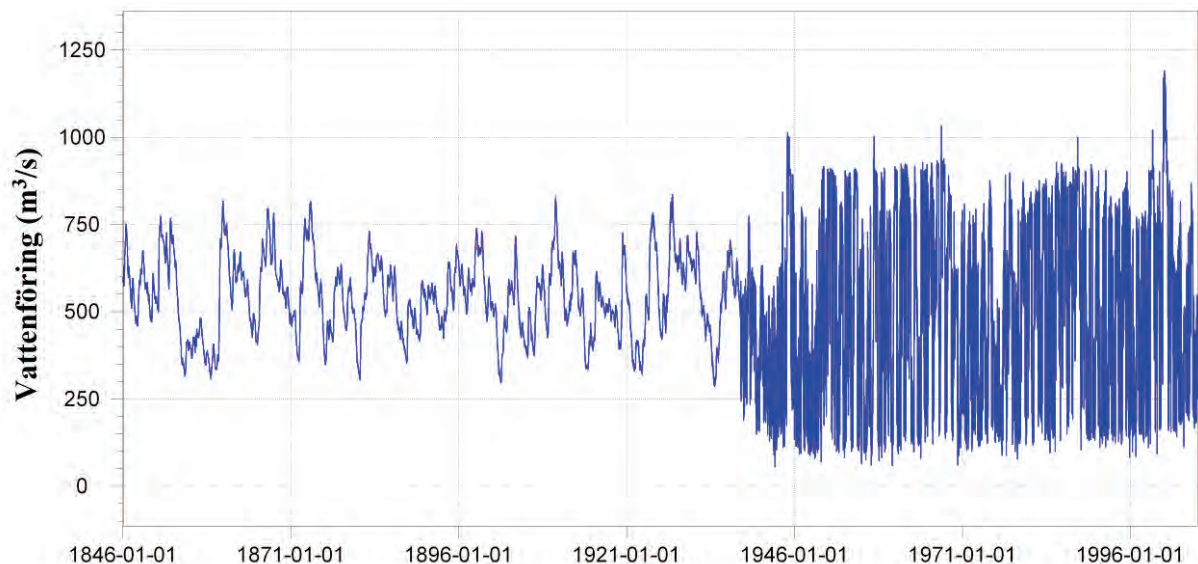
En utförligare redovisning av teori om mekanismer bakom fartygsgenererade vågor och deras konsekvenser i Göta älv hänvisas till Althage (2010).

3.2.3 Vattenreglering

Vattenkraften står idag för nästan hälften av Sveriges energiförsörjning och ca 85 % av de svenska vattendragen är utbyggda med vattenkraft. Under år 2000 producerades i Göta älv 2 TWh (IVA, 2002), vilket är ca 3 % av den svenska vattenkraftproduktionen.

Gällande vattendom i Vänern och Göta älv tillkom 1937 och den beskriver hur flödet ska regleras utifrån dämmnings- och sänkningsgränser. Vattendomen medförde kraftigt ändrade flödesmönster i Göta älv, se Figur 3-8, med såväl högre som lägre tappningar men framförallt med dygnsreglering.

Klimatanalysen för Göta älv indikerar högre flöden till följd av framtida klimatförändringar. Detta kommer att påverka tappningsstrategier för kraftverken längs älven men det finns inte underlag idag för att beskriva konsekvenser av en sådan förändrad tappning.



Figur 3-8. Vattenföring i m³/s vid Vänerns utlopp (Vargöns kraftverk) under perioden 1846-2005. (Bergström et al., 2011)

Vid en snabb ändring av vattenföringen bildas vågor som från kraftstationen fortplantas såväl uppströms som nedströms. Storleken på vågorna och deras fortplantningshastighet är beroende av vattenhastigheten, flödesförändringen och älvens geometri. I Göta älv bedöms sådana vågor inte vara tillräckligt stora för att ha någon avgörande betydelse för erosionen (Larsen, 1996). Vidare kan en snabb sänkning av vattenståndet medföra en gradient från grundvattenytan i slänter som då ligger högre än vattennivån i älven och erosion uppstår genom att finmaterial förs ut från slänterna. Det eroderade materialet förs ut i djupfåran där det sedimenterar eller förs vidare nedströms.

Larsen (1995) bedömer att regleringens påverkan på Göta älv har en, i jämförelse med fartygstrafiken, försumbar påverkan på erosionen i älven.

3.3 Strömmande vatten och dess interaktion med botten

Syftet med följande avsnitt är att ge en bakgrund till hydrodynamiska termer som exempelvis turbulens och bottenskjuvspänning samt att ge en generell förståelse för hur bottenmaterialet påverkas av dessa.

En botten börjar erodera när de hydrodynamiska krafterna mot botten, dvs. bottenskjuvspänningen, övergår ett visst tröskelvärde. Detta tröskelvärde kallas *kritisk bottenskjuvspänning*.

3.3.1 Turbulens

Naturligt strömmande vatten är i regel turbulent, vilket innebär att det karaktäriseras av virvelbildning. De turbulenta virvlarna är mer eller mindre oregelbundna strömmönster där både strömhastigheter och strömriktningar varierar starkt i både tid och rum. När man beskriver hur det strömmar i ett vattendrag är det därför oftast nödvändigt att använda sig av ett statistisk synsätt. Det enklaste sättet att statistiskt beskriva strömmarna i ett vattendrag som Göta älv är att definiera medelströmhastigheten som tidsmedelvärdet av strömhastigheten i en punkt. Alla fluktuationer omkring detta värde definieras därefter som turbulens.

För att mäta medelströmhastigheten i en punkt är det nödvändigt att flödet är stationärt, dvs. att strömhastighetens statistiska egenskaper (medelvärde och standardavvikelse från medelvärdet m.m.) inte förändras i tiden. I praktiken innebär detta att tappningen och vattennivån inte får förändras under den tid mätningarna görs. Vid beräkningar är medelströmhastigheten däremot en variabel som tillåts förändras i tiden, eftersom effekten av den turbulenta delen av hastighetsfältet approximeras med hjälp av en (matematisk) s.k. turbulensmodell (vid beräkningar/modellering av instationära förlopp anses den resulterande medelströmhastigheten beskriva medelvärdet av de strömhastigheter som ryms inom en ruta av beräkningsnätet under ett tidssteg i beräkningen.)

Medelströmhastigheterna i ett vattendrag som Göta älv bestäms främst av tappningen och arean av (de våta) tvärsektionerna, men lokalt även av krökar och variationer av djupet, ojämnheter på botten m.m. Den turbulenta delen av hastighetsfältet, dvs. de temporära avvikelserna från medelströmhastigheten i varje punkt, kan ofta variera omkring $\pm 50\%$ relativt medelströmhastigheten. Dessa temporära fluktuationer har tidsskalor på allt ifrån millisekunder till flera minuter, där de största tidsskalorna kan antas vara proportionella mot vattendragets bredd eller djup dividerat med medelströmhastigheten. För Göta älv innebär detta turbulenta tidsskalor i storleksordningen minuter. Variationen i rummet är i princip lika stor som variationen i tiden, eftersom turbulenta strukturer (virvlar) kontinuerligt transporteras med strömmen till nya områden.

3.3.2 Strömförluster

De totala strömförlusterna (energiförluster) mellan två punkter i ett vattendrag kan beskrivas av skillnaden i vattennivå mellan dessa punkter. Varje gång vattnet tvingas att ändra riktning eller hastighet förloras energi, vilket leder till att vattenytan lutar mot utloppet. Strömförluster uppstår även på grund av friktion mot bottenmaterialet. Det är främst denna friktion som på sikt leder till erosion av bottenmaterialet. En djupare diskussion av detta förs i avsnitt 3.3.3.

Om det inte vore för strömförluster skulle strömhastigheterna vara proportionella mot tappningen. På grund av förlusterna måste skillnaden i vattennivån mellan inlopp och

utlopp dock öka vid högre tappningar, vilket leder till att strömhastigheterna, i medeltal, blir lägre än de hade varit ifall tvärsnittsareorna hade varit oförändrade. Däremot kan strömriktningarna i många fall se likartade ut vid olika tappningar och tenderar att variera mindre mellan olika tappningar ju högre tappningen är. De lokala strömriktningarna beror starkt av det så kallade Reynoldstalet, som är proportionellt mot tappningen i älven, men beroendet blir svagare ju högre Reynoldstalet är.

3.3.3 Friktion mot botten

När vatten strömmar över botten bildas en gradient av strömhastigheten, eftersom strömhastigheten vid själva botten är noll. Att strömhastigheten är noll vid botten beror på friktionskraften mellan vattnet och botten. Friktionskraften är proportionell mot strömhastighetens gradient vid botten och vattnets viskositet. Storleken på gradienten beror främst på hur snabbt det strömmar, men även på hur ojämn botten är. En ojämn botten leder till mer turbulens och högre friktion. En vegetationsbevuxen botten leder oftast till större strömförluster än en utan vegetation. De bottennära strömmarna bromsas emellertid upp när de strömmar genom växtligheten, vilket leder till lägre friktion mot själva bottenmaterialet än ifall botten hade varit utan vegetation. På så sätt skyddar växtlighet mot erosion och dessutom kan växternas rötter fungera som en slags armering av bottenmaterialet. I modelleringssammanhang används olika sätt att statistiskt beskriva bottenens ojämnheter, exempelvis *Mannings tal*,

$$n = [18/H^{1/6} \log_{10}(12H / (30z_0))]^{-1},$$

där H är det lokala djupet, och z_0 är tjockleken av den undanträngda delen av det s.k. gränsskiktet (se vidare avsnitt 3.3.5). Storheten z_0 kan relateras till den *ekvivalenta sandråheten*, $k_s = 30 z_0$.

3.3.4 Bottenskjuvspänning

En av de avgörande parametrarna i erosionssammanhang är den så kallade bottenskjuvspänningen, som definieras som friktionskraften mot botten räknat per ytenhet. Bottenskjuvspänningen brukar betecknas med den grekiska symbolen τ_w , där nedsänkt w står för *wall*, och definieras matematiskt som

$$\tau_w(x, y, t) \equiv \mu \partial U / \partial z|_{z=0},$$

där μ är vattnets viskositet, U är strömhastigheten, z är avståndet från botten och $\partial U / \partial z|_{z=0}$ är strömhastighetens gradient precis intill botten (White, 2003). Funktionen τ_w varierar generellt sett både i tiden (t) och över botten (i definitionen ovan har det antagits att botten ligger i xy -planet och att z -axeln är riktad i bottenens normalriktning).

Att det strömmande vattnet är turbulent påverkar i allra högsta grad bottenskjuvspänningen, eftersom hydrodynamiska krafter generellt sett ökar kvadratisk med strömhastigheterna. Detta innebär att, ifall hastigheterna ökar med en faktor två, ökar krafterna mot botten (och därmed även bottenskjuvspänningen) med en faktor fyra. Ifall de turbulenta fluktuationerna varierar i tiden med exempelvis $\pm 50\%$ relativt medelflödet, varierar de temporära bottenskjuvspänningarna följaktligen mellan $0,5^2 = 0,25$ och $1,5^2 = 2,25$ gånger sitt tidsmedelvärde. Observera att vid en given konstant medelströmhastighet kan bottenskjuvspänningen stundtals uppgå till mer än sitt dubbla tidsmedelvärde. Graden av turbulens har därigenom en påtaglig inverkan på erosionsförloppet.

3.3.5 Modellering av friktionskrafter

I praktiken är det omöjligt att i detalj beskriva turbulent strömmande vatten. Istället utgår man ifrån ett statistiskt betraktelsesätt. I detta arbete fokuseras på stationära flöden och på tidsmedelvärdet av strömhastigheterna i varje punkt. Allt som avviker från tidsmedelvärdet kallas turbulens, vars inverkan på den tidsmedelvärderade strömningen modelleras med hjälp av en turbulensmodell. Detta betyder även att variationerna i rummet enbart beskrivs utifrån medelströmhastigheten i varje punkt. Vidare kan hastighetsgradienten vid botten inte beskrivas i detalj utan modelleras med en s.k. väggfunktion, dvs. en funktion som beskriver hastighetsgradientens lokala medelvärde vid botten. Bottenskjuvspänningen definieras då istället som

$$\tau_w(x,y) \equiv \rho_v u_\tau^2,$$

där u_τ kallas friktionshastigheten och ρ_v är vattnets densitet (i definitionen ovan har antagits att botten ligger i xy-planet). Friktionshastigheten beräknas i sin tur genom antagandet av att hastighetens variation med avståndet från botten kan beskrivas av ett s.k. *logaritmiskt gränsskikt*,

$$U/u_\tau = 1/\kappa \log(z/z_0),$$

där z_0 är ett mått på botten ojämnheter och $\kappa \approx 0,4$ är en empiriskt bestämd konstant.

Ett gränsskikt är den del av vattenmassan som påverkas av bottenfriktion, dvs. där det finns en bottenfriktionsinducerad hastighetsgradient. Ofta sträcker sig gränsskiktet ända upp till vattenytan, även om gradienterna blir gradvis lägre med ökat avstånd från botten.

För en rak kanal med (storskaligt) jämn och vegetationsfri botten gäller antagandet om en logaritmiskt varierande strömhastighet nästintill exakt för alla rimliga värden på ytråheten. För naturliga vattendrag anses den vara en mycket god approximation så länge vattendragen är relativt raka, botten är ren (dvs. obeväxt) och strömningen karaktäriseras av fullt utvecklad turbulens. Modellen Delft3D (se avsnitt 4), som har använts för de hydrauliska beräkningarna, använder alltid ansatsen av en logaritmiskt varierande hastighetsprofil för de beräkningsceller som ligger närmast botten.

3.4 Erosion av friktionsmaterial

Med ett *friktionsmaterial* menas ett material vars ingående partiklar inte påverkar varandra på annat sätt än genom friktion.

Eroderat material transporteras på två sätt, antingen genom transport från botten till det strömmande vattnet, dvs. genom att gå i suspension, eller genom att rulla längs botten, s.k. bottentransport (*eng: bed load*), jfr kapitel 3.6. Ju högre bottenskjuvspänningen är och ju mer turbulent gränsskiktet är desto större partiklar kan lyftas upp av det strömmande vattnet och gå i suspension. De partiklar som är för stora (tunga) för att gå i suspension kan rulla utmed botten medan de som är alltför tunga för att rubbas av det strömmande vattnet ligger kvar. På så sätt kan man säga att det strömmande vattnet sorterar materialet, eftersom det skiljer mindre partiklar från större. Med tiden kan detta innebära att bottnar i trånga sektioner av ett vattendrag karaktäriseras av material med större partikelstorlekar än bredare sektioner.

När vatten strömmar över en slät botten uppstår friktionskrafter. Kraften på varje bottenpartikel kan delas upp i en dragkraft och en lyftkraft. Om dragkraften är tillräckligt

stor rullar partikeln längs botten och om lyftkraften är tillräckligt stor går partikeln i suspension. Så fort partikeln har lyfts från botten och dras med i strömmen försvinner i princip båda krafterna eftersom strömhastigheten relativt partikeln blir mycket liten. Detta gör att partikeln direkt sjunker ner mot botten igen med en sjunkhastighet (w_s) som är proportionell mot partikelstorleken (diametern, D) i kvadrat. En sandpartikel som lyfts någon decimeter från botten kan ha sjunkit tillbaka redan efter någon sekund, där den återigen kan påverkas av lyftkrafter från det strömmande vattnet. Partikeln har då förflyttats nedströms. På detta sätt kommer tillräckligt små icke-kohesiva partiklar att studsas fram längs botten. Fenomenet kallas *saltation*.

Partiklar som är för stora och tunga för att gå i suspension kan på grund av dragkrafterna fortfarande rulla längs botten. Detta sker ofta tillsammans med många andra partiklar i sandbankar som rör sig nedströms.

3.4.1 Rouse tal och Stokes' lag

Som tumregel kan *Rouse tal* och *Stokes' lag* användas för att avgöra vilken typ av sedimenttransport som dominerar – förutsatt att krafterna från det strömmande vattnet är kända. Rouse tal definieras som kvoten av sjunkhastigheten w_s och κu_τ , där den sistnämnda storheten kan ses som är ett mått på stighastigheten på grund av lyftkraften:

$$Ro = w_s / (\kappa u_\tau)$$

(Observera att det i regel är nödvändigt att anta ett logaritmisk gränsskikt för att kunna beräkna friktionshastigheten u_τ , och därigenom Rouse tal.)

Sjunkhastigheten för mycket små partiklar kan beräknas från Stokes' lag, som beskriver den högsta sjunkhastighet som en liten partikel kan nå i en vätska innan gravitationen balanseras av visköst motstånd (friktion). Lagen skrivs

$$w_s = (\rho_p - \rho_v) g D^2 / 18 \mu.$$

Här står ρ_p för partikelns densitet, ρ_v för vattnets densitet och μ är vattnets dynamiska viskositet. Stokes' lag innebär exempelvis att en partikel med en diameter på 200 μm (mycket fin sand) kan sjunka med en hastighet av ca 2 – 3,5 cm/s (antaget en specifik densitet av en sandpartikel på $\rho_p = 2650 \text{ kg} / \text{m}^3$ och att vattentemperaturen kan variera mellan 0 och 20 °C, vilket påverkar viskositeten). Vid $Ro < 0,8$ transporteras i princip allt material i suspenderad form och är då endast tillfälligtvis kontakt med botten. Vid $Ro > 2,5$ eller högre så rullar materialet längs botten. Vid $Ro \approx 1,2$ sker ungefär ena hälften av sedimenttransporten i suspenderad form medan andra hälften av sedimenttransporten sker genom att sanden rullar längs botten (Hearn, 2008).

Observera att Rouse tal inte kan användas för att uppskatta ifall det sker erosion utan endast för att uppskatta vilken typ av sedimenttransport som dominerar.

3.4.2 Kritisk bottenskjuvspänning för friktionsmaterial

För att uppskatta vid vilken bottenskjuvspänning ett finkornigt friktionsmaterial börjar röra på sig kan man använda sig av de empiriskt framtagna formlerna (van Rijn, 2007)

$$\tau_c = 0,115(D^*)^{-0.5}, \text{ om } D^* < 4$$

och

$$\tau_c = 0,14(D^*)^{-0.64}, \text{ om } 4 < D^* < 10$$

där D^* är en dimensionslös partikelstorlek, definierad som

$$D^* = d_{50}[(\rho_p / \rho_v - 1) g / v^2]^{1/3}$$

För en finsand där partiklarna har en mediandiameter $D_{50} = 200 \mu\text{m}$ ($D^* = 3,42$) sker detta vid en kritisk bottenskjuvspänning på $\tau_c \approx 0,06 \text{ Pa}$. I det fall mediandiametern är $500 \mu\text{m}$ ($D^* = 8,55$) är den kritiska bottenskjuvspänningen $\tau_c \approx 0,04 \text{ Pa}$.

3.5 Erosion av kohesionsmaterial

Fysiken för erosion av kohesiva material är mycket mer komplex än fysiken för icke-kohesiva material. Styrkan av de elektrokemiska krafter som håller samman partiklarna är mycket svår att förutsäga och måste därför bestämmas empiriskt för varje enskilt fall som studeras. De kan även bero på vattnets kemi, exempelvis saltinnehåll.

Det finns inga generellt vedertagna kvantitativa samband mellan ett kohesivt materials erosionsegenskaper och dess geotekniska egenskaper. En litteraturinventering där sådana samband undersökts redovisas i kapitel 8.4.

3.5.1 Kritisk bottenskjuvspänning för kohesiva material

När en partikel i ett kohesivt material lossnar från botten går den direkt i suspension, vilket beror på att när de elektrokemiska sammanhållande krafterna övervunnits är bottenskjuvspänningen så pass hög att partiklarna inte längre kan rulla längs botten. Samma partikelstorlekar i ett icke-kohesivt material hade börjat rulla längs botten redan vid en mycket lägre bottenskjuvspänning.

Om en partikel av ett kohesivt material väl kommit i suspension färdas det relativt långt. Den har förvisso en sjunkhastighet, men fastnar inte på botten igen, såvida inte den lokala bottenskjuvspänningen understiger en viss *kritisk bottenskjuvspänning för sedimentation*, $\tau_{c,s}$. Detta beror på att när partiklarna sjunker till botten så är de inte konsoliderade på samma sätt som de var innan de lossnade från botten. Ifall den lokala bottenskjuvspänningen är högre än den kritiska bottenskjuvspänningen för sedimentation, kommer en landande partikel omedelbart att lossna från botten igen.

Den kritiska bottenskjuvspänning som måste underskridas för att sedimentation ska inträffa är nödvändigtvis lägre än den kritiska bottenskjuvspänningen för erosion (τ_c). En vanlig modell för att beskriva detta matematiskt är

$$D' = w_s c_b (1 - \tau / \tau_{c,s}) \text{ om } \tau < \tau_{c,s}, \quad D' = 0 \text{ om } \tau > \tau_{c,s},$$

där D' är depositionshastigheten med enheten $[\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}]$, och c_b är sedimentkoncentrationen nära botten $[\text{kg/m}^3]$ (Chao et al., 2008).

Om bottenskjuvspänningen ligger i intervallet $\tau_{c,s} < \tau < \tau_c$, där τ_c är den kritiska bottenskjuvspänningen för erosion, händer följaktligen ingenting med det upplösta och ligande kohesiva bottenmaterialet – det vare sig eroderar eller sedimenterar.

3.5.2 Modellering av erosion av kohesiva sediment

Som en direkt följd av komplexiteten av ett kohesivt materials erosionsegenskaper tvingas man att förlita sig till en högre grad av empiri. Främst måste den kritiska bottenskjuvspänningen för erosion (hädanefter benämnd som ”den kritiska bottenskjuvspänningen” eller som τ_c) bestämmas experimentellt för varje typ av material som ligger på

botten. Dessutom måste själva erosionshastigheten, dvs. hur snabbt materialet fortsätter att brytas upp när väl den kritiska bottenskjuvspänningen är nådd, bestämmas experimentellt. Erosionshastigheten beror generellt sett på bottenskjuvspänningen och graden av turbulens samt sedimentets sammansättning, beväxning m.m. Trots, eller på grund av, att den fysikaliska komplexiteten och osäkerheterna i bestämmandet av nödvändiga parametrar är så stora, brukar en enkel linjär modell användas för att modellera erosion av kohesiva sediment, nämligen *Partheniades – Krone's formel*:

$$E = M(\tau/\tau_c - 1) \text{ om } \tau > \tau_c, E = 0 \text{ om } \tau < \tau_c,$$

där E är erosionshastigheten med enhet $[\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}]$ och M är en empirisk ”konstant”, i.e. förändringen av erosionshastigheten då bottenskjuvspänningen ökar relativt den kritiska bottenskjuvspänningen (Chao et al., 2008). Det är mycket svårt att uppskatta ett värde på M , variationen av denna parameter är ofta mycket större än variationen av den kritiska bottenskjuvspänningen, τ_c . Den kan dock räknas fram om man samtidigt mäter erosionshastigheten och den kritiska bottenskjuvspänningen.

Observera att den matematiska modellen för erosionshastigheten E (Partheniades – Krone's formel) är mycket enkel och inte kan förväntas beskriva en komplicerad verklighet korrekt. Det finns exempelvis inget som säger att erosionshastigheten av ett kohesivt material generellt sett ökar linjärt med ökad bottenskjuvspänning; sambandet kan lika gärna vara kvadratisk eller variera på helt olika sätt i olika intervall av pålagda bottenskjuvspänningar. En linjär modell kan i regel bara förväntas ge realistiska resultat om den används i situationer som ligger nära de situationer som de har kalibrerats för.

3.6 Sedimenttransport

Transporten av sediment i Göta älv har undersökts i en särskild utredning (Göransson et al., 2011). Sediment kan transporteras i vatten på fyra olika sätt:

Transport av utspolat material (eng. wash load). Materialet utgörs av suspenderade partiklar som bärs med vattnet och beskriver inflödet av fina partiklar (silt- och lerfraktion) i suspension. Materialet fördelar sig jämnt i vattenmassan genom turbulent omblandning men interagerar inte med botten utan håller sig i suspension.

Transport av suspenderat material (eng. suspended load). Avser suspenderat material i vattenkolumnen och inkluderar även utspolat material, dock ingår inte bottentransport. Det suspenderade materialet utgörs av sedimentpartiklar som sedimenterar tillräckligt långsamt för att hållas i rörelse med det rinnande vattnet genom att röra vid, inte röra vid eller periodvis röra vid älvbotten/-kanten. Sådant suspenderat material utgörs vanligen av sand, silt eller lera.

Bottentransport (eng. bed load). Material som rör sig längs botten genom saltation, rullning eller att det glider. Materialet utgörs främst av friktionsmaterial.

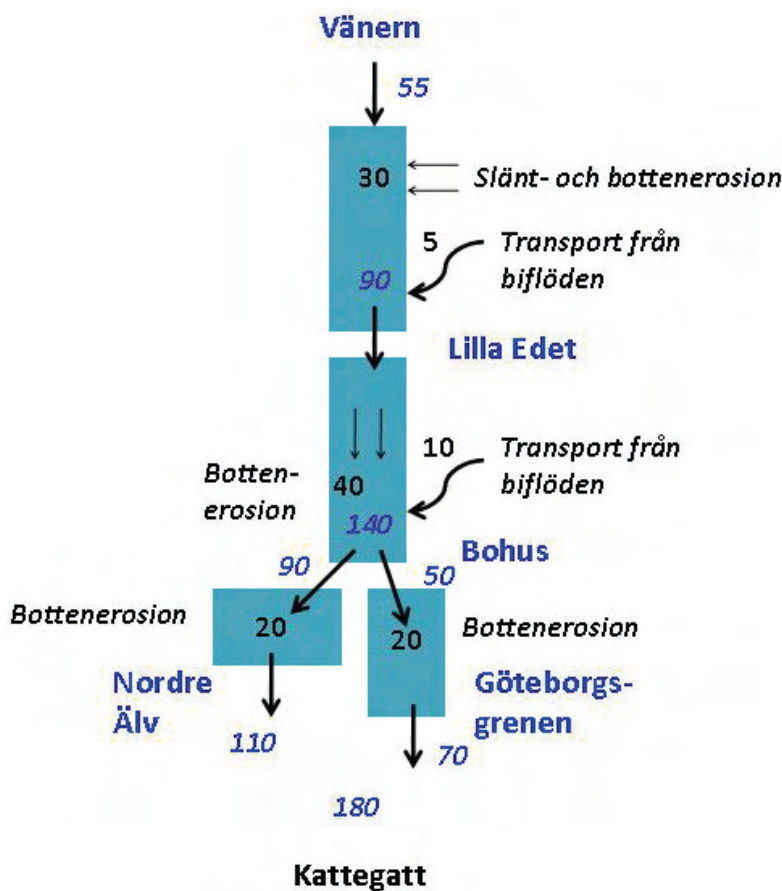
Transport av lösta ämnen (eng. dissolved load). Avser material som transporteras genom att de är lösta i vattnet, t.ex. joner. Denna del är betydligt mindre än det suspenderade partiklarna, även om det inte alltid är så. Lösta ämnen utgör ändå en betydande andel av den totala vattenmassan.

I ett vattendrag förekommer normalt alla dessa typer av sedimenttransport men med olika storlek beroende på platsspecifika egenskaper. Generellt transporteras den största mängden fluviala sediment under tillfälliga flödestoppar och är då främst ett resultat av bankerosion. Studier visar också på tydlig korrelation mellan mängd suspenderat partikulärt material och flöde. Detta förhållande kan dock antas vara annorlunda för ett hårt reglerat vattendrag som Göta älv, som dessutom har sin början i utloppet från ett stort utjämningsmagasin som Vänern utgör.

3.6.1 Sedimentbudget

En samlad värdering av erosion, transport och sedimentation av material längs ett vattendrag kan med fördel redovisas i en sedimentbudget. Sedimentbudgeten visar omfattning och fördelning av de sediment som transporteras vid inloppet till vattendraget, längs olika delsträckor och total mängd som når utloppet.

För Göta älv har en sådan sedimentbudget upprättats, se Figur 3-9. De valda mängderna i sedimentbudgeten nedan har värderats utifrån tidigare utredningar och kompletterande analyser och bedömningar inom Göta älvutredningen, främst med utgångspunkt från bottenivåförändringar, sedimenttransport och beräkningar av erosion. Mängden suspenderat material varierar längs älven såväl i längsled som i tvärled. Dessutom inverkar de lokala förhållandena, tillförsel av sediment från biflöden, fartygstrafik och nederbördsförhållanden. De mängder sediment som muddras i vattendraget kan också ge information om sedimenttransporten.



Figur 3-9. Transport av sediment längs Göta älv i kton/år för dagens förhållanden. BeräkningsmodelleN Delft3D

4 BERÄKNINGSMODELLEN DELFT 3D

Nedan beskrivs modellen Delft3D och den tilläggsmodul (MOR) som kan används för att beräkna erosion och sedimentation, vilken indata som behövs för att kunna göra morfologiska beräkningar samt hur kalibrering och validering av modellen skulle kunna utföras (Deltares (2011)).

4.1 Modellbeskrivning

En förutsättning för att kunna göra morfologiska beräkningar är att det etableras en väl kalibrerad och validerad hydrodynamisk modell över området, vilket har gjorts för Göta älv. För mer information om den hydrodynamiska modellen hänvisas till Åström et al., (2011). Modellen arbetar i ett beräkningsnät som för Göta älv valts till 30 m x 10 m och beräknar strömmar, vattennivåer och bottenskjuvspänningar. I kombination med modulen MOR (Morphology) kan erosion och sedimentation i älven beräknas för en längre tidsperiod. Delft3D-MOR beräknar sedimenttransport, både suspenderad transport och då materialet rullar längs botten, och de förändringar av bottennivån som detta medför, för ett godtyckligt antal olika kohesiva och icke-kohesiva sediment. Under tiden som modellen arbetar uppdateras bottennivån med de förändringar som erosion och sedimentation medför.

Ett problem när man beräknar morfologiska förändringar är den långa tidsskalan (år) under vilken förändringar i morfologin sker jämfört med de hydrodynamiska (t.ex. strömmar, vattennivåer). Detta leder till orimligt långa beräkningstider. För att undvika detta kan man använda en morfologisk skalningsfaktor i MOR. Denna faktor multiplicerar de morfologiska förändringarna så att man får betydligt kortare simuleringstid. Genom att sätta faktorn till t.ex. 12 och komprimera ett års flödesserie till en månad kan man utröra simulering för en månad men få resultatet av ett års morfologiska förändringar.

Uppdatering av djupet medför kontinuerligt förändrade hydrauliska villkor. Följaktligen är det främst motiverat att använda en kombinerad hydrodynamisk-morfologisk numerisk modell i det fall där förändringar i batymetrin leder till avsevärt annorlunda bottenskjuvspänningar, där erosionen leder till hög koncentration av suspenderat material (som bl.a. påverkar vattnets densitet och därigenom erosionsförloppet) eller då sedimentationsprocesser bedöms viktiga.

Om bottenförändringarna är små förändras inte bottenskjuvspänningarna nämnvärt och osäkerheten i morfologiska indata kommer då vara mycket större än osäkerheten i den beräknade bottenskjuvspänningen. Detta motiverar mer direkta uppskattningar av erosionen med hjälp av GIS-verktyg. En sådan analys är i sådana fall ett effektivare tillvägagångssätt, då parametrarna kan varieras inom rimliga gränser och snabbt ge resultat. En kopplad hydrodynamisk-morfologisk beräkningsmodell över hela Göta älv kräver, exempelvis, flera dagars simuleringstid för att återskapa ett scenario av några år, medan nästintill ekvivalenta resultat kan erhållas direkt med empiriska GIS-analyser. Det är emellertid nödvändigt att även GIS-analyserna baseras på en väl kalibrerad hydrodynamisk modell som ger realistiska värden på bottenskjuvspänningarna överallt i området.

4.2 Nödvändiga indata

För att kunna beräkna ett framtida morfologiskt scenario behövs värden för ett antal parametrar som indata till modellen. I alla områden där lera och silt (kohesiva material) dominerar behövs värden på den horisontella och vertikala fördelningarna av de parametrar som presenteras i Tabell 4-1.

Tabell 4-1. Materialparametrar och hydrologiska parametrar nödvändiga för den morfologiska och hydrauliska modelleringen.

Materialparametrar lera och silt	Materialparametrar sand och grus	Hydrologiska parametrar
τ_c [Pa] kritisk bottenkjuvpänning	D_{50} [mm] mediankornstorlek	Detaljerad batymetri
M [kg/(m ² s)] erosionsparameter ¹		Tidsserier med vattenstånd och flöden längs älven
ρ_b [kg/m ³] skrymdensitet	ρ_b [kg/m ³] skrymdensitet	Typiska flöden från biflöden
ρ_d [kg/m ³] torrdensitet		Uppgifter om vilka områden som domineras av vass och andra ytor som kraftigt avviker från den typiska ytråheten.
Sjunkhastighet [m/h] (i söt- och saltvatten)		Flödesfördelningen mellan olika delar av vattendraget (Göta- respektive Nordre älv)
		Uppgifter om bottenens ytråhet t.ex. Mannings tal

¹ Alternativt kan M beräknas om antingen erosionshastigheten E [kg/(m²s)] eller bottenförändringshastigheten $[\partial z/\partial t]$ och τ_c är givna.

4.3 Kalibrering och validering

En förutsättning för att kunna beräkna de morfologiska förändringarna är att en väl kalibrerad hydrodynamisk modell finns etablerad för området. Den modell som använts i Göta älvutredningen har kalibrerats och validerats med avseende på hydrauliken (se Åström et al., 2011). Efter detta måste modellen även kalibreras och valideras för morfologin innan den kan anses producera tillförlitliga scenarier. För detta krävs åtminstone två av nedanstående data, där minst en av dessa beskriver någon slags horisontell variation.

- Uppgifter om förändringar av batymetri under en lång tidsperiod, inklusive uppgifter om muddring, deponering av muddermassor m.m. och bedömning av hur

stor del av ovanstående förändringar som skapats av fartygsvågor. Det sistnämnda gäller främst grunda områden.

- Tidsserier av koncentrationer av suspenderat material och variationen av dess partikelstorlekar längs med älven och i mynningarna av tillrinnande vattendrag.
- Den totala sedimenttransporten från Göta älvs botten inklusive kvantifiering av hur stor del av denna som kan härledas till fartygsvågor.
- Beskrivning av hur fördelningen av de ytliga skikten av bottenmaterial har förändrats i tiden.

Den kalibrerings- och valideringsinformation som funnits tillgänglig i Göta älv är uppgifter om förändringar av batymetrin i området. Djupmätningar gjordes i juli 2003 och i december 2009 (Rydell et al., 2011) och dessa kan användas till en jämförelse mellan beräknade och uppmätta förändringar i bottennivå. I de mätningar som gjordes 2003 sträcker sig mätområdet en bit utanför farleden, dock oftast inte ända in till älvstranden. I de mätningar som gjordes 2009 går mätområdet ända in till älvstranden. Detta betyder att jämförelsen inte kan göras för kanterna av älvfåran.

5 PRINCIPER FÖR UNDERSÖKNINGAR

Som anges i kapitel 3 kan erosion och sedimenttransport i vattendrag studeras utifrån olika utgångspunkter. Inledningsvis bör de processer som styr erosionen klargöras för att få en bild av framförallt de morfologiska förändringar som orsakas av naturliga förlopp och av påverkan från olika aktiviteter som t.ex. exploatering för bebyggelse, infrastruktur, fartygstrafik och vattenkraft. För beräkning av erosion och sedimenttransport behöver egenskaper hos bottensedimenten klargöras liksom de hydrauliska och hydrodynamiska förhållandena. I detta kapitel diskuteras en metodik för att klargöra dessa förhållanden.

Ett lämpligt sätt att klargöra förhållanden som styr erosionen i vattendrag är att inledningsvis göra översiktliga undersökningar som underlag för mer detaljerade mätningar och undersökningar. Undersökningar i vattenområden är ofta tidskrävande och kostsamma, vilket innebär att detaljerade undersökningar bör koncentreras till de områden som är representativa för stora områden i älven.

De metoder som är lämpliga att använda beskrivs i kapitel 6.

5.1 Inventering av tidigare utredningar

Inledningsvis bör tidigare undersökningar och utredningar inventeras och sammanställas. Exempel på sådant material kan vara geologiska kartor, uppmätta bottennivåförändringar och geotekniska undersökningar. Med utgångspunkt från detta underlag kan sedan behov av kompletterande undersökas planeras.

5.2 Översiktliga undersökningar

De översiktliga undersökningarna bör baseras på kända förhållanden i vattendraget och uppgifter om tidigare eller pågående erosion, muddring och maringeologiska förhållanden. Avsikten är främst att få en bild och översikt av vattendraget och förhållanden för olika delar. Normalt bör undersökningar utföras för att beskriva förekomst och egenskaper hos bottensediment genom provtagning och analys av sediment i laboratorium. Detta bör göras i ett antal sektioner och så att förhållandena i hela tvärsnittet kan beskrivas.

Sedimenttransport kan analyseras genom vattenprovtagning och laboratorieanalyser eller genom analys av turbiditetsmätningar.

5.3 Detaljerade undersökningar

De översiktliga undersökningarna kompletteras därefter med detaljundersökning på utvalda platser. Det är främst förhållandena närmast botten som är av intresse för att klargöra erosionsegenskaperna. I samband med Göta älvutredningen diskuterades mätningar av lokala förhållanden som vattenhastighet, sedimentkoncentration, kritiska botten-skjuvspänningar och erosionskonstanter.

Normalt är det inte möjligt att göra en detaljerad analys av hela vattendraget, framförallt av kostnadsskäl. Däremot kan en lämplig väg vara att göra detaljerade mätinsatser inom ett mindre testområde. Data från ett sådant område kan sedan användas för att avgöra om det sker erosion eller inte inom detta delområde men också för att få en bättre uppfattning om hur variationen i data ser ut. Resultaten från en sådan mätinsats kan därefter

användas för att ge en bild av hur resultat från undersökningar i andra områden längs vattendraget kan användas för beräkningar och modelleringar.

Uppmätta bottennivåförändringar bör även studeras i relation till förekomst av åtgärder som utförts i älven och som påverkar erosionen, exempelvis förekomst av olika typer av erosionsskydd muddring och deponering av muddermassor. Sådana förhållanden behöver klargöras genom inventering av tillhörande dokument och kompletterande undersökningar.

Mätningar av parametrar som beskriver erosionsegenskaperna hos sedimenten och som ska användas till en numerisk morfologisk modellering bör inledningsvis utföras genom täta mätningar i ett litet område som man vet är utsatt för erosion. Det är lämpligt att använda flera mätmetoder för respektive parameter för att få en bild av den horisontella och vertikala spridningen av parametrarna. Dessutom bör det i samma testområde även göras detaljerade hydrauliska och geotekniska mätningar, för att på så sätt få en helhetsbild över de fysiska villkor som styr erosionsförloppet.

6 UNDERSÖKNINGSMETODER

6.1 Undersökning av bottensediment genom provtagning

Fältprovtagningar utgör ett nödvändigt underlag i en utredning av erosionsförhållanden. De materialegenskaper och erosionsparametrar som används i beräkningar är ofta plats-specifika och relevanta värden kan inte direkt hämtas från litteraturen. I syfte att undersöka bottensedimenten och speciellt finkornigt material har inom Göta älvutredningen flera olika undersökningsmetoder föreslagits, testats och använts, vilket översiktligt beskrivs i detta kapitel.

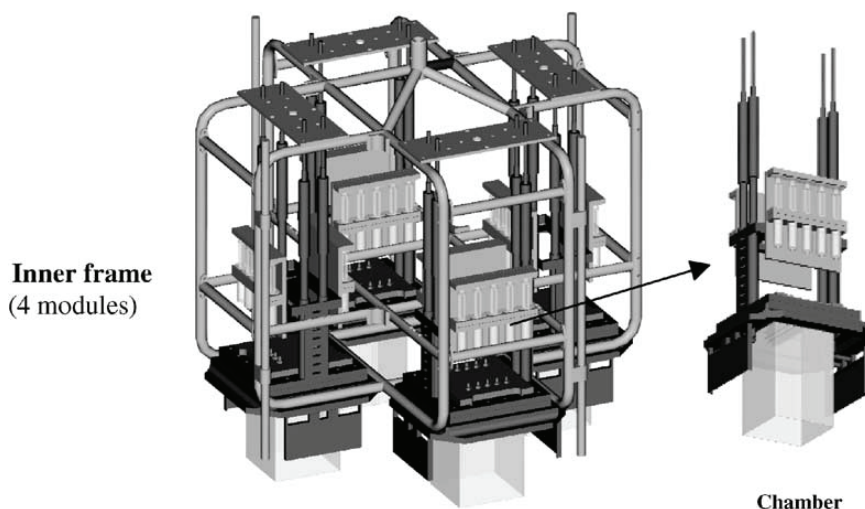
Vid de geotekniska undersökningar som utförts i Göta älvutredningen har ett flertal metoder använts, främst vikt- och CPT-sonderingar samt kolvprovtagning. Dessa metoder bedöms vara väl kända och beskrivs därför inte närmare här. Istället hänvisas till Geoteknisk fälthandbok (SGF, 1996). Vidare har sedimentprovtagning utförts med Ekmanhuggare, Beeker (rörprovtagare) och Kajakprovtagare. För dessa metoder hänvisas till Fälthandbok miljötekniska markundersökningar (SGF, 2004).

Halten suspenderat material i Göta älv har bestämts genom filtrering av vattenprov. För mer detaljer om detta hänvisas till Göransson et al. (2011).

Bottenskljuvspänningen och erosionskonstanten M är nödvändiga parametrar för att bestämma erosionen i ett vattendrag. Traditionell geoteknisk mätutrustning är inte anpassad för detta och därför inventerades olika möjliga metoder, varav fyra metoder studerades närmare: bottenlandare, ISEF-provtagare, SETEG-analys samt HET (Hole erosion test). Dessa beskrivs i följande text.

6.1.1 Bottenlandare

Institutionen för analytisk och marin kemi vid Göteborgs universitet använder sig av en egenutvecklad bottenlandare (se Figur 6-1), försedd med loggar, datasystem och provtagningskamarer. Landaren är avsedd för att ta vattenprov men skulle rent teoretiskt kunna fungera för in-situmätning av sedimenthalt och därigenom även kritisk kljuvspänning.



Figur 6-1. Bottenlandare utvecklad vid Göteborgs universitet (Tengberg et al., 2002).

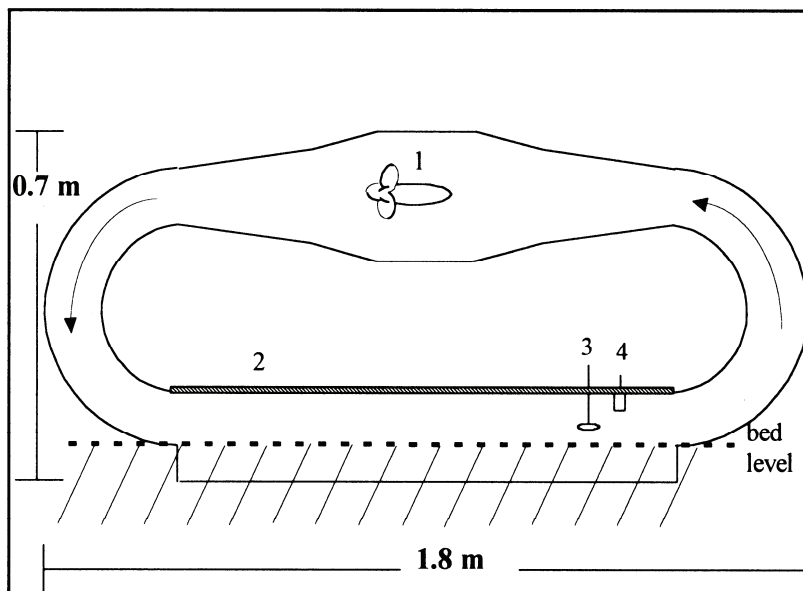
Vid provtagning sänks landaren ner i vattnet och självsjunker mot botten, där den får stå stilla i en timme för att eventuellt omrörda partiklar åter ska hinna sedimentera. Därefter tas ett vattenprov och ett hjul sätts i rotation där varje hastighet motsvarar en skjuvspänning. Hjulets rotationshastighet ökas långsamt och samtidigt mäts turbiditeten med instrument i landaren (mätintervallet är 4-100 mg/l). Vid den hastighet för vilken turbiditeten ökar drastiskt antar man att man har ett värde på den kritiska skjuvspänningen. Vid ytterligare försök med konstant hastighet där erosion uttrycks som en funktion av tiden, kan värden på erosionskonstanten (M) och porositeten (n) ges i formeln för erosion per tidsenhet.

Trots att de teoretiska förutsättningarna fanns för att använda bottenlandaren i erosionsutredningen valde man att inte gå vidare med denna metod. Den främsta orsaken var att det skapade flödet här skulle vara roterande och därför inte skulle motsvara de verkliga förhållandena.

6.1.2 ISEF-provtagare

Det nederländska företaget Deltares har utvecklat en provtagare, In Situ Erosion Flume (ISEF). ISEF-provtagaren placeras vertikalt direkt på det jordmaterial som ska undersökas. Med hjälp av en propeller drivs sedan vattnet cirkulärt genom systemet med en bestämd hastighet, se Figur 6-2. Med en optisk sensor mäts koncentrationen av det suspenderade sedimentet.

Denna metod är främst utvecklad att användas i strandzonen eller grunda vattenområden och det var den främsta anledningen till att denna metod valdes bort. Det bedömdes opraktiskt att hantera denna provtagare, med en vikt på ca 50 kg, på det djup och med de strömmar som förekommer i Göta älv.



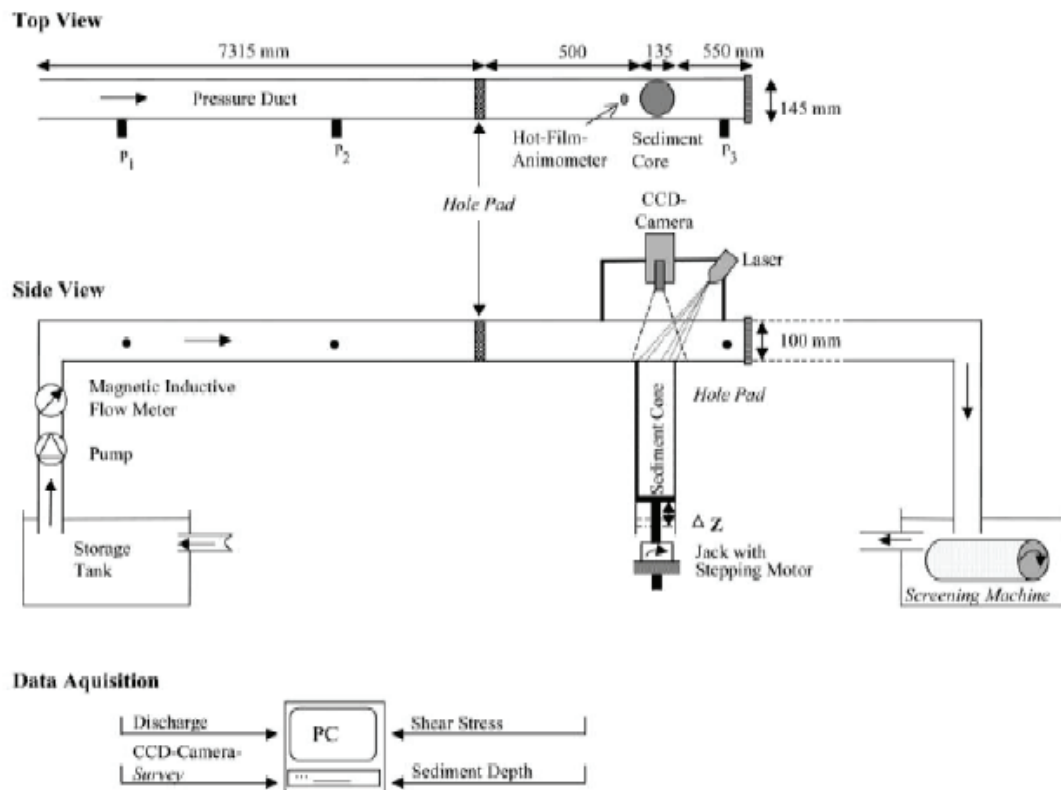
Figur 6-2. Principskiss för ISEF. Bottensedimentet roteras genom apparaten och halten suspenderat material mäts (Houwing & van Rijn, 1998).

6.1.3 SETEG-analys

Institutet för vattenbyggnad vid Universitetet i Stuttgart, Tyskland, har utvecklat ett system för bestämning av kritisk bottenkjuvspänning, densitet samt erosionshastighet på upptagna sedimentprov. Detta system kallas SETEG (*Ein Strömungskanal zur Ermittlung der Tiefenabhängigen Erosionsstabilität von Gewässersedimenten*).

Provtagningen utförs med öppna plexiglasrör med en diameter på 130 mm. Rören trycks maskinellt ner i sedimentet men kan även hanteras manuellt. Med hjälp av gammastrålning bestäms provets densitet för varje centimeter i en process som inte förstör sedimentprovet.

Provet monteras därefter i SETEG-systemet, se Figur 6-3, där dess övre yta exponeras i en vattenränna och förändringar mäts med laser. Flödet i vattenrännan ökas successivt till dess att lossnande sedimentpartiklar kan observeras. Maximalt kan flödet uppgå till 38 l/s (Witt & Westrich, 2003). Genom beräkningar kan därigenom den kritiska skjuvspänningen bestämmas och tillsammans med densiteten kan också erosionshastigheten (uttryckt i $\text{g/m}^2\text{s}$) bestämmas.

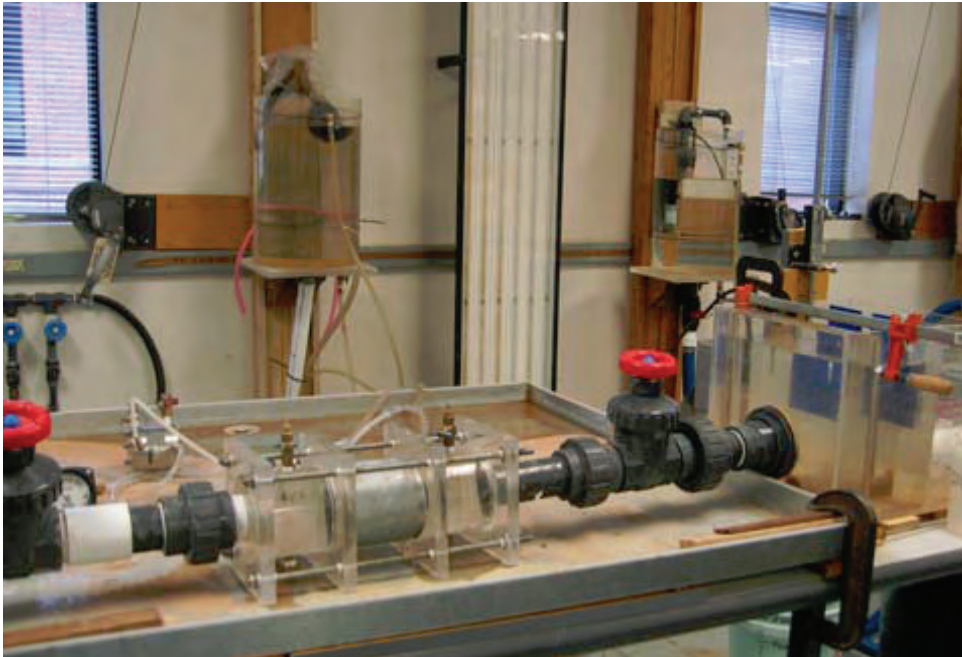


Figur 6-3. Schematisk uppbyggnad av SETEG-systemet (Witt & Westrich, 2003).

Denna metod valdes för undersökningar i Göta älvtredningen. Provtagningen innebar vissa svårigheter och skulle för framtida användning behöva förbättras vad gäller provtagning på större djup och av fastare sediment av det slag som finns i Göta älv. På samma sätt vore det önskvärt om proven kan tas med kolvprovtagare enligt standard (diameter 50 mm) och att mätutrustningen anpassas efter detta.

6.1.4 HET (Hole Erosion Test)

HET (*Hole Erosion Test*) är en välkänd metod som utförs i laboratoriemiljö och utvecklades på 1980-talet för att bedöma erosionen i kohesiva material. Metoden beskrivs bland annat av Wahl et al. (2009). Ett hål med diametern 6,35 mm borras längs med axeln i ett ostört cirkulärt sedimentprov och ett successivt ökande flöde sätts genom hålet, se Figur 6-4. Efter att erosion har observerats fortsätter testet med konstant tryck och därefter kan såväl bottenskuvspänning som erosionshastighet beräknas.



Figur 6-4. HET-uppsättning på laboratorium (Wahl et al, 2009)

På SGI:s laboratorium planerades för en HET-uppsättning och egna försök med metoden inom Göta älvutredningen. På grund av tidsbrist realiserades aldrig dessa planer. Metoden anses dock ha god potential och bör testas och utvecklas för svenska jordar i allmänhet och för Göta älv i synnerhet.

6.2 Undersökning av bottensediment med akustiska metoder

Som ett komplement till sedimentprovtagning kan skannande metoder som bygger på ekolod och radar användas. Dessa kan på en relativt kort tid täcka in stora delar av det område som ska undersökas och genom att kalibrera resultatet mot upptagna sedimentprov kan stor mängd information insamlas. I följande text beskrivs i Göta älvutredningen använda metoder.

6.2.1 Multibeamekolod

Till skillnad från ett vanligt ekolod sänds med multibeamekolod ett flertal ljudpulser från samma källa från en utrustning placerad på ett fartyg, se Figur 6-5. Pulserna sprids med en bestämd vinkel och reflekteras mot botten, varefter avståndet kan beräknas utifrån ljudpulsernas gångtid. Då fartyget rör sig framåt framträder en 3D-bild över botten.



Figur 6-5. Principen för multibeamekolodning: ljudpulser från ett fartyg reflekteras mot botten och en 3D-modell skapas (www.charts.gc.ca, november 2011)

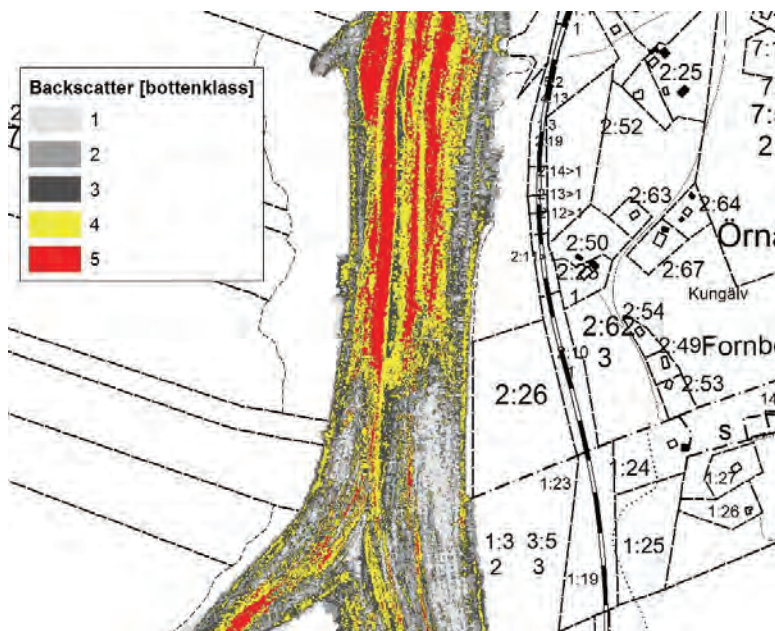
Metoden används främst för att kartera bottennivåer och i viss mån till att söka efter föremål. Fördelen med metoden är att ett större område, vinkelrätt mot färdlinjen, kan skannas av då ljudpulserna når ett avstånd som är upp till cirka 8 gånger djupet. Vid en kuperad botten kan vissa områden bli skuggade varför tätare undersökningslinjer krävs. Det finns ett minsta djup till vilket mätningar kan göras och detta beror på fartygets djupgående. I grunda vattenområden kan därför andra metoder behöva användas för att bestämma bottennivåer, t.ex. mätning med laserbatymetri eller avvägning.

Multibeamekolod kan ha olika upplösning men de vanligare instrumenten har en frekvens på 300 kHz (Rydell et al., 2007). Detta möjliggör att mindre formationer som t ex rörledningar och sandformationer, kan identifieras.

Inom Göta älvtredningen användes multibeamekolod för att bestämma batymetrin i hela Göta älv, inklusive Nordre älv.

6.2.2 Backscatteranalys

Vid multibeamekolodning är oftast det primära syftet att bestämma batymetrin i undersökningsområdet. När ljudpulsen returneras har den dock också fått en förändrad amplitud och detta amplituddata indikerar sammansättningen av bottenens ytskikt: en låg amplitud indikerar en mjuk botten och en hög amplitud indikerar en hård botten, se Figur 6-6.



Figur 6-6. Exempel på tolkat backscatter-data omedelbart norr om Tjurholmen med bottenklasser enligt erosionsutredningen (Rydell et al., 2011).

Denna metod innehåller dock en rad osäkerheter som det är viktigt att beakta vid efterföljande analys. Till exempel kan en flack berghåll indikera en lösare botten än mycket lös lera med gyttjeinnehåll. Det finns också uppfattningen att metoden lämpar sig bäst för kornstorleksintervallet silt till grus samt på släta bottnar (Kjellin, 2011). Det är viktigt att tolkat backscatterdata kalibreras mot upptagna sedimentprov, som bör uttas samtidigt som backscatterdata insamlas.

Analys av backscatter-data har använts för analys av erosionsförhållandena inom Göta älvutredningen.

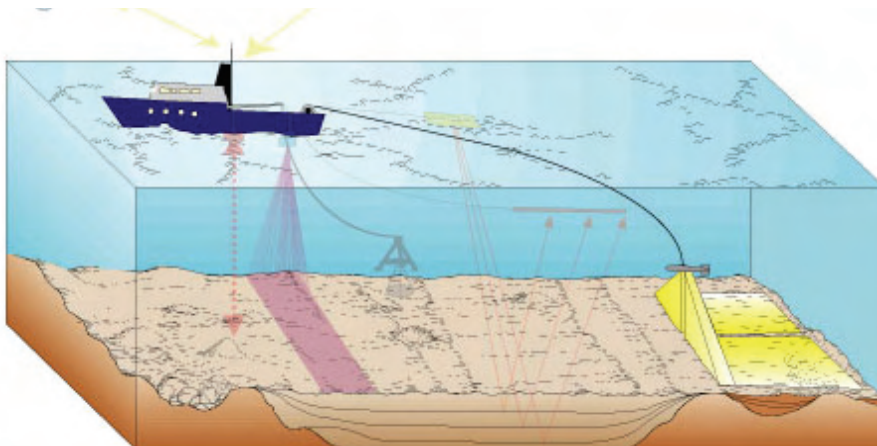
6.2.3 Sidescan sonar

Sidescan sonar är en sonderingsmetod för kartläggning av ytsediment och objekt i botten. Överytan Resultatet blir motsvarande en flygbild på land, se Figur 6-7.



Figur 6-7. Bottenförhållanden undersökta vid Åkerström med sidescan sonar (arbetsmaterial, Klingberg et al., 2006).

Vid en sidescan sonarmätning färdas ett fartyg över det område som ska undersökas. Från två ställen på fartyget sänds ljudpulser med en bestämd vinkel mot botten och efter fartyget släpas en sonar i en så kallad towfish för insamling av de reflekterade ljudpulserna, se Figur 6-8. Beroende på önskad detaljeringsgrad och undersökningsområdets storlek kan frekvenser i intervallet ca 100-400 kHz väljas, där högre frekvenser ger en bättre upplösning men mindre skannat område.



Figur 6-8. Principen för sidescan sonar (www.usgs.com, november 2011)

På samma sätt som för ekolod reflekteras signalen mot botten och utifrån signalens gångtid kan avståndet beräknas. Vidare kan föremåls höjd beräknas med hjälp av skuggor vilka även kan hjälpa till vid tolkning av olika sedimentformationer, som till exempel sandvågor som ger ett karaktäristisk mönster (Rydell et al., 2007).

Utöver ljudpulsens gångtid kan även reflektionens styrka användas för tolkning av sonardata. En stark reflekterande puls tyder på reflektion mot ett hårt föremål eller en kraftig uppgrundning. Ett mjukt material kan tvärtom helt släcka ut den reflekterande pulsen.

Tekniken har begränsad användning i starkt kuperad terräng där de skuggade områdena blir så pass omfattande att tolkningen störs. Detta kan dock avhjälpas med en kompletterande undersökningslinje från motsatt sida av de skuggande föremålen. Normalt kan mätning med sidescan sonar utföras inom ett område med ca 50-100 m bredd på vardera sidan beroende på vald detaljeringsgrad.

I Göta älvutredningen har använts bilder från en side scanundersökning utförd av SGU i samband med en maringeologisk kartläggning.

6.3 Metoder för mätning av suspenderat material

Koncentration suspenderat material (SSC – suspended sediment concentration) mäts gravimetriskt och avser främst minerogent material och organiskt material som kan sedimentera. SSC bestäms genom filtrering genom glasfiberfilter. Maskvidden finns inte bestämd i svensk standard men normalt används maskvidd 1,5 eller 1,6 μm . SSC anges i mg/l.

Turbiditet avser grumligheten i vattnet och mätning utförs med optisk teknik och baseras på ljusrefraktion. I begreppet turbiditet ingår både minerogent och organiskt material, döda och levande organismer, partiklar, kolloider, mikroorganismer, bakterier och virus. Turbiditet anges vanligen i enheterna FNU, FTU eller NTU. Turbiditet är känslig för de processer som styr sedimenttransport men också för klimatologiska och biologiska faktorer. Därtill påverkas turbiditeten bl.a. av partikelstorlek och aggregatbildning/flockulering, färg, luftbubblor och ljusrefraktion.

Det finns ingen generell formel för att omvandla turbiditetsvärden till halt suspenderat material eftersom den är platsspecifik. Det är vanligt att turbiditet används som ersättning för koncentration suspenderat partikulärt material eftersom det är enklare och billigare att mäta turbiditet samt att det möjliggör kontinuerlig mätning. Mer information finns i en utredning om sedimenttransport i Göta älv (Göransson et al., 2011).

6.4 Mätningar av vattenstånd och strömförhållanden

Tre olika typer av mätningar av hydrauliska data har utförts inom Göta älvutredningen: vattenstånd, strömmar längs flera tvärsnitt och en detaljerad vertikal strömprofil vid en bestämd position. Mätningarna av vattenstånd och strömmar längs tvärsnitt diskuteras i detalj i en rapport om hydrodynamisk modell för Göta älv (Åström et al., 2011). Mätningarna av den detaljerade strömprofilen diskuteras i avsnitt 7.1.

7 DETALJERADE STRÖMMÄTNINGAR

Syftet med att mäta en vertikal strömhastighetsprofil är främst att (lokalt) validera bottenskjuvspänningarna i den hydrauliska beräkningsmodellen. Ansatsen är att anpassa en teoretiskt vedertagen logaritmiskt hastighetsprofil till mätdata och utifrån den teoretiska profilens anpassade parametrar beräkna bottenskjuvspänningen. Värdet på bottenskjuvspänningen jämförs sedan med det modellerade värdet (exempelvis från Delft3D-modellen) i samma punkt och vid samma flöde.

Att en logaritmisk hastighetsprofil teoretiskt sett bara gäller för en rak kanal är av underordnad betydelse eftersom syftet är att validera modellresultat som använder samma ansats. Det ”teoretiska” felet kommer därför att vara identiskt i både mätningar och modell, vilket innebär att jämförelsen mellan modell- och mätresultat kommer att vara konsekvent.

7.1 Metodik

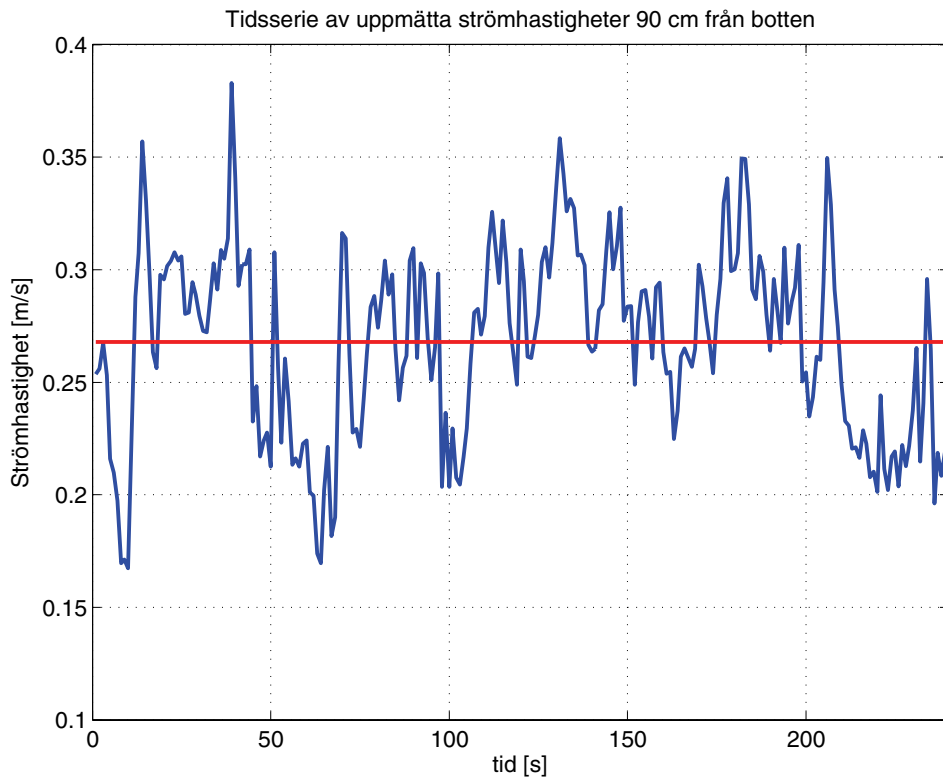
En detaljerad vertikal strömhastighetsprofil mättes den 25 augusti 2010 upp på västra sidan av Göta älv, strax ovanför förgreningen till Nordre älv (koordinater i SWEREF 99TM: 6418001 323043, koordinater i WGS84: N57 52.125 E12 00.996). Flödet vid Lilla Edet var under mättillfället 844 m³/s enligt Vattenfalls driftcentral i Bispgården. Mätningarna utfördes genom att mätfartyget förankrades och uppströms slogs en stolpe ner på vilken en ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) monterades. Mätinstrumentet kunde sedan förflyttas i vertikalled längs stolpen med god precision. För att på ett korrekt sätt beskriva hastighetsprofilens variation i vertikalled, med speciell vikt på hastighetsgradienten nära botten, valdes att koncentrera de flesta mätpunkterna närmast botten. Upplösningen i djupled bestämdes till 2 cm från botten och upp till en meter över botten, 5 cm mellan 1 och 2 m från botten, och där ovanför 10 cm. Vattendjupet vid mätpositionen var 3 m och totalt mättes alltså strömhastigheten i 80 punkter.

De turbulenta tidsskalorna i det grunda vattnet vid mätpositionen bedömdes ligga omkring 10 sekunder, baserat på en uppskattad strömhastighet på 0,5 m/s och ett medeldjup av 5 m. Utifrån detta gjordes en preliminär bedömning av att en samplingstid på fyra minuter i varje mätpunkt skulle vara nödvändigt för att få ett konvergerat tidsmedelvärde i varje mätpunkt (se även diskussion kring turbulenta tidsskalor i avsnitt 3.3.1). En längre samplingstid än fyra minuter skulle i praktiken inte vara praktiskt möjlig eftersom hela profilen måste mätas under stationära strömförhållanden och tappningen vanligtvis ändras både morgon och kväll. Då åttio punkter mättes under vardera fyra minuter innebar detta en total mättid på ca 5 timmar och trettio minuter, därtill tillkommer en viss ställtid mellan varje punkt. Data av hastighet och strömriktning sparades varje sekund.

7.2 Resultat av detaljerade strömmätningar

En typisk tidsserie av mätningarna visas i Figur 7-1. Variationerna i hastighet är stora, men på inget sätt onaturliga. Turbulens bildas även i perfekta kanaler med jämna släta väggar och förstärks i naturliga miljöer på grund av oregelbunden topografi, ojämnheter på botten, växtlighet, krökar uppströms i älvfåran m.m. Ur figuren kan man uppskatta att typiska kortare tidsskalor är ca 10-20 s (dvs. i överensstämmelse med den preliminära bedömningen, se avsnitt 7.1) men det finns även tydliga längre tidsskalor på omkring 50 s och eventuellt även tidsskalor på över tre minuter. Dessa kan sannolikt härledas till

horisontella turbulenta strukturer. Tyvärr är tidsserierna alltför korta för en frekvensanalys.



Figur 7-1. Tidsserie av uppmätt strömhastighet (blå linje) i en punkt 90 cm från botten i en position nära stranden där vattendjupet var 3 m. Medelströmhastigheten 0,27 m/s visas med röd linje. Variationerna i hastighet är stora, men på inget sätt onaturliga.

Den största osäkerheten i mätresultaten bedöms följaktligen vara att samplingstiden är i kortaste laget för att ge ett konvergerat tidsmedelvärde. Felet i en medelvärdesbildning av en godtycklig oberoende händelse är proportionellt mot $1/N$, där N är antalet oberoende händelser. För att få ett väl konvergerat tidsmedelvärde av de uppmätta strömhastigheterna, som ligger inom 5 % ($1/20$) av det verkliga (okända) värdet, bör därför samplingstiden sträcka sig över en tid som är minst 20 gånger den längsta turbulenta tidsskalan (tiden för en passage av en storskalig virvel). Anledningen är att de uppmätta värdena under förloppet av en virvelpassage inte kan anses vara oberoende av varandra då de tillhör samma turbulenta struktur. En annan stor osäkerhet i själva mätningarna bedöms vara uppskattningen av avståndet från botten. I den position där mätningarna gjordes var botten väldigt mjuk, vilket naturligtvis gav en viss osäkerhet vid de manuella lodningarna. Manuella lodningar bedöms dock vara mycket mer exakta än akustiska lodningar.

Ytterligare osäkerheter uppstår vid jämförelser av uppmätta värden med modellerade värden. De främsta diskrepanserna kan sannolikt härledas dels till att modellerade data måste tolkas som ett medelvärde över en hel beräkningsruta, dvs. i detta fall medelvärdet över en yta på ca. $30 \times 10 \text{ m} = 300 \text{ m}^2$, dels till att modellerade data representerar strömningsmotståndet över samtliga icke-upplösta ojämnheter som exempelvis mindre sanddyner etc. och inte bara ytans råhet. Den uppmätta profilen är inte nödvändigtvis representativ för alla ”verkliga” hastighetsprofiler i närområdet. I ett idealt fall skulle en serie profiler ha mätts upp över ett område stort som en beräkningsruta, varefter medel-

värdet av dessa profiler skulle jämförts med modelldata. Dessvärre är det inte möjligt att utföra en sådan mätinsats med rimlig omfattning.

7.3 Beräkning av bottenskjuvspänning utifrån mätdata

För att beräkna bottenskjuvspänningen krävs kunskap om hastighetsprofilen, vilken kan parametreras utifrån formeln i avsnitt 3.3.5. Om vi antar att de uppmätta strömhastigheterna följer en logaritmiskt varierande hastighetsprofil, kan friktionsparametrarna u_τ och z_0 (se avsnitt 3.3.5 för beskrivning av dessa parametrar) varieras och avvikelsen mellan uppmätta värden och den antagna profilen kan därigenom minimeras. Minimeringen av felet ger samtidigt värden på parametrarna som kan användas till att beräkna vilken bottenskjuvspänning som råder i mätpositionen.

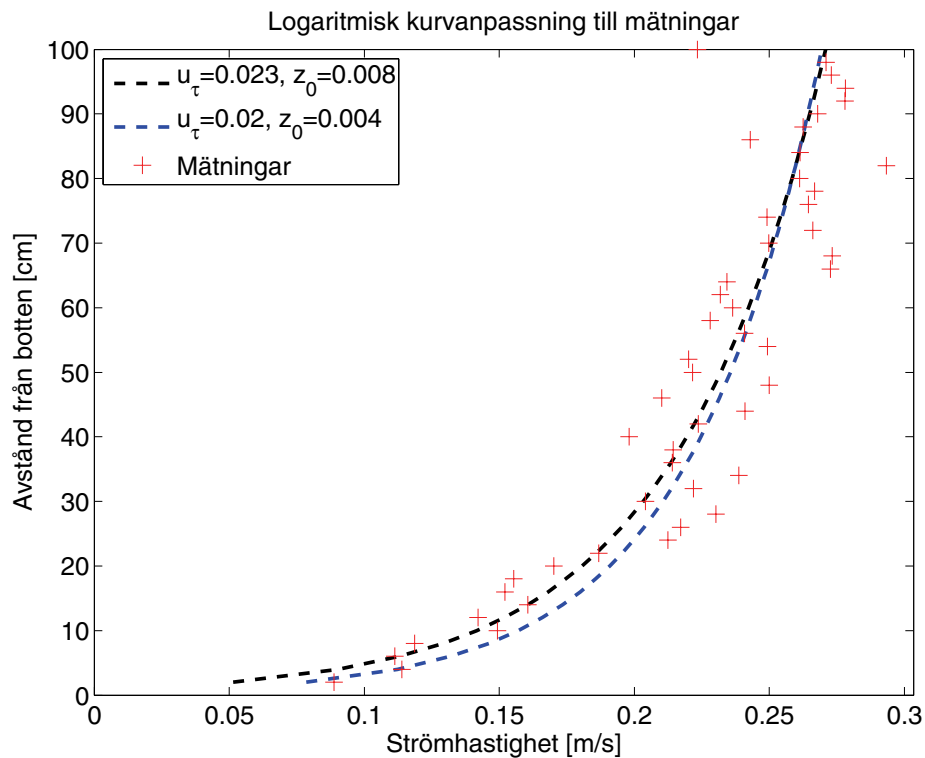
Mätresultaten vid avstånd större än en meter från botten sorterades bort, främst för att den medelvärderade hastighetsprofilen visade sig inte längre följa en typisk logaritmisk fördelning vid större avstånd än en meter från botten. Detta beror främst på inverkan av vattenytan, som bl.a. begränsar turbulensen i vertikalled.

Två olika typer av feluppskattningar används: summan av beloppet av avvikelserna i varje punkt respektive summan av beloppet av avvikelserna i varje punkt viktat med inversen av avståndet till botten. Den sistnämnda feluppskattningen innebär att värdena närmare botten blir viktigare än värdena högre upp. Detta är värdefullt, eftersom de turbulenta tidsskalorna generellt sett är kortare nära botten, vilket direkt innebär att den (konstanta) samplingstiden i relation till de turbulenta tidsskalorna blir längre. Detta leder i sin tur till bättre konvergerade och mer pålitliga tidsmedelvärden för de bottennära mätpunkterna. Nackdelen med att ge de bottennära punkterna större vikt är att felet i uppskattningen av avståndet från botten inverkar mer på slutresultatet.

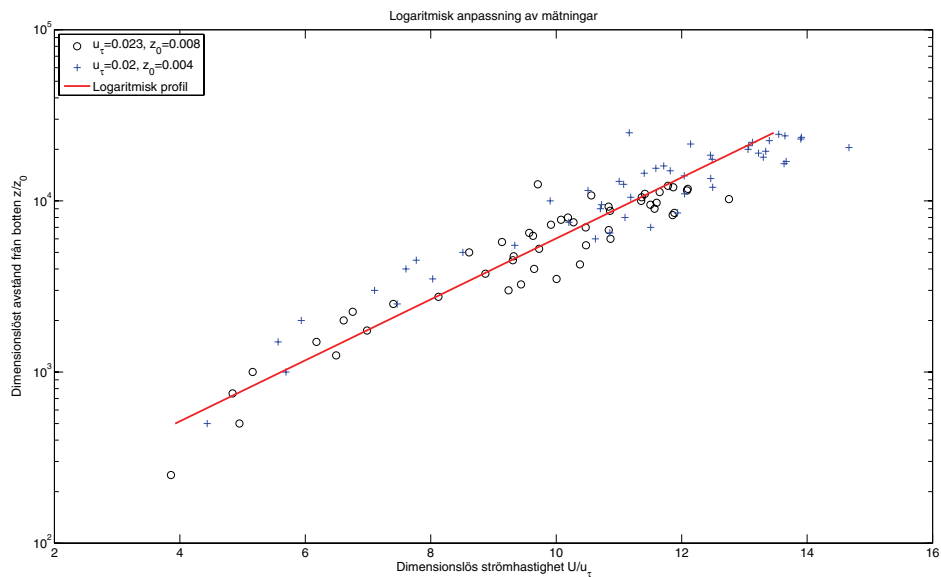
Resultatet av båda kurvanpassningarna visas i Figur 7-2. Spridningen av mätdata indikerar att tidsmedelvärdet i varje punkt inte är fullt konvergerat, eftersom den begränsade samplingsperioden var relativt kort (fyra minuter). Spridningen ökar med avståndet från botten eftersom även de turbulenta tidsskalorna ökar i samma riktning, vilket leder till gradvis sämre tidsmedelvärden. Den streckade blå linjen är skapad genom den viktade feluppskattningen med större vikt på minimering av avvikelserna nära botten, vilket är tydligt eftersom den på ett bättre sätt approximerar de lägsta värdena. Då felet minimerats är parametrarna $u_\tau = 0,02$ och $z_0 = 0,004$, vilket motsvarar en bottenskjuvspänning $\tau_w = 0,4$ och Mannings tal $n = 0,027$.

Den svarta kurvan visar den logaritmiska hastighetsprofilen då det absoluta felet mellan kurvan och mätningar minimerats på ett likformigt sätt. Vid minimerat fel är parametrarna här $u_\tau = 0,023$ och $z_0 = 0,008$, vilket motsvarar en bottenskjuvspänning $\tau_w = 0,53$ och Mannings tal $n = 0,031$. En högre grad av ojämnheter på botten ger ett tjockare gränsskikt och högre bottenskjuvspänningar.

Från Figur 7-2 är det inte visuellt uppenbart vilken feluppskattning som är bäst. För att på ett tydligare sätt kunna avgöra detta visas en omvänd analys i Figur 7-3. Här har istället *mätningarna* anpassats till en logaritmisk hastighetsprofil och plottas på en logaritmisk skala. Mätresultaten har skalats med de optimerade värdena på u_τ och z_0 . Det är nu tydligare att de svarta markeringarna generellt sett överensstämmer något bättre med den logaritmiska profilen, dvs. bättre approximerar en rak linje på den logaritmiska skalan.



Figur 7-2. Anpassning av logaritmisk hastighetsprofil till uppmätta värden. Den svarta kurvan är anpassad genom att minimera felet mellan mätningar och teoretisk profil på ett likformigt sätt. Den blå kurvan lägger större vikt på att minimera felet närmare botten. De båda logaritmiska hastighetsprofilernas respektive parametrar visas i övre vänstra hörnet i bilden.



Figur 7-3. Anpassning av uppmätta värden till logaritmisk hastighetsprofil. De blå (+) respektive svarta (o) symbolerna representerar samma data, men är parametriserade på olika sätt.

De finns inga modellerade data för ett flöde på $844 \text{ m}^3/\text{s}$, men en jämförelse kan göras med en uppskalning av bottenskjuvspänningarna vid $780 \text{ m}^3/\text{s}$, i.e. $\tau_{w,844} \approx 844^2 \times (\tau_{w,780}/780^2)$, där $\tau_{w,780}$ är den modellerade bottenskjuvspänningen vid ett flöde på $780 \text{ m}^3/\text{s}$ (se avsnitt 3.3.4 för motivering av denna kvadratiska uppskalning). Detta ger ett värde på $0,32 < \tau_{w,844} < 0,46$, i de beräkningsrutor som ligger närmast kring mätpositionen som kan jämföras med det utifrån mätningarna beräknade värdet av $\tau_w = 0,53$. Resultaten indikerar att modellen underskattar den verkliga bottenskjuvspänningen, men osäkerheterna är stora. I modellen är Mannings tal $n = 0,02$, vilket är klart lägre än båda de värdena som på olika sätt optimerar logaritmiska profiler till mätdata.

Sammanfattningsvis kan konstateras att mätningarna av den vertikala hastighetsprofilen borde ha koncentrerats till den understa metern av vattenmassan för att kunna förlänga samplingstiden till åtminstone den dubbla, dvs. till minst åtta minuter i varje punkt. En ännu längre samplingstid skulle ha varit att föredra, men är i princip omöjlig eftersom flödet i Göta älv i princip aldrig hålls både högt och stationärt under längre perioder än ca 12 timmar. Upplösningen på 2 cm i vertikalled bedöms fortfarande vara nödvändig för att beskriva hastighetsgradienten i vertikalled, men kan möjligtvis vara glesare på större avstånd från botten än 0,5 m, för att på så sätt minska antalet mätpunkter och därigenom möjliggöra längre samplingstider.

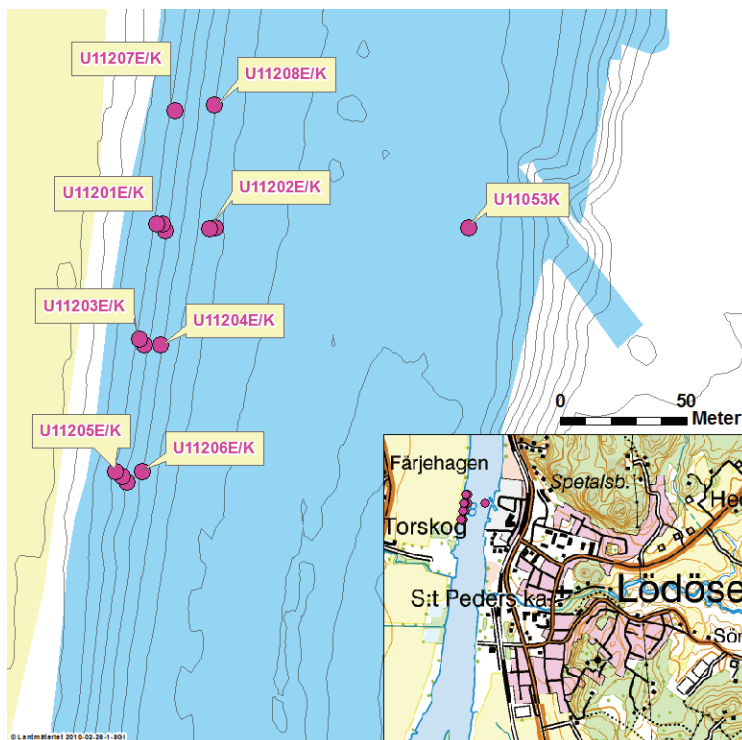
8 EROSIONSPARAMETRAR - ANALYS AV UNDERSÖKNINGAR I PROVFÄLT

8.1 Provfält

För att studera de parametrar som styr erosionsförhållandena har detaljerad provtagning utförts med SETEG-metoden inom ett provfält längs älven. För detaljerade undersökningar valdes en ca 100 m lång sträcka i västra delen av älven vid Lödöse. Anledningen till att detta område valdes var flera, framförallt att det bedömdes förekomma en ren postglacial lera, en jämn bottenprofil och att geoteknisk provtagning från flöte på älven fanns tillgänglig i närheten varför det var praktiskt att samordna fältarbetena.

Planen var att i tre sektioner med ca 50 meters avstånd ta prov i tre punkter med ett avstånd om 15, 35 och 55 m från älvens västra strandkant. På så sätt skulle prov fås längs undervattenslätten från stranden till älvens djupaste delar. I vardera punkt skulle tre provtagningar utföras med SETEG-rör (130 mm) och två med kolvprovtagning (50 mm).

När provtagningen utfördes uppstod praktiska problem på vattendjup större än 3 m, där starka vattenströmmar omöjliggjorde provtagning med den tillgängliga utrustningen. Planen reviderades och medan proven närmast stranden i stort sett kunde utföras som planerat fick provtagningen i den andra raden flyttas närmare stranden och den yttersta raden helt fick utgå. Istället utfördes en fjärde sektion uppströms de övriga. Provtagningspunkterna benämndes U11201-U11208 och var placerade enligt Figur 8-1.



Figur 8-1. Plankarta över provfältet vid Lödöse. Beteckningarna E och K anger att SETEG-analys respektive kolvprovtagning har utförts.

8.2 Resultat från geotekniska undersökningar

I Göta älvtredningen har geotekniska undersökningar utförts i vattenområdena längs älven. Inom provfältet vid Lödöse uttogs ostörda jordprover med kolvborr i två punkter på samma platser som sedimentprover togs för bestämning av erosionsegenskaper. Rutinanalyser av upptagna prover har utförts på SGI:s geotekniska laboratorium. Resultaten redovisas i Tabell 8-1. Notera att densiteten genomgående är högre och vattenkvoten lägre för de mer strandnära proven.

Prov har emellertid inte kunnat uttas för det översta sedimentskiktet eftersom sedimenten har varit alltför lösa. Det är dessa sediment som är av betydelse för den initiala erosionsprocessen men efterhand som erosionen pågår kommer även sediment på större djup att påverkas.

Tabell 8-1. Sammanställning av laboratorieundersökningar av ostörda prover vid försöksfältet vid Lödöse.

Provpunkt	Beteckning på kolv- prov				
		Djup*	Densitet	Vattenkvot	Skjuvhållfasthet, τ
		[m]	[t/m ³]	[%]	[kPa]
U11201	K1	0,35	1,87	33	(18)
U11201	K2	0,95	1,8	47	(15)
U11202	K1	1,6	1,59	68	18
U11203	K1	1	1,82	38	(24)
U11203	K2	1	1,81	44	(16)
U11204	K1	1	1,63	63	21
U11204	K2	1	1,64	67	24
U11205	K1	1	1,82	35	(23)
U11205	K2	1	1,84	34	(17)
U11206	K1	1	1,62	66	25
U11206	K2	1	1,62	63	23
U11207	K1	1	1,8	40	(21)
U11207	K2	1	1,83	33	-
U11208	K1	1	1,6	71	20
U11208	K2	1	1,6	68	18

*Djup under bottenytan

8.3 Analys av sedimentprover – SETEG-systemet

Proverna från provfältet har analyserats i laboratorium på universitetet i Stuttgart avseende kritisk bottenkjuvspänning, densitet och erosionshastighet (från vilken erosionsparametern kan beräknas). Resultaten från undersökningarna i provfältet har analyserats för att studera hur de i laboratoriet undersökta parametrarna varierar inom enskilda prov, mellan prover från samma plats, samt mellan olika platser. Vidare, har eventuella samband med djupet under botten studerats.

De parametrar som inkluderats i analyserna visas i Tabell 8-2. En sammanställning av samtliga undersökningsresultat finns i Bilaga 1.

Tabell 8-2. Parametrar som har använts i analyser av erosionsparametrar.

Parameternamn	Förklaring	Värde
Prov	Enskilda prov	23 namn
Plats	Platser om 2-3 prov	8 namn
z	Djup under botten	27 djup, 0-77 cm under botten
tau crit	Utvärderad kritisk bottenkjuvspänning	0,2-2,5 Pa
dens	Utvärderad densitet	990-2430 kg/m ³
dz/dt	Utvärderad erosionshastighet	2,6·10 ⁻⁸ -1,9·10 ⁻⁴ m/s

En första undersökning av eventuella samband mellan de olika parametrarna har gjorts utifrån korrelationsmatrisen i Tabell 8-3. I denna har samtliga mätningar från de numeriska parametrarna inkluderats, oberoende av *Prov* och *Plats*. I tabellen visas signifikanta korrelationer med röd färg; de par av parametrar för vilka korrelationen är signifikant är *tau crit* och *z* samt *tau crit* och *dz/dt*.

Tabell 8-3. Korrelationsmatris samtliga mätningar inkluderats, oberoende av parametrarna *Prov* och *Plats*. Korrelationskoefficienter markerade i rött är signifikanta på signifikansnivån 0,05.

	z [cm]	tau crit [N/m²]	dz/dt [m/s]	dens [kg/m³]
z [cm]	1,00	0,16	-0,08	0,12
tau crit [N/m²]	0,16	1,00	-0,19	-0,07
dz/dt [m/s]	-0,08	-0,19	1,00	0,04
dens (kg/m³)	0,12	-0,07	0,04	1,00

För att studera hur de tre parametrar som utvärderats i laboratoriet (kritisk bottenkjuvspänning, densitet och erosionshastighet) påverkas av faktorerna *Prov*, *Plats* och *z* (se

Tabell 8-2) har variansanalyser gjorts. Variansanalys används för att undersöka om det finns signifikanta skillnader i medelvärden mellan data från olika grupper. För att göra denna undersökning så analyseras varianserna. I analysen har *Prov* och *Plats* hanterats som gruppvariabler. För att även studera sambandet med djupet under botten har också *z* inkluderats i analysen, dock inte som en gruppvariabel då denna är en numerisk variabel. För vardera av de tre parametrarna har det gjorts två analyser, en där *Prov* har ingått i analysen och en där *Plats* har ingått. I Tabell 8-4 redovisas resultaten från de analyserna genom att de parametrar som signifikant påverkar den testade parametern redovisas.

Tabell 8-4. Resultat av ANCOVA-analys.

Parameter	<i>Prov</i> eller <i>Plats</i> i analysen	Signifikant faktor (signifikansnivå 0,05)
Kritisk bottenskjuvspänning	<i>Prov</i>	<i>z</i> , <i>Prov</i>
"	<i>Plats</i>	<i>z</i> , <i>Plats</i>
Densitet	<i>Prov</i>	<i>z</i> , <i>Prov</i>
"	<i>Plats</i>	<i>z</i> , <i>Plats</i>
Erosionshastighet	<i>Prov</i>	<i>Prov</i>
"	<i>Plats</i>	<i>Plats</i>

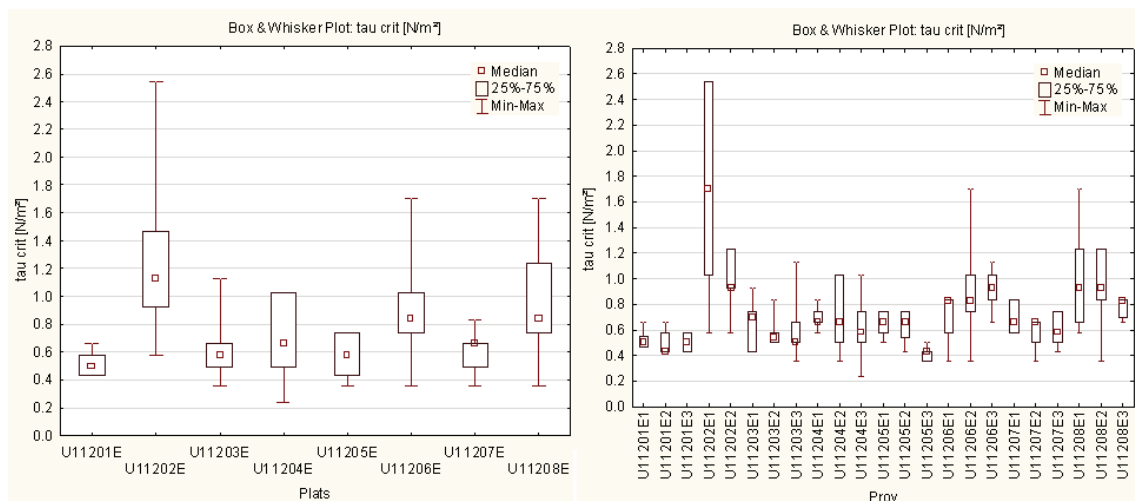
Resultaten visar att såväl *Prov* som *Plats* har signifikant påverkan på alla tre analyserade parametrar. Det innebär alltså att det finns en signifikant skillnad i medelvärdena mellan både olika prover och olika platser. För kritisk bottenskjuvspänning och densitet har även *z* signifikant påverkan, vilket innebär att medelvärdena beror av djupet under botten.

I följande kapitel illustreras resultaten uppdelade på de på laboratoriet tre utvärderade parametrarna kritisk bottenskjuvspänning, densitet och erosionshastighet.

8.3.1 Kritisk bottenskjuvspänning

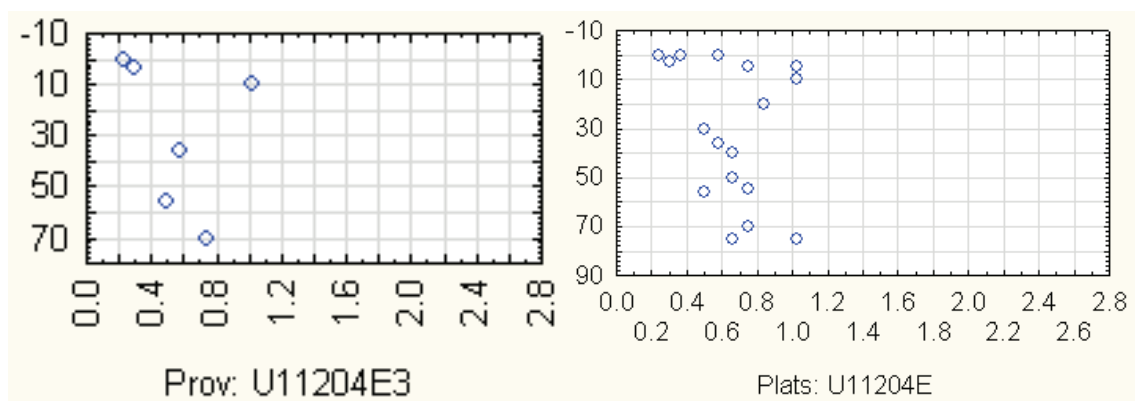
Den kritiska bottenskjuvspänningen skiljer med en faktor 13 mellan det minsta och det största värdet. Vidare skiljer den mellan de olika platserna avseende såväl medianvärde som spridning (se vänstra diagrammet i Figur 8-2). Skillnaden i medianvärde uppgår som mest till en faktor 2,3 mellan de olika platserna. Vidare, visar boxen som innehåller värdena inom 25-75 % kvartilen att huvudparten av värdena oftast återfinns mitt emellan de högsta och de lägsta värdena.

Då högra diagrammet i Figur 8-2 studeras framgår att det också förekommer stora skillnader mellan olika prover och ibland även mellan prover från samma plats. Detta gäller exempelvis platsen U11202E. I andra fall, som t.ex. för plats U11201E är variationen liten mellan de tre proverna.



Figur 8-2. Utvärderad kritisk bottenskjuvspänning för de åtta platserna (t.v.) samt de 23 provinerna (t.h.).

Ett exempel av den kritiska bottenskjuvspänningens samband med djupet under botten illustreras i Figur 8-3. Det framgår där att den kritiska bottenskjuvspänningen generellt sett ökar med djupet, både inom ett prov och inom en plats. Denna ökning med djupet återfinns inom alla åtta platser, men resultaten från vissa prover indikerar en kritisk bottenskjuvspänning som minskar med djupet. Som ses i figuren är variationen stor och möjligtvis kan i detta prov ett lager på 10 cm djup under botten ha en högre kritisk bottenskjuvspänning än djupare liggande lager.

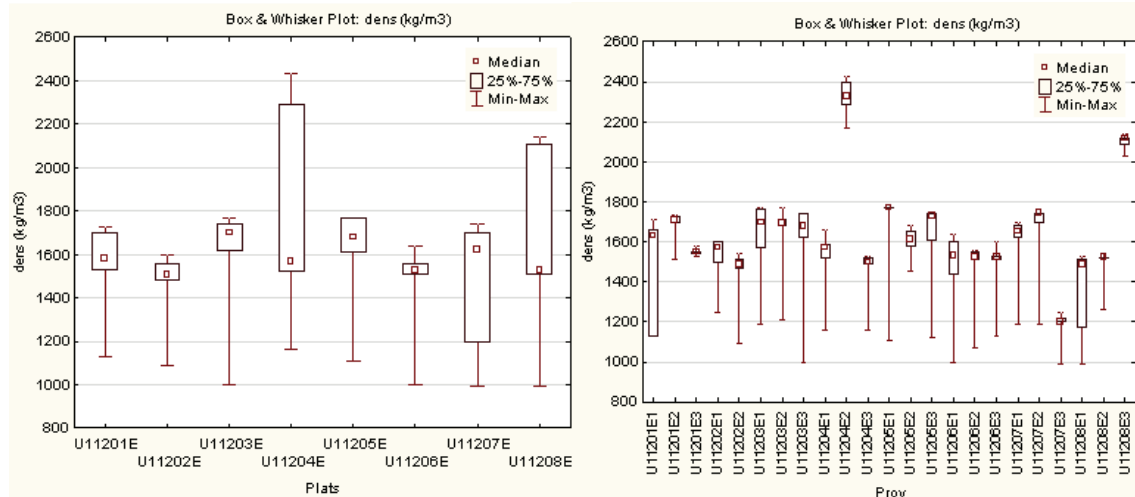


Figur 8-3. Ett exempel på den kritiska bottenskjuvspänningens [Pa] beroende av djupet under botten [cm] för prov U11204E3 (t.v.) samt plats U11204E (t.h.).

8.3.2 Densitet

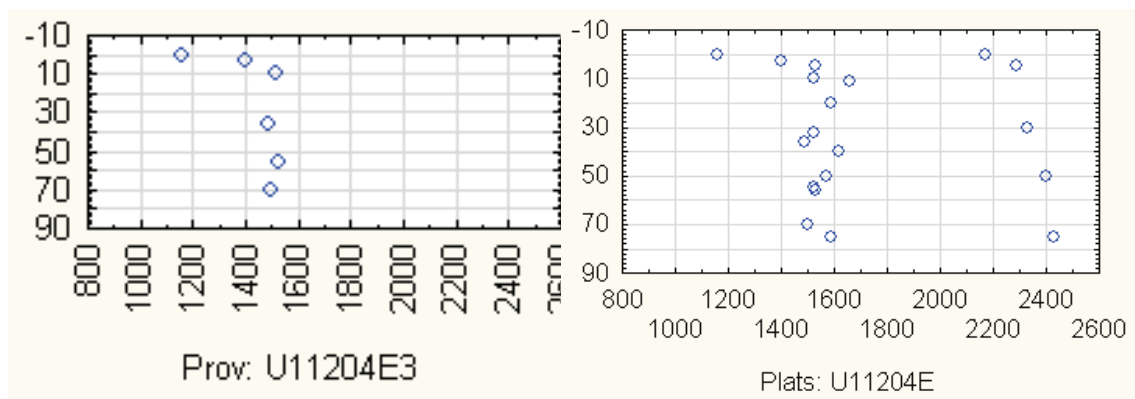
Även för utvärderad densitet finns skillnader mellan de olika platserna. Dessa är betydligt mindre än för den kritiska bottenskjuvspänningen och skillnaden mellan det minsta och största värdet är en faktor 2,5, medan skillnaden i medianvärde mellan platserna som mest uppgår till en faktor 1,1 (se vänstra diagrammet i Figur 8-4). Vidare, visar boxen som innehåller värdena inom 25-75 % kvartilen att huvuddelen av värdena återfinns relativt nära de högsta värdena. De lägsta värdena avviker tydligt i diagrammen, vilket beror på att densiteten i ytan på provena generellt sett är betydligt lägre än på

djupare nivåer (se Figur 8-5). Enstaka prover avviker kraftigt från övriga, exempelvis U11204E2 i högra diagrammet i Figur 8-4.



Figur 8-4. Utvärderad densitet för de åtta platserna (t.v.) samt de 23 proverna (t.h.).

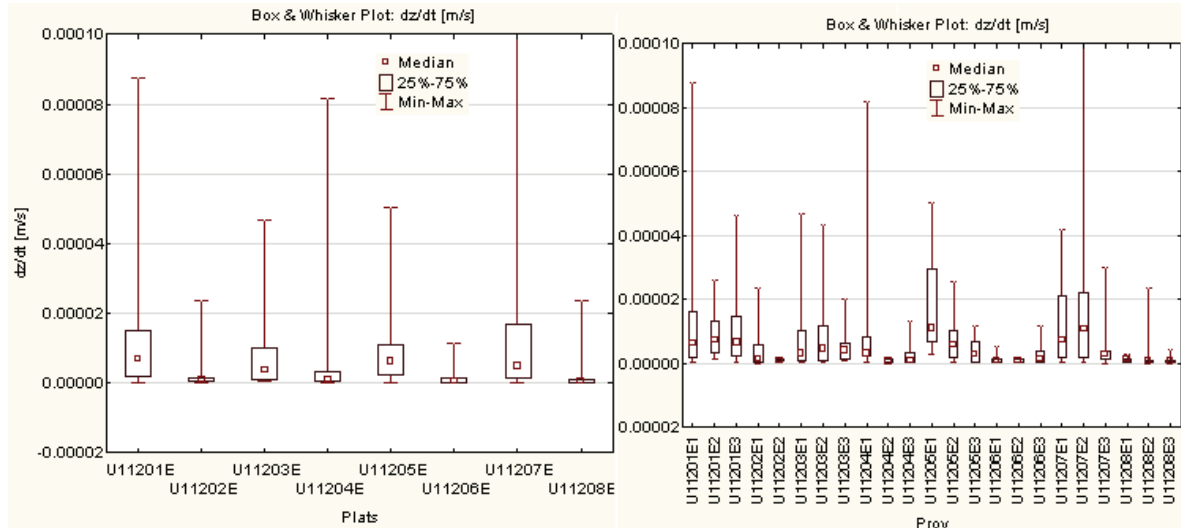
Då dessa densiteter jämförs med de densiteter som utvärderats från de geotekniska undersökningarna konstateras att de högsta värdena i Figur 8-4 ungefär motsvarar värdena i kapitel 8.2 som utvärderats från de geotekniska provtagningarna. Detta dock med undantag för proverna U11204E2 och U11208E3, vilka har en betydligt högre densitet än övriga prover i Figur 8-4 samt i kapitel 8.2. Eftersom utvärderingen i kapitel 8.2 är gjord för prover omkring 1 m under botten är det rimligt att dessa värden motsvarar de höga värdena i Figur 8-4, då det är de ytligaste lagren som har lägst densitet. Densitetens beroende av djupet under botten illustreras med ett exempel i Figur 8-5. De ytligaste lagren inom ett prov har oftast betydligt lägre densitet än djupare liggande lager. I flera fall skiljer densiteten också avsevärt mellan de olika proverna inom en plats.



Figur 8-5. Ett exempel på densitetens [kg/m³] beroende av djupet under botten [cm] för prov U11204E3 (t.v.) samt plats U11204E (t.h.).

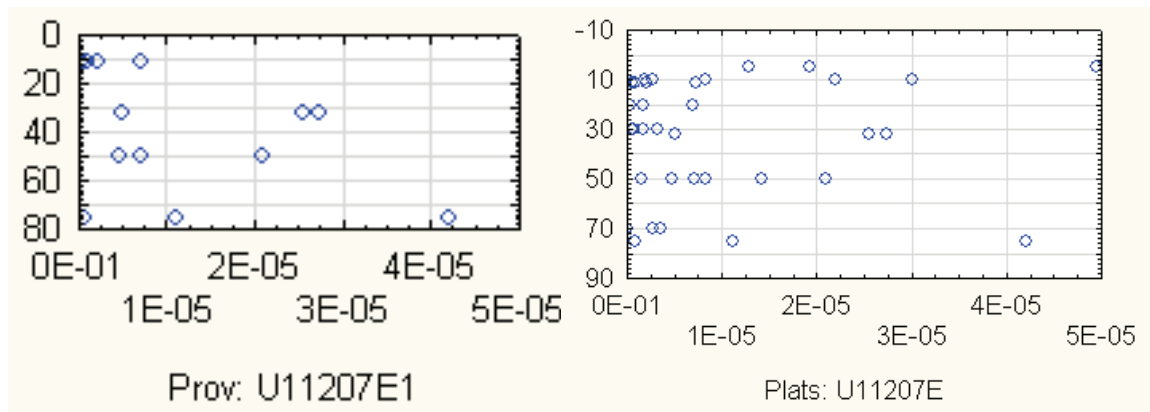
8.3.3 Erosionshastighet

Erosionshastigheten är den parameter som varierar mest av de tre undersökta erosions-egenskaperna. Det största uppmätta värdet är hela 7300 gånger så stort som det minsta. Den maximala skillnaden mellan medianvärdena för de olika platserna uppgår till en faktor 13 (se Figur 8-6). Vidare, visar boxen som innehåller värdena inom 25-75 % kvartilen att huvuddelen av värdena återfinns ganska nära de lägsta värdena. Orsaken till att de högsta värdena avviker så tydligt har inte analyserats.



Figur 8-6. Utvärderad erosionshastighet för de åtta platserna (t.v.) samt de 23 proverna (t.h.). Notera att y-axeln har begränsats till $1 \cdot 10^{-4}$ fast det största värdet är $1,9 \cdot 10^{-4}$.

Erosionshastigheten har inget tydligt samband med djupet, varken inom ett prov eller en plats. Detta illustreras med ett exempel i Figur 8-7. Noteras bör att spridningen är stor för ett visst djup, exempelvis för 5 cm under botten där erosionskonstanten varierar mellan ca $1,25 \cdot 10^{-5}$ och $1,95 \cdot 10^{-4}$ m/s (x-axeln har dock begränsats till $5 \cdot 10^{-5}$ för att övriga värden ska synas tydligare).



Figur 8-7. Ett exempel på erosionshastighetens [m/s] beroende av djupet under botten [cm] för prov U11207E1 (t.v.) samt plats U11207E (t.h.). Notera att x-axeln har begränsats till $5 \cdot 10^{-5}$.

8.3.4 Diskussion

Analyserna av proverna från provfältet i Lödöse visar att det förekommer stor variation i kritisk bottensskjuvspänning, densitet och erosionshastighet. Detta gäller såväl inom proverna, mellan proverna inom samma plats som mellan platserna. Det är inte känt om variationerna främst är orsakade av naturliga variationer i naturen eller beror på metodik, undersökning, transport eller utvärdering. Innan dessa resultat används bör därför vidare analyser göras av möjliga felkällor i samband med provtagning, transport av prover och analys av dessa. Värden som sedan bedöms vara orimliga bör tas bort innan utvärdering görs exempelvis av erosionsparametern M .

Om de ovan presenterade resultaten bedöms vara rimliga innebär det att generalisering av bottenarnas erosionsegenskaper är mycket svår att göra. Detta visas tydligt genom att parametrarnas värde inom en plats ibland varierar avsevärt, även vid samma djup under botten.

Istället för att analysera parametrarnas beroende av djupet under botten skulle analyser relaterade till den absoluta nivån kunna vara relevanta. Detta framförallt om bottenmaterialen är ursprungliga och har avsatts på samma nivå. I det undersökta provområdet är antagligen åtminstone de ytligaste materialen nyligen sedimenterade från älven, varför det är oklart om analyser relaterade till absolutnivån skulle ge högre signifikant påverkan.

Vidare bör den i laboratoriet pålagda skjuvspänningens samband med de analyserade parametrarna studeras vidare.

Det har inte funnits möjlighet att närmare analysera samband mellan geotekniska egenskaper och erosionsegenskaper. Detta kan lämpligen göras i en fortsättningsstudie.

8.4 Samband mellan erosionsegenskaper och geotekniska egenskaper

8.4.1 Erosionsbenägenhet för bottensediment i Göta älv

Vid analys av upptagna bottensediment har dessa klassificerats som lera, siltig lera och lerig silt och flera av proverna har även innehållit gyttja. Ytliga lager av friktionsmaterial av sand och grus har även förekommit. Dessa jordar kan av olika orsaker antas uppträda olika från erosionssynpunkt (som beskrivs i kapitel 3), där friktionsjordars erosionsegenskaper är relativt väl kända i motsats till kohesiva jordar. Nedan görs därför en beskrivning av hur erosionsbenägenheten hos de kohesiva jordarterna kan förväntas påverkas av de geotekniska egenskaperna.

De erfarenheter som finns tillgängliga i litteraturen gäller i huvudsak ensgraderade material. Hur blandjordar, som naturligt är vanligt förekommande, ska hanteras ur erosionssynpunkt är därför relativt okänt. Det går förmodligen ingen skarp gräns mellan eroderbarheten för blandkorniga material vid de lerhalter som får materialen att geotekniskt benämnas som silt, lerig silt, siltig lera respektive lera utan detta sker förmodligen efter en glidande skala.

Siltjordar kan uppträda både som kohesionsjord (finsilt) och som friktionsjord (grov-silt). Grövre siltjordar är lättroderade medan finsilt liksom lera är mer svåreroderade. Gyttja (och gyttjiga jordar) är nog den jord vars erosionsegenskaper är minst kända. Det organiska materialets relativt låga densitet och det mycket låga effektivtryck som råder under vatten borde göra materialet relativt lättroderat. Å andra sidan är organiskt material ofta mer eller mindre sammanflätat och håller därmed ihop på ett annat sätt än mi-

neralpartiklar. För att närmare kunna studera det organiska materialets inverkan på erosionen och försöksresultaten måste det kvantifieras, dvs. den organiska halten måste bestämmas.

Önskvärt vore givetvis att kornstorleksfördelningen bestämdes för de olika proverna, men detta ingår normalt inte i en rutinmässig geoteknisk undersökning. Därför skulle riktlinjer baserade på detta förmodligen ha begränsad användbarhet. Istället är det viktigt att känna till och peka på andra faktorer som, utöver partikelstorlek, påverkar eroderbarheten eller som kan utgöra ett alternativ till bestämning av densamma.

Materialets flytgräns kan ofta utgöra ett indirekt mått på lerhalten. Förutsättningen är att sammansättningen av de ingående lermineralen inte varierar påtagligt, vilket kan antas vara uppfyllt för bottenmaterialet i Göta älv. En hög flytgräns kan bero på en hög lerhalt och därmed indikera en minskande eroderbarhet. Detta gäller dock endast för oorganisk jord och då det organiska innehållet blir påtagligt påverkar detta flytgränsen i hög grad och förmodligen även erosionsegenskaperna.

En annan faktor som påverkar flytgränsen är porvattnets kemiska sammansättning där ett saltinnehåll verkar sammandragande mellan partiklarna. Detta avspeglas bland annat i en högre omrörd skjuvhållfasthet och att partiklarna flockulerar i en suspension med saltvatten och vid avsättning i en marin miljö. Vid urlakning av marin lera sjunker salthalten och därmed de sammandragande krafterna och den omrörda skjuvhållfastheten, vilket avspeglas i en lägre flytgräns. Samtidigt ökar erfarenhetsmässigt eroderbarheten och en första ansats kan vara att en förändring av flytgränsen avspeglar förändringen i eroderbarhet på motsvarande sätt som en förändring i lerhalt kan antas göra. Flytgränsen bör därför bestämmas på samtliga prover, vilket också normalt görs. Flytgränsen påverkas inte av en eventuell störning av jordprovet.

Ytterligare faktorer som kan antas påverka eroderbarheten är hur sammanpressat materialet är. Detta kan utläsas ur en rad faktorer som förkonsolideringstryck, vattenkvot, konsistens- och flytindex, skrymdensitet, torrdensitet och odränerad skjuvhållfasthet. Många av dessa samband kan vara svårtolkade och för bestämning av samtliga egenskaper krävs ostörda prover. Inverkan av andra faktorer avspeglas i den odränerade skjuvhållfastheten, som är relativt lätt att bestämma och som kan uttolkas ur sonderingsresultat. Denna bör därför bestämmas för ostörda prover och om möjligt även ur sonderingsresultat. Vattenkvoten bör också bestämmas på alla ostörda prover. Bestämningar av den naturliga vattenkvoten på störda prover som tagits under vatten görs ofta men är mycket osäkra.

I detta sammanhang bör det poängteras att det är viktigt att skilja på ett materials skjuvhållfasthet och kritiska bottenskuvspänning. Skjuvhållfasthet är ett mått på styrkan av de elektrokemiska krafterna i materialet och visar vid vilken pålagd skjuvspänning som ett helt tvärsnitt av materialet samtidigt kollapsar. Den kritiska bottenskuvspänningen anger hur känsligt det kohesiva materialets våta yta är mot att turbulent strömmande vatten arbetar mot ytan (och eventuellt lösgör och lyfter enskilda partiklar eller klumpar av partiklar från densamma).

De geotekniska egenskaperna kan ge information om var det finns erosionsbenägna bottensediment men ger inte tillräckligt underlag för att kunna kvantifiera eroderade mängder.

8.4.2 Samband mellan geotekniska egenskaper och erosionsbenägenhet i litteraturen

En litteraturgenomgång har gjorts för att inventera eventuella samband mellan erosions-egenskaper och geotekniska egenskaper för kohesiva material. Av de artiklar som studerats framgår att det inte finns några generella samband mellan ett kohesivt materials erosionsegenskaper och dess geotekniska egenskaper. I flera undersökningar som redovisas i dessa artiklar har konstaterats att det är flera egenskaper som påverkar erosionsegenskaperna. Till skillnad från ett friktionsmaterial är partiklarnas gravitation inte bestämmande utan andra förhållanden och som främst styrs av elektrokemiska krafter.

I en studie (Briaud, 2005) sammanfattas erfarenheterna från flera laboratoriestudier av kohesiva materials erosionsegenskaper, se Tabell 8-5. Det finns vissa motsägelsefulla resultat men sammanfattningsvis anges följande samband (där ingen uppgift är angiven saknas samband):

Tabell 8-5. Förhållande mellan olika jordparametrar och jordens erosionsbenägenhet (Briaud, 2005).

<i>Ökning av parameters värde</i>	<i>Erosionsbenägenhet</i>
Densitet	Minskning
Vattenkvot	–
Plasticitetsindex	Minskning
Odränerad skjuvhållfasthet	Ökning
Portal	Ökning
Svällning	Ökning
Kornstorlek	–
Material mindre än 200 µm	Minskning
Lermineral	–
Dispersion	Ökning
Katjonbyteskapacitet	–
Natriumabsorption	Ökning
pH	–
Temperatur i jord	Ökning
Temperatur i vatten	Ökning
Kemisk sammansättning	–

Det bör kommenteras att sammanställningen inte anger någon slutsats för parametern kornstorlek. För friktionsjord är det väl känt att en ökad kornstorlek innebär ökat motstånd mot erosion.

8.5 Slutsatser

Sammanfattningsvis finns för kohesionsjord inga etablerade tydliga kvantitativa samband mellan erosionsparametrar och geotekniska parametrar. Det finns däremot flera geotekniska egenskaper som kan användas för att beskriva var det förkommer områden med erosionsbenägna bottenmaterial. För att kvantitativt bestämma erosionen i kohesionsjord behöver emellertid erosionsparametrarna bestämmas genom provtagning och analys av sedimenten.

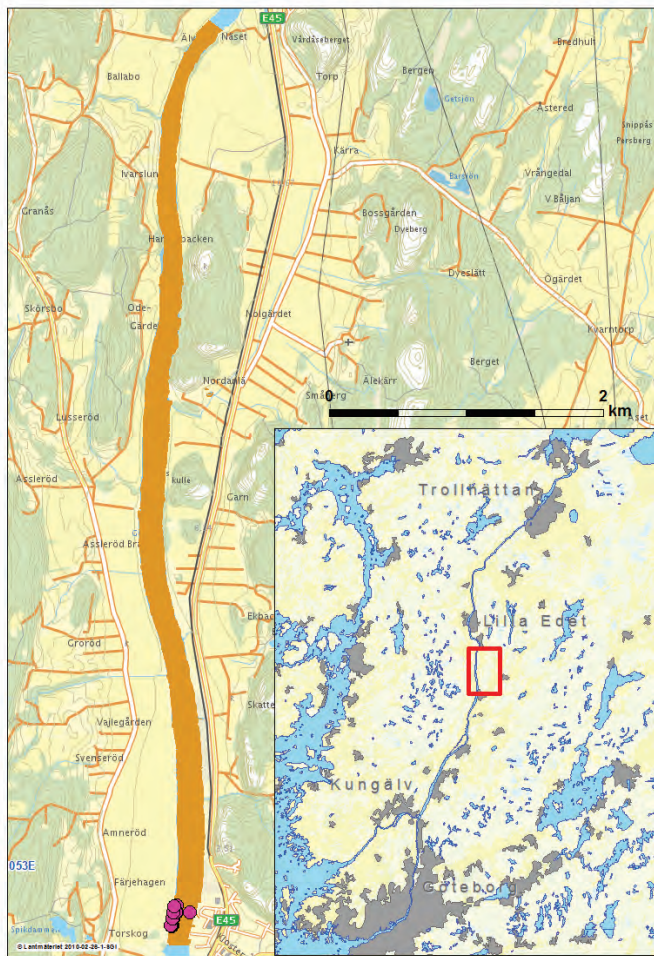
9 BERÄKNING AV EROSION

En av målsättningarna i Göta älvutredningen var att använda en kopplad hydrodynamisk/morfologisk beräkningsmodell (Delft3D-MOR, se kapitel 0) för att beräkna erosionen i Göta älv. Efterhand som erosionsutredningen fortskred visade det sig dock att det underlag som skulle krävas för att göra sådana beräkningar inte kunde tillhandahållas. I stället valdes att göra förenklade beräkningar med GIS-program.

I detta kapitel beskrivs en demonstrationsberäkning med den hydrodynamiska/morfologiska beräkningsmodellen för ett mindre område av Göta älv samt beräkning av erosion genom GIS-analyser.

9.1 Tillämpning av Delft3D-MOR

En demonstrationsberäkning med Delft3D-MOR har gjorts för sträckan mellan Lilla Edet och Lödöse enligt Figur 9-1. I demonstrationsberäkningen har grovt översiktliga indata använts, som dessutom bara gäller för en liten del av beräkningsområdet. Resultaten ska därför inte tolkas kvantitativt utan ses som ett exempel på hur modellresultat kan se ut.



Figur 9-1. Delsträcka längs Göta älv där demonstrationsberäkning utförts.

Området där beräkningen utförts inkluderar det testområde där intensivmätningar av kritisk bottenkjuvspänning gjorts (se kapitel 8). Inom området är ett tidigare skred vid

Ballabo beläget, ett område där man vet att det sker erosion, dvs. det finns bra kalibreringsdata. Indata till modellen är emellertid uppmätta i ett område där det inte finns bra kalibrerings- eller valideringsunderlag, vilket har gjort det omöjligt att kalibrera eller validera modellen. Det har inte varit möjligt att göra någon känslighetsanalys av ingående parametrar. Eventuell sedimentation finns inte heller med i beräkningsmodellen i denna beräkning.

Resultatet av demonstrationsberäkningen presenteras i kapitel 9.1.2 för ett mindre område vid Ballabo där man tydligt ser att det skett erosion. Resultaten presenteras som bilder som visar erosion och sedimentation under en period på 6,5 år.

9.1.1 Indata till demonstrationsberäkningen

Som tidigare nämnts har erosionsutredningens målsättning ändrats. Från början var målet att använda Delft3D-MOR för beräkning längs hela älven, men efterhand har det visat sig att det inte finns tillräckligt med underlagsdata för att göra denna typ av beräkningar. Den vertikala och horisontella fördelningen av de nödvändiga parametrarna som nämnts i kapitel 4.2 är mycket svårbestämd, då mätningarna har gett mycket varierande resultat.

I demonstrationsberäkningen har samma typ av kohesiva sediment använts för hela sträckan eftersom det är denna materialtyp som dominerar inom området. Att det är samma typ av material i området betyder inte nödvändigtvis att erosionsparametrarna inte varierar över området. Detta är alltså en mycket grov förenkling av verkligheten. Indata till beräkningarna av erosion baseras på de mätningar som presenteras under kapitel 8 och urvalet har gjorts av SGI. De parametervärden som använts redovisas i Tabell 9-1.

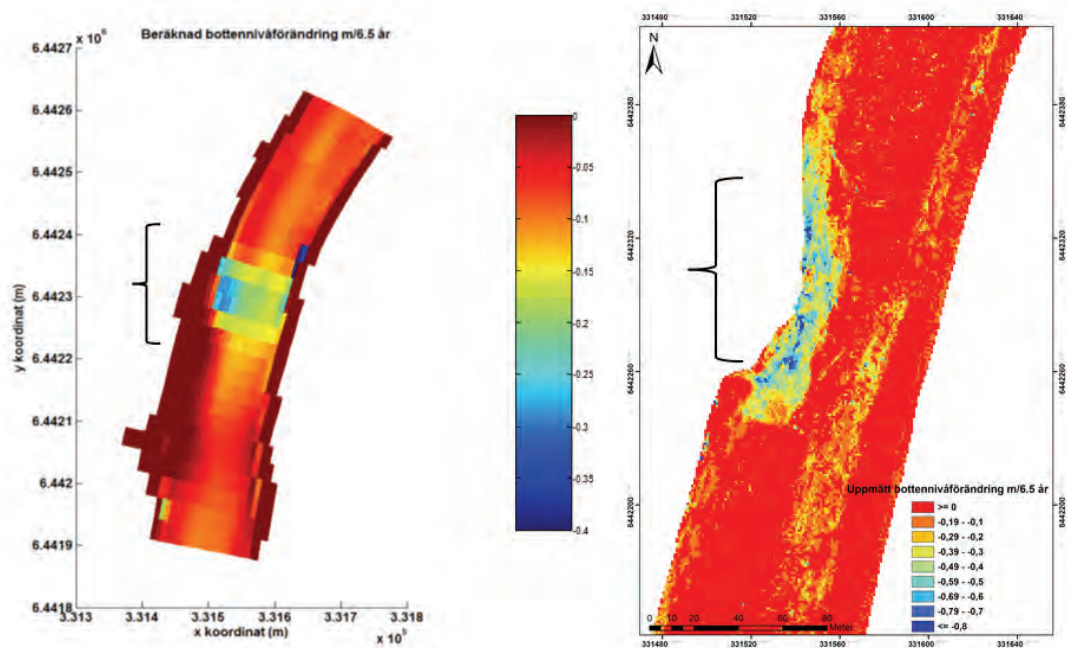
Tabell 9-1. De parametervärden som använts för erosionsberäkningar i demonstrationsberäkningen.

Parameter	Värde
τ_c	0,45 Pa
M	$0,67 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^2\text{s}$
ρ_b	2700 kg/m^3
ρ_d	925 kg/m^3

9.1.2 Demonstration av beräkning med Delft3D-MOR

I Figur 9-2 visas beräknad (till vänster) och uppmätt (till höger) bottennivåförändring vid Ballabo, mellan år 2003 – 2009 (6,5 år). I beräkningarna ingår inte någon sedimentation av material, vilket innebär att den beräknade bottennivåförändringen är noll eller mindre än noll. Den uppmätta bottennivåförändringen visar både erosion och sedimentation. Erosion visas som röda till turkosa färger och sedimentation som ljusblått till mörkblått. Det som är intressant att jämföra mellan beräknad och uppmätt bottennivåförändring är platser där det skett erosion. De svarta markörerna i figuren visar vart skredmassorna från Ballaboskredet 1996 ligger och där det också förekommer erosion.

Beräknad bottennivåförändring vid Ballabo visar att förändringarna i älvfåran är ungefär -0,15 - -0,25 m under 6,5 år. Uppmätt bottennivåförändring är på samma ställe ungefär -0,3 - -0,5 m under samma tidsperiod. På vissa ställen i området är erosionshastigheten ännu högre. Modellen visar att erosion sker på samma ställe som i mätningarna men erosionen är mindre i beräkningarna än i mätningarna.



Figur 9-2. Demonstrationsexempel på beräknad (vänster) och uppmätt (höger) bottennivåförändring vid Ballabo under perioden 1 juli 2003 till 31 december 2009. Den svarta markören visar vilket området som kan vara intressant att jämföra mellan de båda bilderna. Observera att det är olika färgskalor i de båda bilderna. I den vänstra bilden visas endast erosion, medan i den högra bilden visas erosion som röda till turkosa färger och sedimentation som ljusblått till mörkblått. Eftersom den ena uppsättningen av djupmätningar endast täcker djupfåran visas inga uppmätta bottennivåförändringar längs stränderna. Detta är också förklaringen till att vattendragets geometri ser olika ut i de båda bilderna.

Ett annat sätt att kontrollera resultaten från demonstrationsberäkningen är att jämföra den beräknade mängden sediment som lämnar området med sedimentbudgeten för Göta älv. Den torra vikten av allt sediment som lämnar området är i beräkningarna 21 kton/år. I rapport över erosionsförhållanden i Göta älv (Rydell et al., 2011) anges att 40 kton/år från bottenerosion lämnar området mellan Lilla Edet och förgreningen mellan Göta älv och Nordre älv. Observera att beräkningarna avser sträckan mellan Lilla Edet och Lödöse, vilket är ca en tredjedel av sträckan mellan Lilla Edet och förgreningen som avses i sedimentbudgeten.

9.2 GIS-analyser

Beräkningar med Delft3D-MOR förutsätter att bottenens erosionsegenskaper kan beskrivas väl. Eftersom bottenförhållanden varierar kraftigt längs älven behöver detaljerade undersökningar utföras genom provtagning i fält och undersökningar av sediment på laboratorium. Detta har inte varit möjligt inom Göta älvutredningen och det bedömdes därför vara onödigt krävande att göra erosionsberäkningarna med Delft3D-MOR. För- enklade beräkningar valdes därför att göras med GIS-program. I dessa beräkningar för-

blir bottennivåerna konstanta i beräkningen även där erosion sker. Osäkerheterna i erosionsberäkningarna bedömdes dock i betydligt högre grad orsakas av osäkerheter i bottenens erosionsegenskaper än av det förhållande att en uppdatering av botten inte kunnat utföras. I GIS-beräkningarna har inte heller sedimentation inkluderats i beräkningarna.

Inledningsvis diskuterades två olika GIS-baserade beräkningsmetoder. Den metod som slutligen genomfördes baseras på en storskalig sedimentbudget för älven där de eroderade mängderna uppskattats för olika delsträckor i älven. Denna metod beskrivs mer ingående nedan.

Den andra metoden som diskuterades baseras på en jämförelse av bottennivåerna vid två olika tidpunkter. Skillnaden mellan bottennivåerna extrapoleras framåt i tiden.

Extrapolationen kan dock relateras till hur bottenskjuvspänningarna förändras till följd av eventuella framtida förändrade flöden.

9.2.1 Grundberäkning för genomförd GIS-analys

Erosionsberäkning har genomförts i GIS med programmet ArcMap. Beräkningarna gjordes utifrån beräknade bottenskjuvspänningar och med hjälp av Partheniades-Krone's formel (enligt kapitel 3.5.2). Denna beräkningsformels egentliga användningsområde är för kohesivt material, men den har här använts för älvens samtliga bottenmaterial. Orsaken till detta var främst att en enkel modell med bara en beräkningsformel föredrogs.

Erosionsberäkningen utgick från en bedömning av den flödesorsakade erosionen, som baserades på analyser av turbiditet och suspenderat material. Den totala erosionen längs älven bedömdes som genomsnittlig massa per år. För att få den flödesorsakade erosionen reducerades den totala erosionen med den massa som bedömts erodera till följd av fartygstrafik.

Kritisk bottenskjuvspänning valdes till 95 % av bottenskjuvspänningarnas medelvärde inom varje backscatter-klass för ett flöde på 780 m³/s. Valet av detta flöde gjordes utifrån bedömningen att det motsvarade ett rimligt "erosionsflöde", dvs. det stationära flöde som avseende erosionen bäst representerar den verkliga flödesvariationen i älven. "Erosionsflödet" var en första ansats för att uppskatta de kritiska bottenskjuvspänningarna. Att de kritiska bottenskjuvspänningarna valdes till 95 % av bottenskjuvspänningarna baserades på två utgångspunkter.

För det första så skulle i de fall den kritiska bottenskjuvspänningen varit mycket lägre än den faktiska sannolikt bottenmaterialet relativt snabbt ha eroderat. Resultaten från undersökningar av sedimentprover med SETEG-metoden (se kapitel 8) visar att den kritiska bottenskjuvspänningen generellt ökar i djupled. Alltså bör en eroderande botten snart ha anpassats så att den kritiska bottenskjuvspänningen ligger strax under den faktiska bottenskjuvspänningen vid höga men vanligt förekommande flöden (som "erosionsflödet").

För det andra innebär ett antagande om kritiska bottenskjuvspänningar strax under bottenskjuvspänningarna från "erosionsflödet" att en mer konservativ extrapolering fås vid beräkningar med flöden högre än "erosionsflödet" än om de kritiska bottenskjuvspänningarna valts till lägre värden.

Att den kritiska bottenskjuvspänningen valdes lika inom vardera backscatter-klass gjordes utifrån bedömningen att dessa klasser är homogena längs älven. Detta borde innebära att det är någorlunda liknande material i alla områden med samma klass. Denna ana-

lys gav kritiska bottensskjuvspänningarna för backscatter-klasserna 1-5 enligt Tabell 9-2. Att medelvärdena för klasserna 1-3 är så pass lika kan förklaras av att bottensskjuvspänningarna är fördelade på ett likartat sätt i dessa klasser. Värdena i Tabell 9-2 kan jämföras med de värden som uppmätts på laboratorium för sedimentprover upptagna i älven, där den kritiska skjuvspänningen ofta legat i intervallet 0,4-1,2 Pa (se kapitel 8.3.1).

Tabell 9-2. Vald kritisk bottensskjuvspänning för vardera backscatter-klass. Värdena motsvarar 95 % av medelvärdet på bottensskjuvspänningarna inom vardera backscatter-klass.

Backscatter-klass	Kritisk bottensskjuvspänning, τ_c [Pa]
1	0,34
2	0,36
3	0,37
4	0,51
5	0,76

För att kunna jämföra erosionsberäkningarna med uppmätta bottennivåförändringar gjordes GIS-beräkningar för samma period som för vilken bottennivåförändringar uppmätts (1 juli 2003 - 31 december 2009). För att i beräkningarna efterlikna den verkliga flödesfördelningen under denna period gjordes erosionsberäkningar för ett flertal stationära flöden som viktades för att efterlikna den verkliga flödesfördelningen så väl som möjligt.

Utifrån Partheniades-Krone's formel tillsammans med bottensskjuvspänningar (beräknade i den hydrodynamiska modellen) för de viktade flödena, kritiska bottensskjuvspänningar från Tabell 9-2 och sedimentmängd från flödesorsakad erosion beräknades värden på erosionskonstanten enligt Tabell 9-3. Erosionskonstanten fick därmed ett konstant värde för vardera av de delsträckor för vilka de eroderade massorna bedömts.

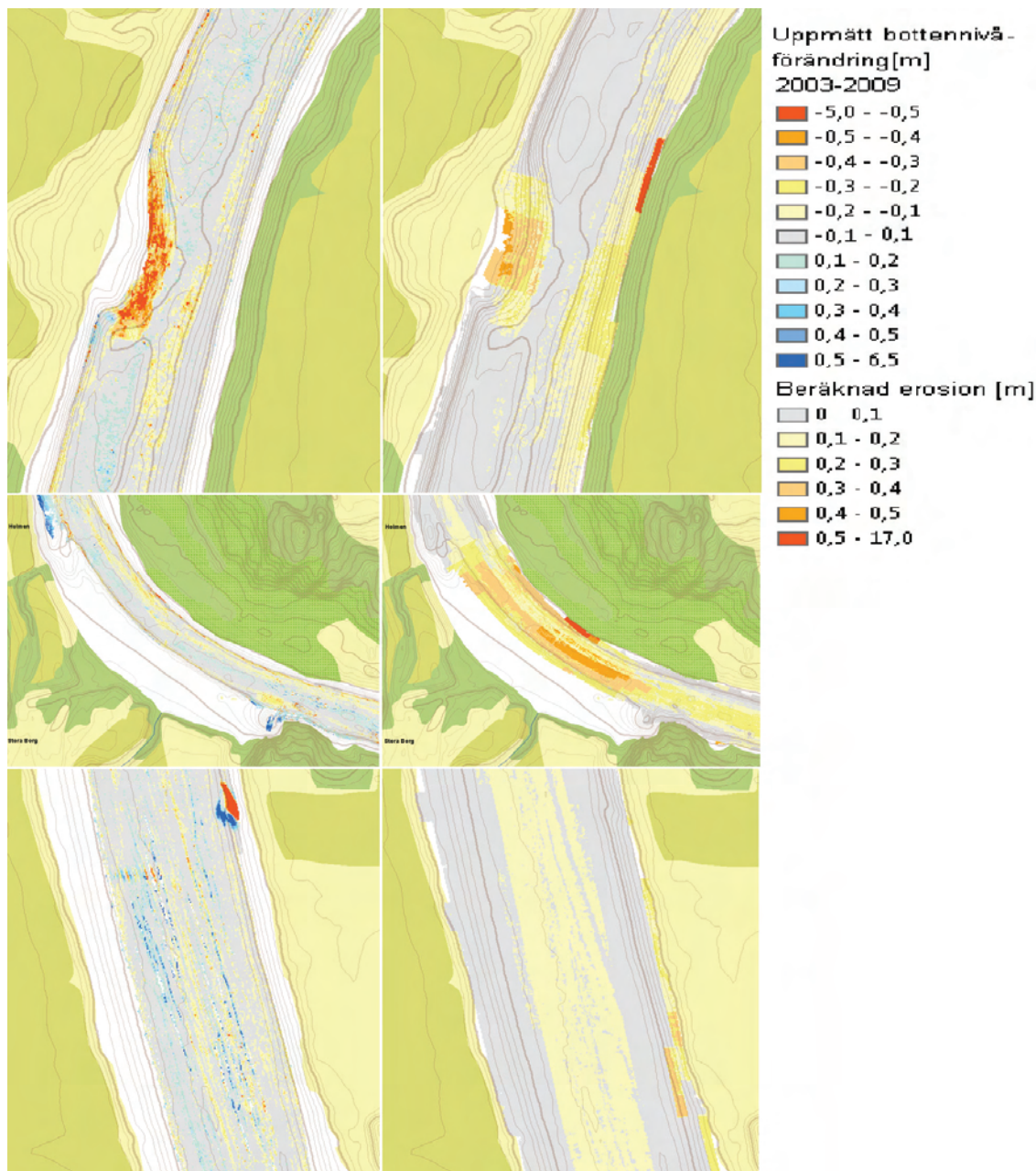
Tabell 9-3. Beräknade värden på erosionskonstanten M för olika delsträckor.

Delsträcka	Erosionskonstant, M [kg/(m ² s)]
Vänern - Lilla Edet	$1,97 \cdot 10^{-7}$
Lilla Edet - Bohus	$6,66 \cdot 10^{-7}$
Bohus - Nordre älvs fjord	$3,59 \cdot 10^{-6}$
Bohus - Göteborgs hamn	$2,60 \cdot 10^{-5}$

9.2.2 Resultat av GIS-analyser

För att undersöka hur den beräknade erosionen kan beskriva den uppmätta erosionen har olika jämförelser gjorts mellan beräknad erosion och uppmätt bottennivåförändring. En

sådan jämförelse har gjorts för tre områden längs älven och illustreras i Figur 9-3. I bilderna visas uppmätt bottennivåförändring 2003-2009 (t.v.) och beräknad erosion under 6,5 år (t.h.). Mer utförliga studier av GIS-analysernas resultat återfinns rapporten över erosionsförhållanden (Rydell, et al., 2011).



Figur 9-3. Jämförelse mellan uppmätt bottennivåförändring 2003-2009 (t.v.) och beräknad erosion över lika lång tid (t.h.) för tre områden längs Göta älv. Områdena är Ballabo (översta bilden), Göta (mellersta bilden) och Garn (nedre bilden). I figuren t.v. innebär negativa värden minskad bottennivå, medan erosion i figuren t.h. har positiva värden. Det innebär att inom områden med gul, orange och röd färg förekommer erosion. Observera att det är olika skalor i figurerna.

I det första området redovisas erosionen av skredmassorna från skredet i Ballabo 1996. Uppmätta bottennivåförändringar stämmer relativt väl med de beräknade. Att beloppen av de uppmätta förändringarna är större än den beräknade erosionen kan delvis bero på

att beräkningarna är gjorda utifrån en höjdmodell baserad på bottennivåmätningarna från 2009. Eftersom stor erosion skett sedan 2003 var antagligen bottenskjuvspänningarna högre i området med skredmassor 2003, och tänkbart är även att mängden mjukt material (omrörda skredmassor) har minskat.

Det andra området visar en kraftig kurva i älven vid Göta. De uppmätta bottennivåförändringarna är små. Mestadels är de negativa (erosion), men stråk med ökade nivåer finns längs djupfårans yttre del. Beräkningarna å andra sidan visar på stor erosion i hela kurvan. Botten är uppenbarligen inte så erosionskänslig som antagits i beräkningen.

I det tredje området från Garn har bottennivåförändring skett dels som ett mindre skred, dels genom erosion och sedimentation i ”korrasionsrännor”. Dessa förändringar kan inte beskrivas i beräkningen eftersom den inte tar hänsyn till förändringar orsakade av problem med stabilitet eller är så högupplöst att korrasionsrännorna beskrivs.

Resultaten visar att modellen verkar kunna beskriva erosionen väl i vissa typer av områden men inte i andra. En tänkbar förklaring är att de processer som styr erosionen skiljer sig åt i olika områden av älven.

9.3 Diskussion om beräkningsresultat

9.3.1 Osäkerheter vid erosionsberäkningar

Det finns flera källor till osäkerhet i beräkningar av erosion enligt ovan. En första fråga är om Partheniades – Krone’s formel gäller, vilket inte på något sätt är bevisat för bottenmaterialet i Göta älv. Felet i modellens formulering är dock omöjligt att uttala sig om innan en detaljerad mätkampanj utförts och analyserats. Den översiktliga analys av mätningarna av kritisk bottenskjuvspänning (τ_c) och erosionskonstanten (M) som gjorts indikerar exempelvis att värdena på parametern M , uppmätta i exakt samma position och prov, har mycket stor variation, dvs. den är mycket långt ifrån en ”konstant”. Linjär extrapolering av uppmätta skillnader i djupdata, lodade med några års mellanrum, kommer att vara mer exakta än en modellberäkning där den kombinerade osäkerheten i indata överstiger hundratal procent.

I en numerisk modellering tillkommer dessutom ett antal andra fel, exempelvis osäkerheter i uppskattningen av den lokala ytråheten, felaktigheter som uppstår vid interpolering av batymetrin till beräkningsnätet, den hydrauliska modellens fysikaliska giltighet (antagandet om logaritmiskt gränsskikt m.m.). Andra möjliga felkällor vid erosionsberäkningarna är t.ex. felaktigheter i beräknade bottenskjuvspänningar eller att dessa inte är beräknade med tillräcklig upplösning.

När det gäller osäkerheter i GIS-analyserna framgår av Tabell 9-3 att värdet på de beräknade erosionskonstanterna för de olika delsträckorna varierar med omkring en faktor 100. Detta kan indikera att erosionsegenskaperna har stor variation i olika delar av älven, men också att bedömningarna av flödesorsakad erosion eller kritiska bottenskjuvspänningar inte tillräckligt väl överensstämmer med de verkliga förhållandena.

9.3.2 Exempel på osäkerheter i indata och hur de påverkar det beräknade slutresultatets totala osäkerhet

Detta avsnitt beskriver hur små osäkerheter kan påverka slutresultatet om Partheniades – Krone's formel används för att beskriva processen under förutsättningen att formeln verkligen gäller. Formeln och ingående parametrar är beskriven i kapitel 0. Hastigheten hos förändringar av bottennivåer $(\partial z/\partial t)t$ fås genom att dividera E med bulkdensiteten ρ_b :

$$\partial z/\partial t = M(\tau/\tau_c - 1)/\rho_b$$

Denna förändringshastighet har enheten [m/s]. Det är uppenbart att resultatens osäkerhet blir direkt proportionell mot osäkerheter i M och är omvänt proportionell mot τ_c och ρ_b . Det är speciellt intressant att se vilket spann det finns för osäkerheterna vid kombinerade osäkerheter.

Detta kan illustreras med ett realistiskt exempel. Anta att densiteten kan mätas med en noggrannhet på $\pm 5\%$, den kritiska bottenskjuvspänningen med en noggrannhet på $\pm 10\%$ och M med en osäkerhet på $\pm 25\%$ från det "verkliga" värdet. Dessa fel bedöms vara mycket lågt uppskattade. Anta vidare att beräkningsmodellen används vid ett flöde som ger en lokal bottenskjuvspänning $\tau_w = 2 \times \tau_c$. Spannet på beräknat bottenförändringshastighet kan då bli alltifrån $(0,75 \times (2/1,1 - 1)/1,05) \times \partial z/\partial t = 0,58 \times \partial z/\partial t$, dvs. en underskattning på 42 %, till $1,25 \times (2/0,9 - 1)/0,95 \partial z/\partial t = 1,61 \times \partial z/\partial t$, dvs. en överskattning på 61 %. Noggrannheter på 5 % för densiteten, 10 % på bottenskjuvspänningen och 25 % på parametern M leder alltså till att felet i slutresultaten kan vara alltifrån -42 % och + 61 % (exklusive övriga osäkerheter). En högre men fortfarande mycket rimlig osäkerhet i den kritiska bottenskjuvspänningen på $\pm 20\%$ kan med samma resonemang som ovan ge överskattningar av bottenförändringen på upp till 97 %. De sammanlagda osäkerheterna slår med andra ord mycket hårt mot slutresultatets totala osäkerhet.

10 BEHOV AV FORSKNING OCH UTVECKLING

Utredningen om erosionsförhållandena i Göta älv har ökat förståelsen för erosionen i älven och processer kopplade till denna samt gett ett underlag till en översiktlig beskrivning av erosionsförhållandena. Samtidigt har konstaterats att det erfordras ytterligare kunskap för att kunna beskriva och beräkna erosionen, i synnerhet de lokala förhållandena. Det gäller både den erosion som sker för dagens förhållanden och klimat men även i framtiden med förändrat klimat och förändrade flödesförhållanden.

I redovisningen av erosionsförhållandena i Göta älv (Rydell et al., 2011) beskrivs behovet av kompletterande utredningar för att klargöra erosionsförhållandena dels i områden med oacceptabla skredrisker, dels övervakning av områden med otillfredsställande stabilitet. I områden med oacceptabla skredrisker för dagens förhållanden behöver kompletterande utredningar göras som underlag för behov av åtgärder för att förebygga skred. Inom de områden där det konstaterats otillfredsställande stabilitet som på längre sikt kan leda till oacceptabel risk behöver åtgärder vidtas för att övervaka erosionsprocesserna.

Med utgångspunkt från utredningen om erosionsförhållandena och denna fördjupningsstudie har konstaterats att det finns behov av ökad kunskap inom flera områden. Nedan diskuteras de områden som identifierats primärt för erosionsförhållandena i Göta älv men som även har tillämpning på andra vattendrag.

10.1 Konceptuell förståelse för erosionsprocesserna

I det fortsatta arbetet med erosion i Göta älv bör studier göras för att skapa förståelse för erosionsprocesserna. Det handlar om att relatera erosionen till förändrade omständigheter såsom landhöjning och reglering, men också till naturliga processer i olika delar av älven. En konceptuell modell av erosionsprocesserna bör upprättas baserad på tillgänglig kunskap. Successivt kan ny kunskap tillföras modellen som då kan uppdateras.

Morfologiska processer behöver också klargöras och verifieras genom tolkning av bland annat batymetriska mätningar, sidescan bilder, backscatter-analys och provtagning av bottensediment. Samband mellan olika bottenmaterial och olika typ av batymetri och uppmätta bottennivåförändringar kan vara ett led i att förstå de processer som skapar bottennivåförändringarna. Bottnar där friktionsmaterial orsakat korrusion kan inventeras genom analys av sidescan-bilder och batymetriska mätningar och ge förklaringar till lokala erosionsmönster.

Av intresse är också att analysera älvens morfologiska utveckling efter regleringen vid Lilla Edet 1916 och Vänerregleringen 1937. I erosionsutredningen har bottennivåer från 2003 och 2009 jämförts liksom mätningarna från 2009 med sektioner från 1970-talet. För att få bättre kunskaper om bottennivåförändringarna över lång tid bör jämförelser göras också med de äldre lodade sektioner som finns. Lodningarna såväl från 1960-talet som från 1899 gjordes längs hela älven, och framförallt år 1899 med mycket täta intervall. Det kan behövas viss justering av mätningarnas position, framförallt för de äldre mätningarna.

10.2 Metodik för provtagning och analys av bottensediment

Kunskap om bottenmaterialens erosionsegenskaper är avgörande för beräkningar av erosion och sedimenttransport. Erfarenheterna från erosionsutredningen visar att resultaten från undersökningar av bottenmaterialens erosionsegenskaper har mycket stor variation. En del av denna variation bedöms komma från störningar i samband med provtagning. Det finns därför behov av utveckling av metodik för fältprovtagning av bottensediment så att representativa och tillförlitliga prover kan tas. Det vore en fördel om sådan kan utföras samordnat med geotekniska undersökningar, där väl beprövade metoder för ostörd provtagning finns.

Även undersökning av erosionsegenskaperna i laboratorium behöver vidareutvecklas. Analysutrustning bör om möjligt även här samordnas med befintliga geotekniska metoder och provbehandling.

När det gäller mätningar av erosionsegenskaper som ska användas till en numerisk morfologisk modellering är det en fördel att inledningsvis utföra detaljerade mätningar i ett mindre område för att klargöra om det går att göra en tillförlitlig beskrivning av erosionsprocesserna. Metodik för att sedan överföra dessa erfarenheter till hela vattendraget behöver utvecklas.

Det har konstaterats att det inte finns entydiga generella samband mellan erosionsegenskaper och geotekniska egenskaper utan de parametrar som styr erosionen är platsspecifika och måste bestämmas lokalt. Däremot skulle geotekniska parametrar kunna användas för översiktliga bedömningar av var det förekommer områden med erosionsbenägna bottenmaterial. En systematisk sammanställning av erosionsparametrar och geotekniska egenskaper kan användas för att successivt öka kunskapen om erosionsegenskaper och samband med geotekniska egenskaper.

10.3 Undersökning av sedimenttransport

Den sedimentbudget som tagits fram för Göta älv bör förfinas för att bättre kunna bedöma hur mycket sediment som tillförs älven i sin helhet och olika delsträckor. Kunskapen om hur halter av suspenderat material och turbiditet varierar behöver studeras vidare liksom sambandet mellan dessa. Analys av sedimentens ursprung och typ av sediment behöver också klargöras för biflöden generellt och i synnerhet för sedimenttransporten från Väneren till älven.

Lokala förhållanden behöver vidare studeras, bland annat hur bottensedimenten transporteras i områden där muddringsmassor deponerats.

10.4 Erosionsskydd

Metodik för att säkerställa erosionsskyddens funktion behöver utvecklas. Större delen av stränderna längs Göta älv har försetts med erosionsskydd av sprängsten, utlagd på ursprungliga slänter. Skyddens läge och kondition under vattenytan är emellertid okänd och vissa delar av skydden kan ha glidit ner mot djupfåran.

Det kan också förekomma superturbulent erosion kring erosionsskyddens nedre kanter (eversion) som kan äventyra skyddens funktion. Lokala sådana förhållanden behöver klargöras. Likaså kan det vara intressant att studera skador och ras i strandskoningarna.

Det är önskvärt att koppla de bottennivåförändringar som skett till bottenförhållandena även när det gäller förekomst av olika typer av erosionsskydd. Områden med berg och vass samt sträckor med strandskoning kan skiljas ut och, om möjligt, kopplas till uppmätta bottenförändringar.

Det behövs också en teknikutveckling av erosionsskydd för slänter och bottnar som säkerställer skydd mot erosion och samtidigt kan utföras med hänsyn till miljön på land och i vattenområden.

10.5 Beräkning av erosion

Utförda GIS-beräkningar av erosion gav i många områden resultat som avvek från de uppmätta bottennivåförändringarna. Detta kan bero på att erosionen i stora delar av älven inte kan beskrivas med den erosionsekvation som använts i GIS-beräkningarna. I den använda ekvationen är erosionen direkt kopplad till bottenskjuvspänningen, men hänsyn kan behöva tas till andra processer som styr erosionen. I vissa delar av älven är dock bottenmaterialen fördelade på ett sätt som liknar fördelningen av bottenskjuvspänningarna, vilket indikerar att ett tämligen direkt samband bör finnas.

I de områden där erosionen kan beskrivas direkt utifrån beräknade bottenskjuvspänningar behöver giltigheten i de ekvationer som används för denna beräkning undersökas. Vidare behövs bättre kunskap om de i ekvationerna ingående parametrarna. Detta kan eventuellt fås genom laboratorieundersökningar av bottensediment på liknande sätt som utförts inom erosionsutredningen.

Modellberäkningar kan ge ett bra underlag vad gäller bottenskjuvspänningar. För att med rimlig säkerhet modellera morfologiska processer (erosion och sedimentation) i Göta älv krävs dock mer detaljerade indata som beskriver bottensedimentens erosionsegenskaper längs hela älvsträckan. Som ovan nämnts bör inledande undersökningar göras för ett mindre område, där omfattande mätningar av olika parametrar genomförs, bland annat hydrauliska och geotekniska undersökningar. På så sätt fås en helhetsbild över de förhållanden som styr erosionsförloppet och en uppfattning av variationen i testområdet. Detta kan användas för att bedöma om det är möjligt beskriva erosionsparametrarna för större områden.

10.6 Fartygstrafikens effekter

Den sammanställning som gjorts i erosionsutredningen visar att fartygstrafiken har påverkan på erosion och sedimenttransport. Det finns emellertid flera osäkra förhållanden, t.ex. hur långt effekten av fartyg når och om det främst är lokala och kortvariga effekter som uppkommer. Detta bör klargöras genom kompletterande mätningar av suspenderat material vid fartygspassage och vid olika vattenföring.

REFERENSER

Althage, J (2010). Ship-Induced Waves and Sediment Transport in Göta River, Sweden. Lund University. Division of Water Resources Engineering. Department of Building and Environmental Technology. Master thesis TVVR 10/5021.

Bergström, S, Andréasson, J, Losjö, K, Stensen, B & Wern, L (2011). Hydrologiska och meteorologiska förhållanden i Göta älvdalen – slutrapport. Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Delrapport 27. Linköping. Även publicerad som SMHI Rapport nr 2010-81.

Briaud, JL (2005). Erodibility of fine grained soils and new soil test. ASCE. Geotechnical Special Publication, GSP 135. Erosion of soils and scour of foundations.

Chao, X, Jia, Y, Shields, FD Jr, Wang SSY & Cooper, CM (2008). Three-dimensional numerical modeling of cohesive sediment transport and wind wave impact in a shallow oxbow lake. *Advances in Water Resources*, vol 31, pp 1004–1014.

Deltares (2011). Delft hydraulics software. <http://delftsoftware.wldelft.nl/> , november 2011.

Göransson, G, Persson, H & Lundström, K (2011). Transport av suspenderat material i Göta älv. Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Delrapport 4. Linköping.

Hearn, CJ (2008). *The dynamics of coastal models*, Cambridge University Press, 1 ed, Cambridge, UK.

Hjulström, F (1935). Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris. Doctoral Thesis. Uppsala University. *Bulletin of the Geol. Inst.*, vol 25, pp 221-527. Uppsala.

Houwing, EJ & van Rijn, L (1998). In Situ Erosion Flume (ISEF): Determination of bed-shear stress and erosion of a kaolinite bed. *Journal of Sea Research*, vol 39, pp 243–253.

IVA (2002). *Vattenkraften i Sverige*. Kungliga ingenjörsvetenskapsakademien (IVA).

Larsen, P (1995). Erosionsskador och skredrisk i Göta älv. Fartygstrafik kontra vattenkraft. Vattenfall utveckling. Trollhättan.

Larsen, P (1996). Erosionspåverkan från vågor i Göta älv. Fartygstrafik kontra vattenkraft. Vattenfall utveckling. Trollhättan.

Larsson, R (2009). *Jords egenskaper. Information 1*. Statens geotekniska institut. Linköping.

Kjellin, B (2011). Personlig kommunikation.

Rydell, B, Arvidslund, O & Fallsvik, J (2007). Undersökningar i strandnära områden. SGI Varia 573. Statens geotekniska institut. Linköping.

Rydell, B, Blied, L & Persson, H (2011). Erosionsförhållanden i Göta älv. Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Delrapport 1. Linköping.

SGF (1996). *Geoteknisk fälthandbok – allmänna råd och metodbeskrivningar*. Svenska Geotekniska Föreningen. Linköping.

SGF (2004). *Fälthandbok miljötekniska markundersökningar*. Svenska Geotekniska Föreningen. Linköping.

Sundborg, Å & Norrman, J (1963). Göta älv. Hydrologi och morfologi med särskild hänsyn till erosionsprocesserna. Sveriges Geologiska Undersökning, SGU. Rapport Ca 43.

Tengberg, B, Almroth, E & Hall, P (2002). Resuspension and its effects on organic carbon recycling and nutrient exchange in coastal sediments: in situ measurements using new experimental technology. Department of Analytical and Marine Chemistry. Göteborg University.

US Army Corps of Engineers (2006). Engineering and Design - Hydraulic Design of Deep Draft Navigation Projects. Department of the Army, US Army Corps of Engineers, publication number EM 1110-2-1613, chapters 3-8.

Van Rijn, L (2007). Unified view of sediment transport by currents and waves. Part I, II, III and IV. ASCE. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 133, no 6 and 7.

Wahl, T, Regazzoni, PL & Erdogan, Z (2009). Practical improvements for the hole erosion test. 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment. Vancouver, BC, Canada.

White, FM (2003). Fluid Mechanics. McGraw-Hill, 5 ed, New York, USA.

Witt, O & Westrich, B (2003). Quantification of erosion rates for undisturbed contaminated cohesive sediment cores by image analysis. Institute of Hydraulics, University of Stuttgart, Germany

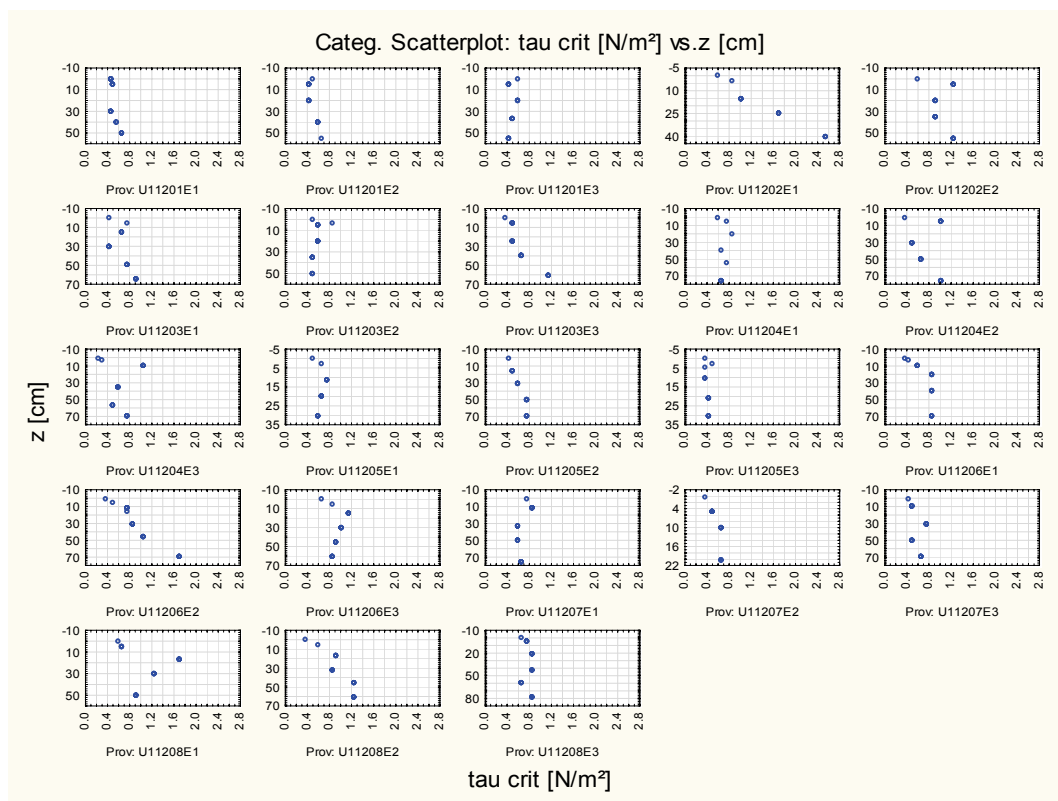
Åström, S, Eklund, D & Lindahl, S (2011). Hydrodynamisk modell för Göta älv. Underlag för analys av vattennivåer, strömhastigheter och bottenskjuvspänningar. Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Delrapport 3. Linköping. Även publicerad som SMHI Rapport nr 2011-36.

Bilaga 1

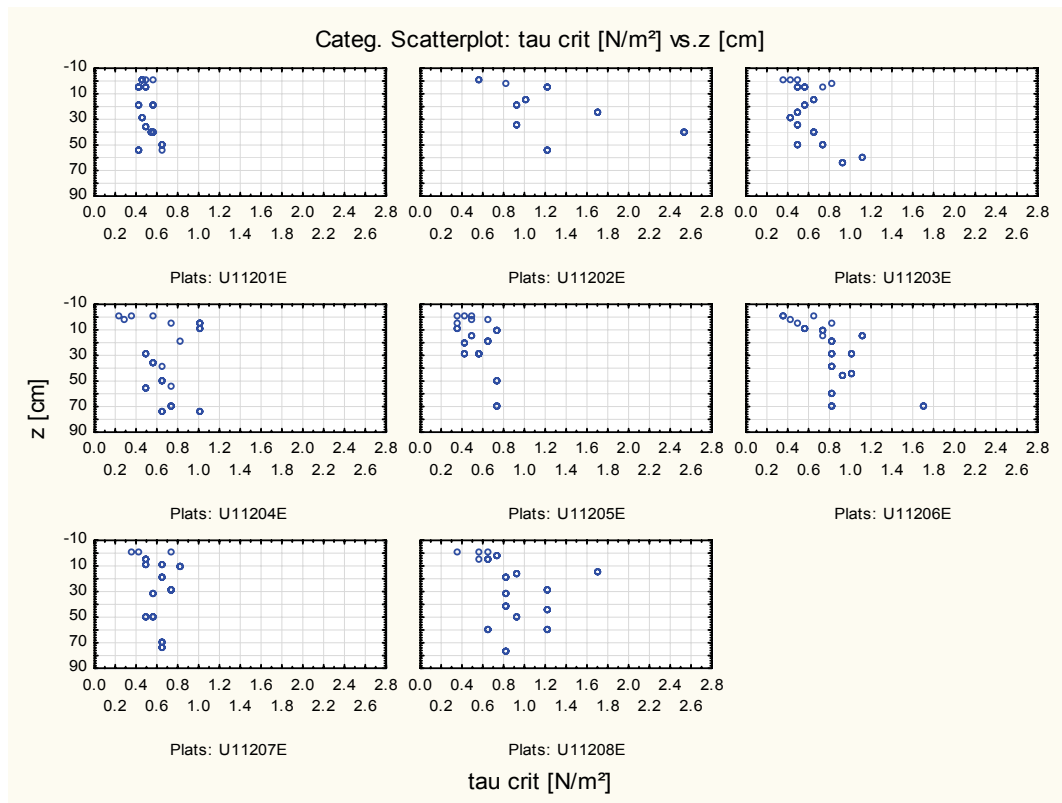
Göta älvtredningen

Erosionsförhållanden

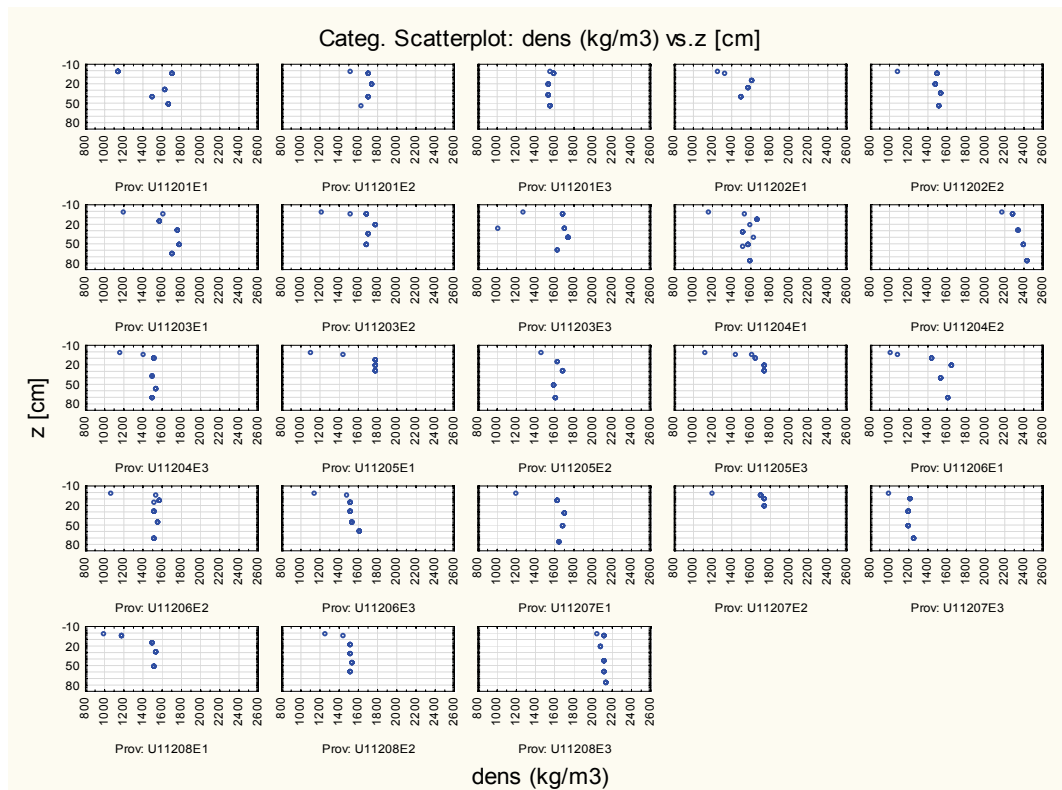
Sammanställning av laboratorieundersökningar av botten sediment från Göta älv



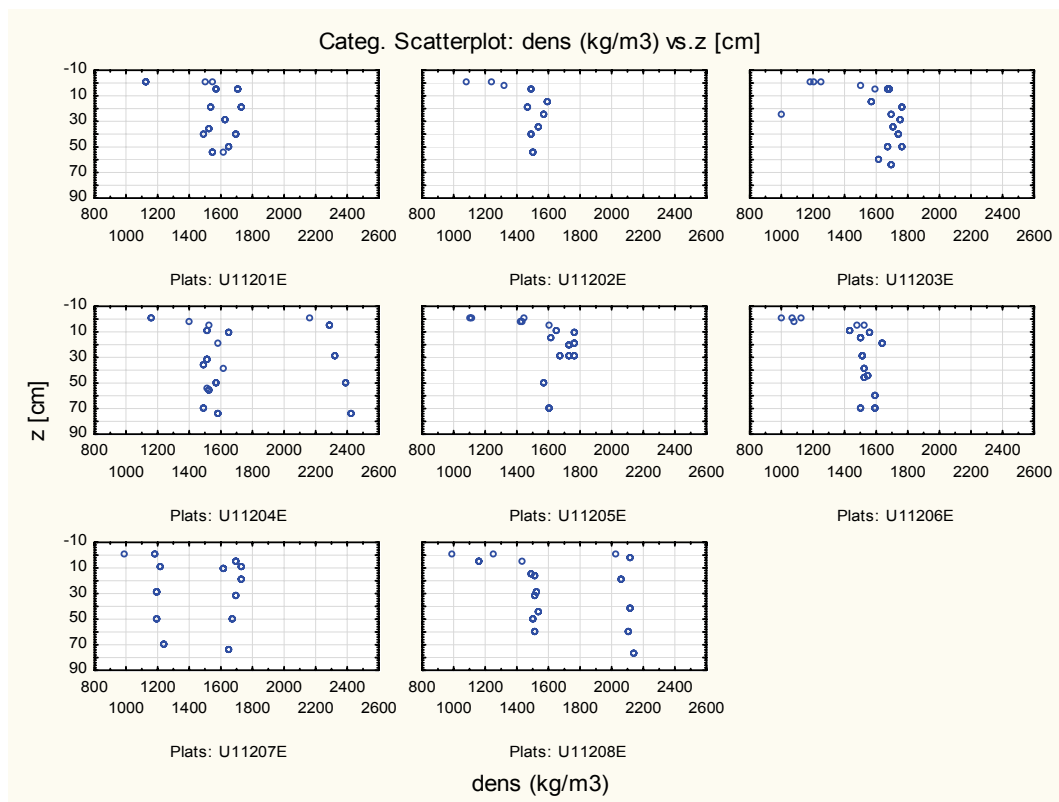
Figur B1. Den kritiska bottenkjuvspänningens beroende av djupet under botten i olika prover.



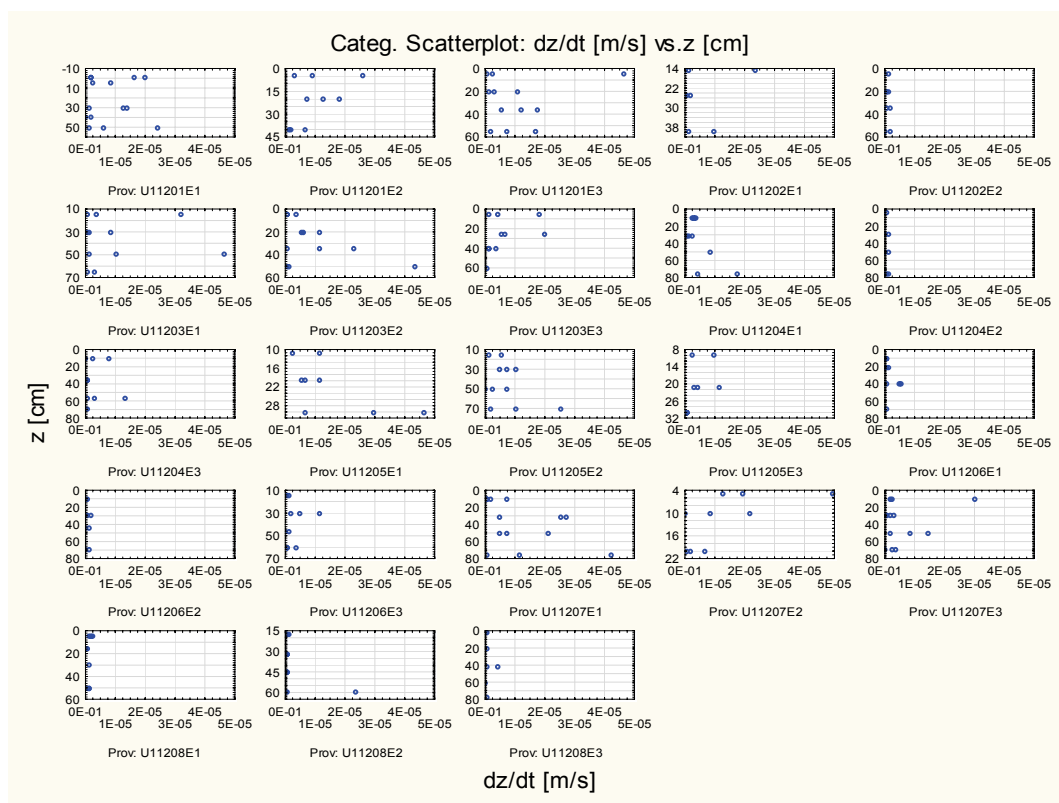
Figur B2. Den kritiska bottenskjuvspänningens beroende av djupet under botten på olika platser.



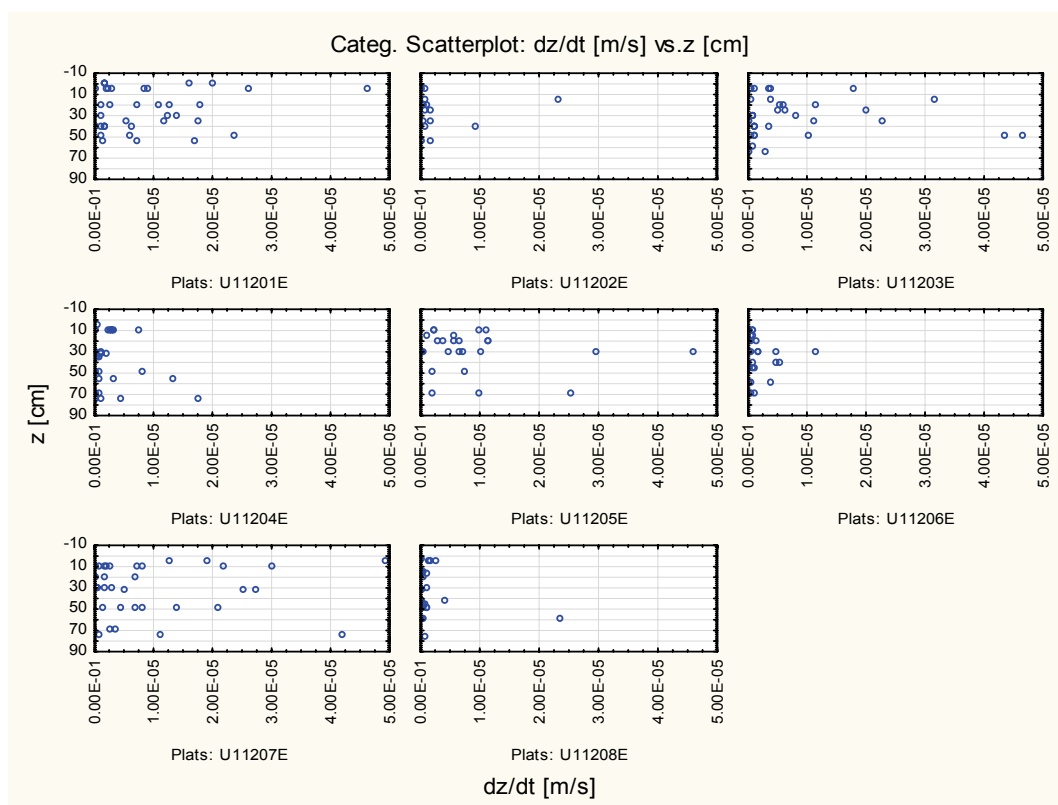
Figur B3. Densitetens beroende av djupet under botten i olika prover.



Figur B4. Densitetens beroende av djupet under botten på olika platser.



Figur B5. Erosionshastighetens beroende av djupet under botten i olika prover.



Figur B6. Erosionshastighetens beroende av djupet under botten på olika platser.

Göta älvutredningen, GÄU delrapporter 1-34

- 1 Erosionsförhållanden i Göta älv
- 2 Fördjupningsstudie om erosion i vattendrag
- 3 Hydrodynamisk modell för Göta älv. Underlag för analys av vattennivåer, strömhastigheter och botten-skjuvspänningar
- 4 Transport av suspenderat material i Göta älv
- 5 Ytgeologisk undersökning med backscatter - Analys för Göta älv och Nordre älv
- 6 Bottenförhållanden i Göta älv
- 7 Bedömning av grundvattenförhållanden för slänter längs Göta älv - Allmän vägledning
- 8 Känslighetsanalys för variationer i grundvattennivå och val av maximala portryck i slänter längs Göta älv – Exempel från en slänt
- 9 Bedömd förändring av maximala grundvattennivåer i Göta älv dalen till följd av förändrat klimat
- 10 Studie av portryckens påverkan från nederbörd och vattenståndsvariation i tre slänter längs Göta älv
- 11 Analys av uppmätta portryck i slänterna vid Äsperöd och Åkerström
- 12 Metodik för inventering och värdering av konsekvenser till följd av skred i Göta älv dalen
- 13 Metodik konsekvensbedömning - Känslighetsanalys, klassindelning och applicering av metodik i hela utredningsområdet
- 14 Metodik konsekvensbedömning - Bebyggelse
- 15 Metodik konsekvensbedömning - Kartläggning, exponering, sårbarhet och värdering av liv
- 16 Metodik konsekvensbedömning - Sjöfart
- 17 Metodik konsekvensbedömning - Väg
- 18 Metodik konsekvensbedömning - Järnväg
- 19 Metodik konsekvensbedömning - Miljöfarliga verksamheter och förorenade områden
- 20 Metodik konsekvensbedömning - Naturmiljö
- 21 Metodik konsekvensbedömning - Energi och ledningsnät
- 22 Metodik konsekvensbedömning - VA-system
- 23 Metodik konsekvensbedömning - Näringsliv
- 24 Metodik konsekvensbedömning - Kulturarv
- 25 Metodik konsekvensbedömning - Känslighetsanalyser
- 26 Metodik konsekvensbedömning - Bebyggelse och kartläggning, exponering, sårbarhet och värdering av liv - Fallstudie Ale kommun
- 27 Hydrologiska och meteorologiska förhållanden i Göta älv dalen
- 28 Metodbeskrivning sannolikhet för skred: kvantitativ beräkningsmodell
- 29 Kartering av kvicklereförekomst för skredriskanalyser inom Göta älvutredningen. Utvärdering av föreslagen metod samt preliminära riktlinjer
- 30 Quick clay mapping by resistivity – Surface resistivity, CPTU-R and chemistry to complement other geotechnical sounding and sampling
- 31 Inverkan av förändringar i porvattnets kemi, främst salturlakning, på naturlig leras geotekniska egenskaper – Litteraturstudie
- 32 Hantering av kvicklereförekomst vid stabilitetsbedömning för Göta älv – Riktlinjer
- 33 Metodbeskrivning för SGI:s 200 mm diameter "block-provtagare" - Ostörd provtagning i finkornig jord
- 34 Sjömätning - Göta älv och Nordre älv



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