



Statens geotekniska institut

Skredrisker i ett förändrat klimat – Norsälven

Framtida erosion i Norsälven med hänsyn till
klimatförändring

Del 3: Fördjupningsbilaga

Gunnel Göransson, Jim Hedfors, Godefroid Ndayikengurukiye,
Linda Blied, Karin Odén



SGI Publikation 18-3

Linköping 2015

SGI Publikation 18-3

Hänvisa till detta dokument på följande sätt:
Göransson, G, Hedfors, J, Ndayikengurukiye, G,
Blid, L, Odén, K (2015). Skredrisker i ett förändrat
klimat – Norsälven. Framtida erosion i Norsälven
med hänsyn till klimatförändring. Del 3: Fördjup-
ningsbilaga. Statens geotekniska institut, SGI. Pub-
likation 18-3, Linköping.

Diarienummer: 1.1-1305-0367

Uppdragsnummer: 15088

Beställning:

Statens geotekniska institut
Informationstjänsten
581 93 Linköping
Tel: 013-20 18 04
E-post: info@swedgeo.se

Ladda ner publikationen som PDF
www.swedgeo.se



Statens geotekniska institut

Skredrisker i ett förändrat klimat – Norsälven

Framtida erosion i Norsälven med hänsyn till
klimatförändring

Del 3: Fördjupningsbilaga

Gunnel Göransson
Jim Hedfors
Godefroid Ndayikengurukiye
Linda Blied
Karin Odén

SGI Publikation 18-3

Linköping 2015

Förord

Samhället behöver anpassas till den pågående klimatförändringen. Det finns en stor mängd befintlig bebyggelse och infrastruktur som behöver anpassas för att klara förändringen i bland annat nederbörd och vattenflöden samt stigande havsnivåer. Dessutom behöver samhället ta hänsyn till klimatförändringen och dess konsekvenser vid planering av ny bebyggelse och infrastruktur. Anpassningsarbetet är komplext eftersom det inbegriper flera olika ämnesområden, osäkerheter över långa tidsperspektiv och för att det bygger på kunskap som ständigt uppdateras, i och med att klimatforskningen utvecklas i snabb takt. För effektiv klimatanpassning krävs inte bara planeringsunderlag och beslutsstöd som är flexibla, ämnesövergripande och tar hänsyn till lokala variationer, utan som också gör det möjligt att samordna olika åtgärder på regional nivå.

SGI har sedan 2009 tilldelats medel från anslag 1:10 Klimatanpassning för klimatanpassningsinsatser genom bland annat skredriskkarteringar, metodutveckling och nyttiggörande av material från karteringarna.

Under åren 2012-2013 nyttiggjorde SGI materialet från Göta älvutredningen (GÄU) (SGI 2012) som pågick mellan år 2009 och 2011, samt identifierade ytterligare vattendrag som är prioriterade för kartläggning av skredrisker (Bergdahl et al 2013). Norsälven är det första vattendraget att kartlägga efter GÄU, och har fungerat som ett pilotområde för utveckling av en förenklad metodik avseende skredriskkartering. Utredningen längs Norsälven bygger vidare på den metodik som togs fram inom GÄU och syftar till att ge ett tillräckligt bra underlag för vidare analys i kommuners och länsstyrelsernas arbete med klimatanpassning.

Utredningens resultat och slutsatser presenteras i föreliggande rapport ”Skredrisker i ett förändrat klimat – Norsälven”, bestående av tre delar:

- **Del 1 – Kartredovisning och sammanfattning av resultat**, innehåller en sammanfattning av uppdraget samt hur materialet kan användas i klimatanpassningsarbetet i kommuner och län. Här finns också en redovisning av skredriskerna i kartform. Kartorna innehåller både skredrisker för dagens förhållanden och en bedömd känslighet för klimatpåverkan längs älven.
- **Del 2 – Metod för kartläggning**, innehåller en beskrivning av utredningens metodik, inventeringar, undersökningar, beräkningar och analyser.
- **Del 3 – Fördjupningsbilagor**, innehåller fördjupade beskrivningar av den använda metodiken för erosionsanalys och konsekvensanalys.

Arbetet har i huvudsak utförts av medarbetare på SGI och organiserats som ett huvuduppdrag för projektledning samt ett antal deluppdrag för metodutveckling, analys och utredning. Arbetet har letts av en uppdragsledningsgrupp bestående av Karin Bergdahl (huvuduppdragsledare), Karin Odén (biträdande huvuduppdragsledare), Gunnel Göransson och Hjördis Löfroth. Charlotte Cederbom har varit internbeställare. Förutom ovanstående har Rebecca Bertilsson, Daniel Elm, Åsa Jönsson, Ramona Kiilsgaard, Godefroid Ndayikengurukiye och Stefan Turesson varit deluppdragsledare. GIS-analyser och GIS-applikationer har gjorts av Mats Öberg, Jim Hedfors och Godefroid Ndayikengurukiye. Bo Lind har varit interngranskare. Sammanlagt har ett 30-tal SGI-medarbetare bidragit i arbetet, se vidare Kapitel 2.2 i Del 2 Metod för kartläggning.

Samverkan har också skett med andra myndigheter och forskningsinstitut bland annat Sveriges geologiska undersökning (SGU), Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) och Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI), Kil och Karlstad kommuner, Länsstyrelsen Värmlands län samt Trafikverket. Ett antal konsulter har även nyttjats för framtagande av underlag och beräkningar.

Beslut om publicering har tagits av avdelningschef Charlotte Cederbom.

Innehållsförteckning

Summary	8
Sammanfattning	9
1 Inledning	10
1.1 Sedimenttransport och erosion.....	10
1.2 Norsälven.....	11
2 Syfte och mål.....	13
3 Genomförande.....	14
3.1 Arbetsgång	14
3.2 Styrande ekvationer	14
3.3 Beräkningsunderlag.....	18
3.4 Modeller	20
4 Resultat av erosionsberäkningarna	33
4.1 Arbetsyta i QGIS.....	33
4.2 Bottenerosion, GIS	34
4.3 Bankerosion i sektioner, BSTEM.....	40
4.4 Sammanvägning av bankerosion och bottenerosion i beräkningssektioner	43
4.5 Bedömning av rimlighet i resultaten	47
4.6 Osäkerheter	48
5 Slutsatser och rekommendationer	50
Referenser.....	51

Bilagor

1. PM Hydrodynamisk modell av Norsälven (SMHI)
2. Sedimentationsanalyser Laboratorieprotokoll
3. PM Jämförelse mellan gamla och nya sektioner
4. PM Erosionsberäkning i GIS/Matlab
5. PM Diakroniska analys av Norsälvens stränder

Summary

The report describes methodology and results of erosion calculation in the river Norsälven, Sweden, taking into account possible effects of climate change by 2100. The methodology is a modification of the methodology that was developed within the Göta River Commission. The work has been carried out as part of the “*Landslide Risk in a Changing Climate – Norsälven River*” mandate, which in turn is a part of the government’s allocation 1:10 for climate adaptation efforts.

The aim has been to calculate future erosion in the river Norsälven in order to provide a basis for the calculation of landslide probability with respect to climate change. The calculation has been based on geological and sedimentological data, river flow data, bathymetric data, hydrodynamic modelling, and comparison between old and new cross sections, analysis of shore displacement between 1965 and 2013, and climate analysis for Värmland County.

The river valley is dominated by cohesive sediments; hence calculations have been performed for cohesive materials. The basic equations for the calculation of erosion in cohesive sediments and for a given time period is fairly simple however the parameters of the equation are very difficult to determine with good precision. In addition, there are uncertainties in future climate scenarios and their effects. An accuracy better than 0.5 m has therefore not been considered necessary.

Two hydro power plants are constructed in the river at Frykforsen and Edsvalla. The river stretch were therefore divided into three areas; North) the inlet from the lake Fryken to the Frykfors hydro power plant, Middle) downstream Frykfors hydro power plant to the Edsvalla hydro power plant and, South) downstream Edsvalla hydro power plant to the river’s outlet in lake Vänern.

The calculation of bottom erosion has been done with GIS and covers almost the entire river bottom. Calculation of bank and toe erosion was done for seven selected cross sections, representative of different geological and geotechnical settings along the river valley.

The average river flow (MQ) is about 51 m³/s and the mean high water flow (MHQ) is approximately 190 m³/s. The climate analysis indicates that the average flow will decrease marginally, and that the flow peaks will be smoothed out. The duration of high flow will increase until about year 2050 and then decrease slightly.

The river Norsälven is moderately meandering but the erosion processes are so slow that no major changes in shore displacement is clearly visible within a period of nearly 50 years. The results indicate that most of the erosion probably occurs at very high flow rates, i.e. just below 300 m³/s and up, and that the duration of such flow by year 2100 probably ends up around 150 days. The stretch Edsvalla-Vänern seems to be most sensitive to erosion, while the stretch Fryken to the first bend before the hydro power plant at Frykfors seems to be least prone to erosion.

Sammanfattning

Denna rapport beskriver metodik och resultat av erosionsberäkningar i Norsälven, sträckan Fryken-Vänern, med hänsyn till möjliga effekter av klimatförändring fram till år 2100. Metodiken är en modifiering av den metodik som togs fram inom Göta älvutredningen. Arbetet har utförts som ett deluppdrag inom uppdraget *"Skredrisker i ett förändrat klimat – Norsälven"*. Syftet med erosionsuppdraget har varit att beräkna framtida erosion i Norsälven med hänsyn till klimatförändring och att leverera underlag till det deluppdrag som ansvarar för att beräkna skredssannolikhet med hänsyn till klimatförändring.

Beräkningsunderlaget har baserats på geologisk beskrivning av området, flödesdata, bottenundersökningar, hydrodynamisk modellering, tidigare lodade sektioner, analys av strandförskjutning samt klimatanalys för Värmland.

Älven domineras av kohesivt material och beräkningar har utförts för kohesivt material. Den grundläggande ekvationen för beräkning av erosion i kohesivt material och för en given tidsperiod är tämligen enkel men de ingående parametrarna i ekvationen är mycket svåra att bestämma med god säkerhet. Till det kommer osäkerheterna i framtida klimatscenarier och effekterna av dessa. En noggrannhet i beräkningarna bättre än $\pm 0,5$ m har därför inte bedömts som nödvändigt.

Två kraftstationer är anlagda i älven vid Frykforsen och Edsvalla och älven delades därför upp i tre delområden: Fryken-Frykfors, Frykfors-Edsvalla och Edsvalla-Vänern. Beräkning av bottenerosion är ytäckande och har gjorts i GIS. Beräkning av bankerosion (slänt under vatten) har gjorts för sju utvalda sektioner, representativa för olika delområden längs älven.

Medelflödet i älven är idag cirka $51 \text{ m}^3/\text{s}$ och medelhögsvattenföringen ligger på cirka $190 \text{ m}^3/\text{s}$. Klimatanalysen visar att medelflödet kommer att minska marginellt och flödestopparna jämnas ut. Varaktigheten för höga flöden kommer att öka fram till cirka år 2050 för att därefter minska något.

Norsälven är måttligt meandrande men erosionsprocesserna är så långsamma att inga stora förändringar hinner uppstå inom en tidsram på knappt 50 år. Resultat av erosionsberäkningarna visar att erosion troligen främst sker vid mycket höga flöden, det vill säga strax under $300 \text{ m}^3/\text{s}$ och uppåt. Resultaten visar också att varaktigheten för sådana flöden fram till år 2100 förmodligen hamnar runt 150 dygn. Sträckan Edsvalla-Vänern verkar vara mest erosionskänslig medan sträckan Fryken till första kröken innan kraftstationen vid Frykfors verkar vara minst erosionsbenägen.

Metodiken som sådan för att beräkna erosion är framkomlig men tidskrävande och det finns behov av förbättringar.

1. Inledning

Föreliggande rapport är resultatet av det deluppdrag som arbetat med att försöka beräkna framtida erosion i Norsälven med hänsyn till klimatförändring och är ett av flera deluppdrag inom uppdraget *”Skredrisker i ett förändrat klimat – Norsälven”*.

I skredriskkarteringen ingår att beräkna sannolikheten för skred med och utan hänsyn till klimatförändringen. De klimatförändringsparametrar som berörs är en förändring av älvgeometrin (tvärsnitt) till följd av erosion orsakad av framtida flöden samt förändringar i portryck orsakad av framtida nederbörd och dess påverkan på grundvattennivåer. Förändringar i erosion och portryck är därför de klimatparametrar som främst påverkar sannolikheten för skred i framtiden. Med framtid avses här år 2100 eftersom de klimatanalyser som finns att tillgå sträcker sig hit.

Erosionen ger en förändring i älvgeometrin och det övergripande syftet inom detta deluppdrag har därför varit att försöka beräkna denna förändring med hänsyn till klimatförändring. Det arbete som gjordes i Göta älvutredningen (Göransson et al. 2011; Klingberg 2011; Marin Miljöanalys AB 2011; Rydell et al. 2011a och b; Åström et al. 2011) har legat till grund för den förenklade och modifierade metodik som presenteras här.

Gunnel Göransson har varit uppdragsledare för deluppdraget Erosion och är huvudförfattare till denna rapport. Därtill har ett flertal personer varit involverade i erosionsberäkningarna, dessa är: Karin Lundström, Linda Blied, Jim Hedfors, Godefroid Ndayikengurukiye, Karin Odén och Bengt Rydell. Samverkan har även skett med SMHI: Dan Eklund, Kristoffer Hallberg och Maja Wänström.

Författarna till denna rapport vill rikta ett tack till Johan Kling, Havs- och vattenmyndigheten, samt Søren Tjerry och Jonas Althage, DHI group, för värdefulla diskussioner. Författarna vill rikta ett särskilt stort tack till Claes Kjörk, Fortum, för all dataleverans om Norsälven och till Prof. Magnus Larson, Lunds Universitet, för kvalitetsgranskning av rapporten.

1.1 Sedimenttransport och erosion

När det strömmande vattnets kraft är tillräckligt stark kommer partiklar att lossgöras och föras med det strömmande vattnet. I älvar som för med sig sediment kommer det att ske en utväxling av partiklar på botten där några sedimenterar medan andra dras loss, och när det försvinner mer partiklar än vad som avsätts uppstår erosion.

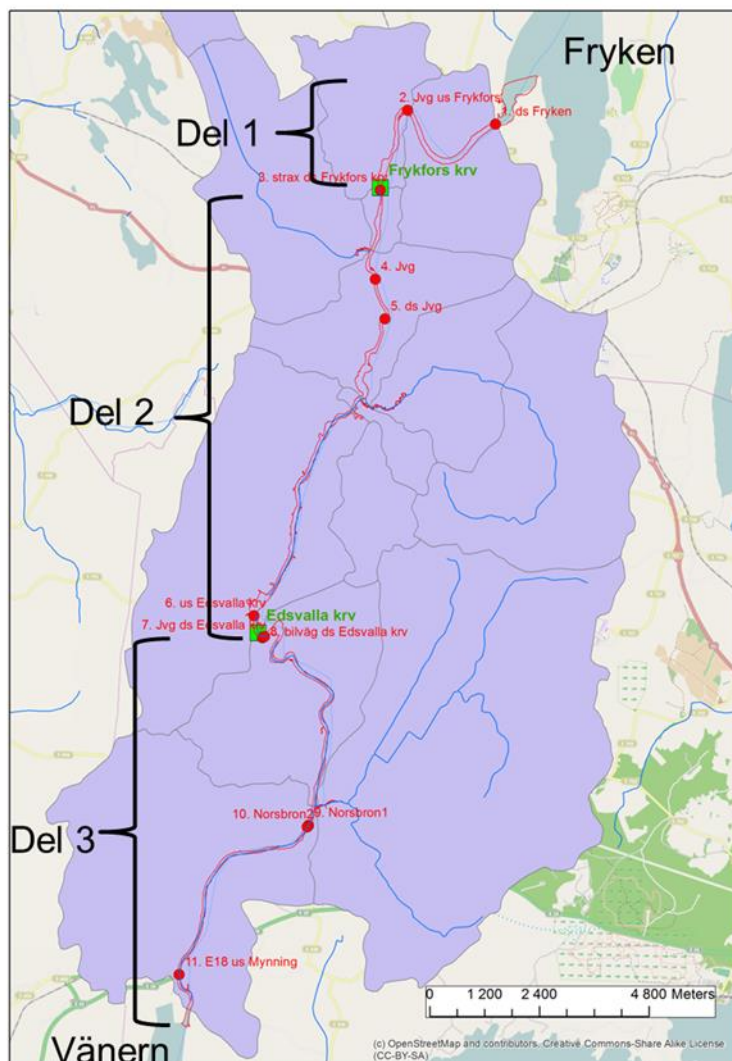
Sedimenttransport hänvisar till transporten av både fina material och grövre material (dvs. lera, silt, sand, grus och sten). Ett förenklat antagande är att sedimenttransporten till övervägande del påverkas av bottenlutningen, flödesdjup och flödes hastighet, samt sedimentpartiklarnas storlek och sedimentens fallhastighet (Chanson, 2004). De krafter som verkar på en sedimentpartikel är framförallt lyftkraft, gravitation och dragkraft. Därtill påverkar kohesiva krafter, biofilmbildning, konsolidering etcetera. Gravitation (och kohesion, biofilm) är den stabiliserande kraften och övriga krafter (drag-, lyft- och flytkraft) är destabiliserande och när inverkan av de destabiliserande överstiger de stabiliserande börjar partiklar att mobiliseras. Tröskeln för mobilisering kan dock inte beräknas exakt men många experimentella observationer har visat på någorlunda korrekta och konsekventa resultat (Chanson, 2004).

1.2 Norsälven

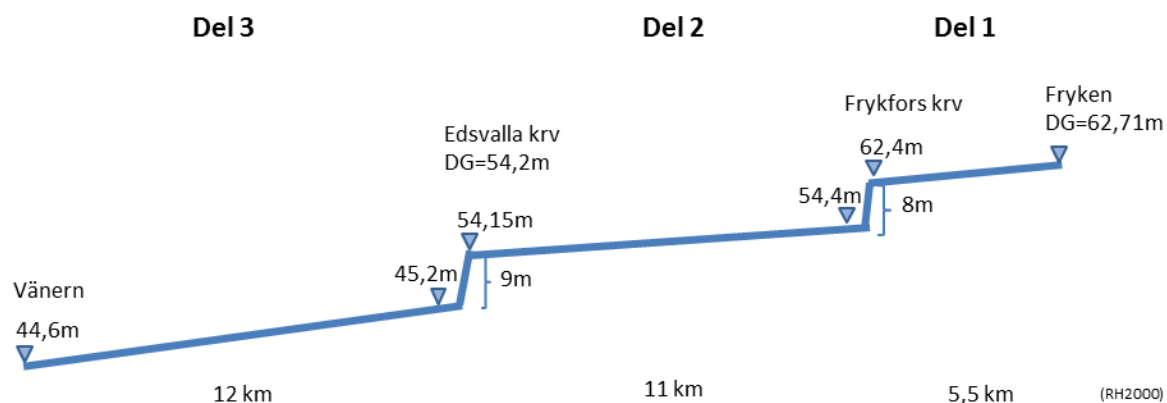
Norsälven (Figur 1) är en del av Göta älvs huvudavrinningsområde som har en totalarea av cirka 50 100 km² varav avrinningsområdet för Norsälven med Frykensjöarna är cirka 4170 km². Denna studie avser Norsälvens sträcka nedströms Nedre Frykensjöns utlopp och Vänern. Den totala sträckan är ca 28 km. Flödet i Norsälven regleras vid två kraftstationer belägna vid Frykfors och Edsvalla. Kraftstationerna är automatiserade och ägs och drivs av Fortum. Ingen korttidsreglering sker och det är tillrinningen som styr flödet och tappningen, det vill säga flödet är starkt kopplat till nederbörd. Kraftbolaget har ett avtal med Räddningstjänsten i Karlstad om att inte minska tappningen för snabbt efter höga flöden för att på så sätt minska risken för erosion och därmed skred.

Kraftstationerna är lokaliserade vid naturliga bergsklackar och nivåskillnaderna mellan Fryken, Frykfors kraftstation, Edsvalla kraftstation och Vänern framgår av Figur 2. I och med kraftstationerna har Norsälven delats upp i tre delar (Figur 1 och 2): Fryken-Frykfors, Frykfors-Edsvalla, Edsvalla-Vänern. Landskapskaraktären skiljer sig också åt mellan dessa delar där särskilt den mittersta delen (Frykfors-Edsvalla) utmärker sig genom ett tydligt ravinlandskap med branta slänter ner mot älven.

Flödesstatistik redovisas i Tabell 1 och Figur 3. Geologisk beskrivning över Norsälven har tagits fram av SGU på uppdrag av SGI och redovisas i Påsse (2013).



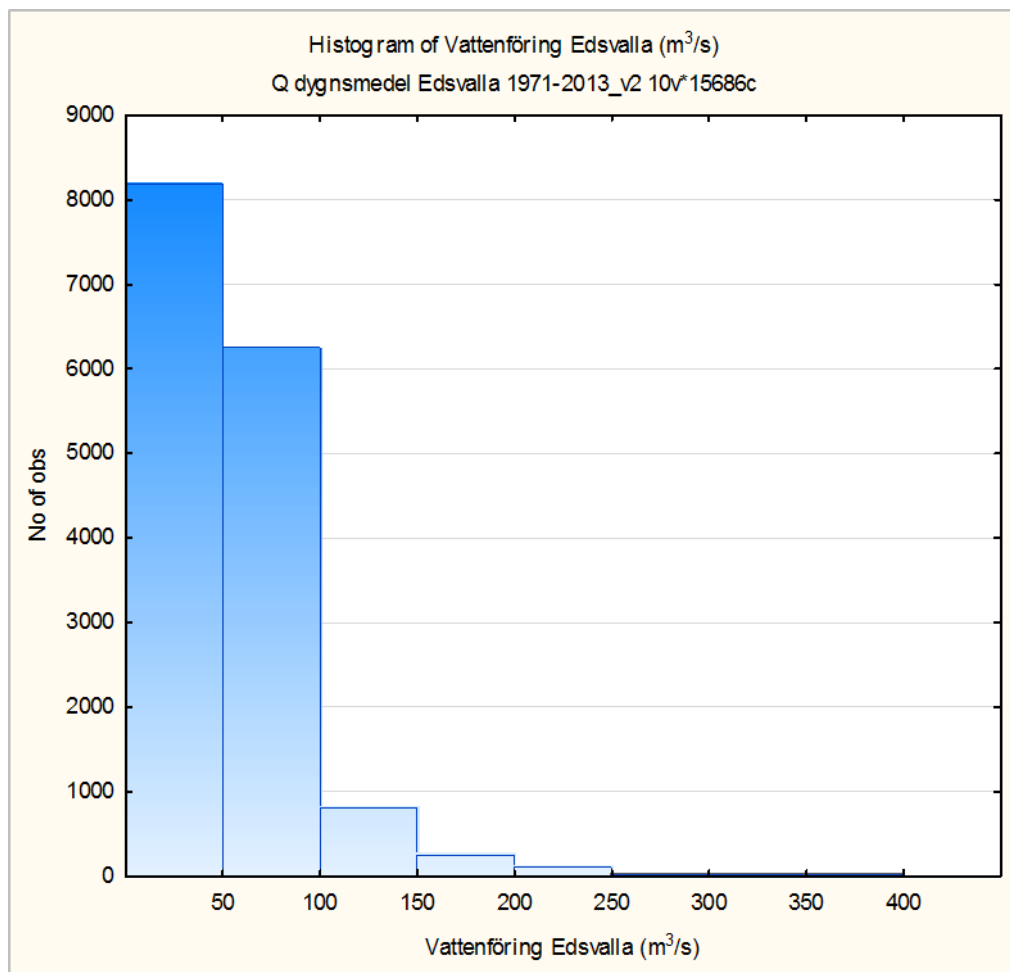
Figur 1. Norsälven uppdelad i tre delar, separerade av kraftstationerna vid Frykfors och Edsvalla. Avrinningsområdet är markerat med lila färg. De röda punkterna avser broar, där Jvg står för järnvägsbroar. (Figur framtagen av Dan Eklund, SMHI. Bakgrundskarta © OPEN STREET MAP).



Figur 2. Schematisk fallprofil av Norsälven med angivna dämningssgränser vid kraftverken samt ungefärliga nivåer vid fältmätningstillfälle 2014 (se Bilaga 1) samt fallhöjder. DG = Dämningssgräns, MW = Medelvattenstånd. Hydromodellens delsträckor anges. (Figur och text: Dan Eklund, SMHI).

Tabell 1. Flödesstatistik baserat på dygnsvärden mellan åren 1971-2013 (dygnsdata från Fortum), samt flödesinformation från SMHI:s hydrodynamiska modellering inom uppdraget (Bilaga 1).

Flödesstatistik, 1971-2013	Flöde	Enhet
MAX	393	m ³ /s
MIN	1	m ³ /s
MEDEL	51	m ³ /s
MEDIAN	48	m ³ /s
STDV	40	m ³ /s
Flödesinformation		
Maximalt turbinflöde i kraftverken	70	m ³ /s
Medelhögvattenföring (MHQ)	190	m ³ /s
Beräknad 100-årsvattenföring (årsmedel) , HQ ₁₀₀	426	m ³ /s



Figur 3. Histogram över flödesstatistik, dygnsmedelflöden 1971-2013 (flödesdata från Fortum).

2. Syfte och mål

Syften:

- Klargöra var erosion förekommer och klargöra eventuella förändringar i meanderloppet.
- Beräkna/värdera omfattningen/storleken av erosionen i utvalda sektioner.
- Leverera underlag för beräkning av sannolikhet för skred med hänsyn till möjlig framtida erosion till följd av klimatförändring.

Mål:

- Instruktioner till styrdokument för hur sektioners undervattengeometri ska ändras med hänsyn till framtida klimatpåverkad erosion.
- GIS-skikt som visar möjlig erosion längs Norsälven fram till år 2100.

3. Genomförande

3.1 Arbetsgång

Den framtagna metodiken innehåller fem steg som beskrivs nedan och i de efterföljande underavsnitten.

Arbetsgång

1. Steg ett är att bestämma vilka ekvationer som ska användas för att beräkna erosion.
2. Steg två är att bestämma vilket underlag som behöver tas fram för att genomföra beräkningarna.
3. Steg tre är att bestämma vilka modeller som ska användas för beräkning av erosionen med hänsyn till ett framtida klimatscenario.
4. Steg fyra är att bestämma ett sätt att bedöma rimligheten i resultaten.
5. Steg fem är att beräkna erosion och bedöma rimlighet.

3.2 Styrande ekvationer

3.2.1 Grundläggande antaganden

Baserat på tidigare utredningar längs älven och baserat på jordartskartan över området bedöms sedimenten i Norsälven i huvudsak utgöras av finjord och kohesiva material. Detta innebär att ekvationer för erosion av kohesiva material kan användas, vilket i detta fall blir samma ekvation som användes i Göta älvtutredningen.

Tröskel för mobilisering av sedimentpartiklar kallas sedimentets kritiska skjuvspänning (τ_c) och den destabiliserande kraft som det strömmande vattnet utövar mot sedimentpartiklarnas yta kallas skjuvspänning, eller botten-skjuvspänning (τ_0). Erosion uppkommer när $\tau_0 > \tau_c$, det vill säga när botten-skjuvspänningen överskrider den kritiska skjuvspänningen.

Enligt Partheniades (2009) har många försök utförts i syfte att koppla kritisk botten-skjuvspänning till jordens egenskaper, såsom flytgräs, odränerad skjuvhållfasthet och lerinnehåll. Partheniades (2009) summerar olika forskningsresultat så här:

- Kritisk skjuvspänning är 2-3 gånger mindre än jordens odränerade skjuvhållfasthet.
- Erosion minskar med ökat lerinnehåll. Erosion minskar med ökad densitet. Kritisk skjuvspänning kan dock variera mycket även för jordar med samma flytgräs, odränerad skjuvhållfasthet och lerinnehåll och dess parametrar kan inte användas enbart för att bestämma kritisk botten-skjuvspänning.
- Brott längs en glidyta kan inte jämföras med processen vid lossgörande av partiklar.
- Orienteringen av lerpartiklarna har en uttalad effekt på eroderbarheten – erosionshastigheten minskar med ökande grad av orientering, och tvärt om.

Erosionshastighet för kohesivt material beräknas enligt följande (Hanson & Cook 1997; Hanson 1990; Karmaker & Dutta 2011; Partheniades 1965):

$$E = k_d(\tau_0 - \tau_c)^\alpha$$

ekv. 1

Där,

E = erosionshastighet (m/s)

k_d = eroderbarhetskoefficient ($\text{m}^3/\text{N s}$)

τ_0 = genomsnittlig skjuvspänning (Pa)

τ_c = kritisk skjuvspänning (Pa)

α = en empiriskt härledd exponent som i allmänhet anses vara lika med 1 (-)

Erosionen under en given tid (E_t , meter) fås genom följande ekvation (Karmaker & Dutta 2011):

$$E_t = k_d \times (\tau_0 - \tau_c) \times \Delta t$$

ekv. 2

Där,

Δt = den totala tiden för fluvial erosion (s)

Detta bygger på antagandet om konstanta förhållanden, det vill säga ingen förändring i flöde eller skjuvspänning etc.

I studien av Karmaker & Dutta (2011) antas att det flöde som formar älvfåran utgörs av det bankfulla flödet, det vill säga det flöde som orsakar en vattennivå i höjd med släntkrön. Man kan påpeka att om fint material eroderar från botten är det inte sannolikt att det lägger sig i älven utan transporteras ned till Väneren. Om man dessutom försummar ackumulationen så blir uppskattningen av erosionen i älven på den säkra sidan.

Observera att beräkningarna endast avser erosion och att ackumulation eller transport därmed inte ingår. Det är endast eroderade områden som kan redovisas, inte områden där eventuellt material skulle kunna sedimentera och ackumulera.

3.2.2 Eroderbarhetskoefficient (k_d)

Den så kallade eroderbarhetskoefficienten (k_d) är svårbestämd och behöver helst mätas i fält. Det kräver dock en stor fältinsats med stora resurser vilket inte var möjligt för Norsälven. Därtill saknas fältinstrument i Sverige för denna typ av mätning. Istället får eroderbarhetskoefficienten baseras på empiriska studier redovisade i litteraturen.

Hanson & Simon (2001) genomförde 83 jettester under vatten för att hitta ett empiriskt samband mellan kritisk skjuvspänning och eroderbarhetskoefficienten. De genomförde testerna för en mängd olika jordar i mitten av västra USA, med τ_c varierande från 0,001 till 400 Pa och fann att följande samband kan användas:

$$k_d = 2 \times 10^{-7} \tau_c^{-0,5} \text{ m}^3/\text{N s} \quad \text{ekv. 3}$$

Där,

k_d = eroderbarhetskoefficient ($\text{m}^3/\text{N s}$)

τ_c = kritisk bottenskuvspänning (Pa)

Ekvation 3 vidareutvecklades så småningom till ekv. 4 eftersom den visade sig ha bättre överensstämmelse med senare utförda jettester och är den ekvation som därför används i modellverket BSTEM - Bank stability toe erosion modell (Langendoen & Ursic 2014):

$$k_d = 1 \times 10^{-7} \tau_c^{-0,5} \text{ m}^3/\text{N s} \quad \text{ekv. 4}$$

Wynn (2004) genomförde 142 experiment längs med vegeterande älvstränder vid 25 fältlokaler i sydvästra Virginia och fann följande samband:

$$k_d = 3,1 \times 10^{-6} \tau_c^{-0,37} \text{ m}^3/\text{N s} \quad \text{ekv. 5}$$

Simon et al. (2010) förfinade senare sina analyser med förbättrade fältinstrument och genomförde cirka 1100 jettester på olika finkorniga jordar från 16 delstater i USA och jämförde även med tidigare resultat ($r=0,62$, $p=0,05$):

$$k_d = 1,6 \times 10^{-6} \tau_c^{-0,8264} \text{ m}^3/\text{N s} \quad \text{ekv. 6}$$

Karmaker & Dutta (2011) genomförde 58 jettester under vatten och fann i sin studie att det finns några avvikande datapunkter för vilka det inte är möjligt att passa data med enkel regression. De använde därför en mer robust regressionsteknik som ger mindre vikt till extremvärden vilket innebär att resultaten är mindre känsliga för dessa avvikande datapunkter och fann en bättre överensstämmelse och med högre korrelation. Karmaker & Dutta (2011) fann då följande samband:

$$k_d = 3,16 \times 10^{-6} \tau_c^{-0,185} \text{ m}^3/\text{N s} \quad \text{ekv. 7}$$

Hanson & Simon (2001) genomförde sina tester i en flodbädd, medan studien av Karmaker & Dutta (2011) utfördes för flodstränder.

Ytterligare studier finns men oavsett metod förutsätter en uppskattning av k_d att det inte finns någon avsättning av strandmaterial nära stranden.

Ekvationerna 3, 4 och 6 ligger till grund för utvecklingen av modellverket BSTEM (se Avsnitt 3.4.8) som har använts här. Samtliga dessa tre ekvationer samt ekv. 7, som är en relativt ny studie, användes för att utvärdera vilken av dessa fyra ekvationer som bäst kan beskriva erosionen i älven (se vidare Avsnitt 3.4.4).

3.2.3 Genomsnittlig bottenskjuvspänning (τ_0)

Bottenskjuvspänningen är ett index på den kraft som det strömmande vattnet utövar mot botten per ytenhet och har relaterats till sedimentrörelse och transport i många teoretiska och empiriska studier av sedimenttransport. Bottenskjuvspänningen har därför en nära koppling till flödes hastigheten. Normalt antas att skjuvspänningen är proportionell mot vattenhastigheten i kvadrat för turbulent strömning.

Bottenskjuvspänningen för ett brett vattendrag (dvs. bredden är mycket större än vattendjupet) kan beräknas enligt (Chanson 2004):

$$\tau_0 = \rho g d \sin \theta \quad \text{ekv. 8}$$

Där,

τ_0 = genomsnittlig skjuvspänning vid botten (Pa)

ρ = vattnets densitet (kg/m³)

g = tyngdacceleration (m/s²)

d = flödesdjup (m)

$\sin \theta$ = bottenlutning i längsled (-)

Ekvation 8 kan skrivas om genom att introducera Mannings formel ($\sin \theta = \frac{n^2 v^2}{d^{4/3}}$) och blir då (Larson 2014):

$$\tau_0 = \frac{n^2 \rho g v^2}{\sqrt[3]{d}} \quad \text{ekv. 9}$$

Där,

n = Mannings råhet (s/m³)

v = vattenhastigheten (m/s)

ρ = vattnets densitet (kg/m³)

g = tyngdacceleration (m/s²)

d = vattendjup (m)

Som syns av ekv. 9 har bottens råhet (skrovlighet) stor inverkan på resultatet (beskrivs genom n); ju skrovligare botten är desto högre blir bottenskjuvspänningen samtidigt som turbulensen i vattenmassan ökar.

3.2.4 Kritisk bottenskjuvspänning (τ_c)

Kritisk bottenskjuvspänning bör på samma sätt som för eroderbarhetskoefficienten bestämmas genom fältförsök men likaså här och med samma anledning som för k_d får τ_c bestämmas utifrån olika empiriska och experimentella försök redovisade i litteraturen.

En av de första och mest använda formlerna för att beräkna kritisk skjuvspänning är den som är baserat på Shields parameter och D_{50} (se till exempel i Chanson 2004; USGS 2014). Dessa gäller dock inte för kohesivt material (ekv. 10 och 11).

$$\tau_c = \theta_{cr}(s - 1)\rho g D_{50} \quad \text{ekv. 10}$$

Där,

θ_{cr} = Kritiskt värde på Shields parameter (-)

ρ = vattnets densitet (kg/m³)

g = tyngdaccelerationen (9,82 m/s²)

D_{50} = genomsnittlig kornstorlek, dvs. sedimentdiameter vid vilken 50% är mindre eller lika med denna storlek.

Ekvation 11 beskriver hur τ_c kan beräknas enbart utifrån D_{50} (Smerdon & Beasley 1961):

$$\tau_c = 3,54 \cdot 10^{-28,1 D_{50}} \quad \text{ekv. 11}$$

Där,

D_{50} = genomsnittlig kornstorlek, dvs. sedimentdiameter vid vilken 50 % är mindre eller lika med denna storlek.

Experimentella studier som är baserad på empiriska samband mellan den kritiska skjuvspänningen och olika sedimentegenskaper har visat på att det går att beräkna τ_c utifrån andelen finjordshalt istället. Studien presenteras i Karmaker & Dutta (2011) och är utvecklade av Dunn (1959), Vanoni (1977) och Julian & Torres (2006):

$$\tau_c = 0,1 + 0,1779(SC) + 0,0028(SC)^2 - 2,34E^{-5} \times (SC)^3 \quad \text{ekv. 12}$$

Där,

τ_c = kritisk skjuvspänning (Pa)

SC = procentuellt innehåll av silt- och lerfraktion (-)

Ekvation 12 kan därmed bättre beskriva τ_c för kohesivt material än ekv. 10 och 11, och valdes därför att fortsättningsvis användas.

3.3 Beräkningsunderlag

Det bästa underlaget för att bestämma erosionen är batymetrisk data från olika tidsperioder. Genom att jämföra batymetri från olika tidsperioder kan en förändring i geometrin tolkas och storleken på erosionen bedömas. Tyvärr finns sällan heltäckande batymetrisk data och framförallt inte från olika år, men enstaka lodade sektioner kan finnas.

Nedan redovisas det underlag som har ingått för beräkning av erosionen.

3.3.1 Erosion och erosionsskydd (fältinventering, SGI)

Sträckor med erosionsskydd karterades vid fältinventering och digitaliserades i GIS.

3.3.2 Bottenundersökning (MMA AB)

På uppdrag av SGI genomförde MMA AB (MMA AB 2014) mätningar för att bestämma batymetri, bottenhårdhet och bedöma sedimentlager och djup till berg. Därtill genomfördes provtagning av ytsediment i 30 punkter för jordartsklassificering (sedimentationsanalys), samt vattenprovtagning för analys av suspenderad halt i vattnet. Jordartsklassificeringen gjordes på SGI:s jordlaboratorium (Bilaga 2). Vattenproverna analyserades på ALS Laboratories och finns rapporterade i MMA AB:s rapport (MMA AB 2014). Baserat på sedimentproverna kunde sedan backscatterdata grovt översättas till sedimenttyper för älvbotten, vilket behövdes för att kunna bedöma bottensedimentets egenskaper och därmed kunna beräkna τ_c . Halten suspenderat material användes för att försöka bedöma bottentransporten av sediment och försöka beräkna k_d utifrån detta.

3.3.3 Hydrodynamisk modell (SMHI)

Som en del i ett samverkansavtal med SMHI upprättades en tvådimensionell hydrodynamisk modell för simulering av bottenskjuvspänningar, vattendjup, vattenhastigheter och vattennivåer vid olika flöden (PM bifogat i Bilaga 1). Modellen sattes upp i Delft 3D. SMHI medverkade även i diskussionerna för hur erosionsberäkningarna skulle genomföras.

3.3.4 Tidigare lodade sektioner

Tidigare lodade sektioner längs Norsälven fanns endast att tillgå för den nedre delen (Edsvalla-Vänern), totalt 21 sektioner. Sektionerna var lodade 1971 med undantag för en som var lodad 1952. Dessa sektioner digitaliserades och jämfördes med resultaten från den batymetriska mätningen som gjordes inom ramen för detta uppdrag. I flera av sektionerna hade muddring förekommit och erosionsskydd lagts ut. Detta påverkar tolkningen av den uppmätta geometriska förändringen i dessa sektioner och endast de sektioner där muddring ej har förekommit där erosionsskydd inte finns har använts. Se Bilaga 3 för beskrivning.

3.3.5 Flödesstatistik

Flödesdata för perioden 1971-2013 leverades av Fortum som är driftansvarig för kraftstationerna vid Frykfors och Edsvalla.

3.3.6 Sedimenttransport

I Göta älvutredningen fanns tillräckligt underlag för att översiktligt upprätta en sedimentbudget och detta utgjorde det främsta underlaget för att få fram ett värde på eroderbarhetskoefficienten (k_d). Motsvarande underlag fanns inte för Norsälven men i samband med bottenundersökningen togs prover av älvvatten 0,5 m från botten och i vattenmassans mitt i samma sektioner som sedimentprov togs. Vattenproverna analyserades med avseende på halten suspenderat material och genom att multiplicera halten med flödet vid provtagningstillfället kunde en grov bedömning göras av sedimenttransporten för aktuellt flödestillfälle. Detta bygger dock på att allt material kommer från en viss sträcka av älven och inte uppströms ifrån eller via ytavrinningen. För att försöka undvika detta togs därför proverna så nära botten som möjligt.

3.3.7 Klimatscenarier för området (klimatrapport Värmland)

På uppdrag av Länsstyrelsen Värmland har SMHI genomfört en klimatanalys av Värmlands län och som SGI har fått ta del av (se Persson et al. 2014).

3.3.8 Saknat underlag

Det saknas uppgifter om sedimenttransport och sedimentbudget för Norsälven. Likaså saknas information om vilka flöden som orsakar den största erosionen.

3.4 Modeller

Det finns i dag inga tillförlitliga modeller som sammankopplar geotekniska parametrar tvärs ett vattendrag med hydrodynamiska processer som verkar längs ett vattendrag, det vill säga som sammanlänkar jordmekaniska egenskaper med hydrodynamiska processer. Det finns därtill inga modeller för att kunna ta hänsyn till förändringar på längre sikt som klimatförändring innebär utan de flesta flödesrelaterade erosionsberäkningarna är gjorda för enstaka flödestoppar. En kombination av modeller/verktyg behövs därför.

Lägsta krav på modell är en hydrodynamisk modell för att kunna simulera bottenskjuvspänningar vid olika flöden. För att kunna upprätta en 2- eller 3-dimensionell modell behövs ett heltäckande batymetriskt underlag. Det finns modellutvecklare som även erbjuder morfologisk modellering av sedimenttransport och sådana modeller bygger på att det finns en hydrodynamisk modell i grunden. I Göta älvutredningen gjordes ett försök att modellera hydromorfologin men detta frångicks till slut på grund av för stora osäkerheter i indata och att det blev för krävande beräkningsmässigt. Erosionsberäkningarna gjordes istället med hjälp av GIS.

I det fall det finns en 2-dimensionell hydrodynamisk modell och en kartering av bottengeologin kan beräkning av bottenerosion göras i GIS. Beräkningar görs mellan GIS-lager (och respektive grid) med data för bottenskjuvspänning och kritisk bottenskjuvspänning och enligt ekv. 2. Ur den hydrodynamiska modellen fås bottenskjuvspänningar i respektive grid och för olika flöden. Ur den karterade bottengeologin kan kritisk skjuvspänning beräknas i respektive grid.

I en GIS-baserad beräkning fångas dock inte riktigt de processer upp som sker mot strandbanken och som orsakar erosion av undervattensslänt och släntfot. Ett sätt att komma runt detta är att använda en modell som United States Departement of Agricultural (USDA) har utvecklat i Excel: Bank Stability Toe Erosion Modell (BSTEM). BSTEM är fri att ladda ner från USDA:s webbplats (se USDA 2014). Denna modell beräknar i sin tur inte bottenerosion. Kontakt togs med Eddy Langedeon vid USDA i syfte att fråga om modellen skulle kunna användas för ändamålet, vilket inte är att analysera enskilda flödestoppar som är det vanliga, utan för att analysera förändringar under en mycket lång tid. Enligt Langedeon skulle detta vara möjligt.

Genom att kombinera beräkningar i GIS med avseende på bottenerosion med beräkningar i BSTEM för erosion av släntfot (under vatten) i utvalda sektioner kan möjliga förändringar i olika tvärsektioner fångas upp.

Åtta delmodeller (Tabell 2) byggdes upp för att kunna ta beslut om vilka värden som bör ansättas för de olika parametrarna i ekv. 2 och för att genomföra beräkningar i GIS och med hjälp av BSTEM.

Tabell 2. Delmodeller.

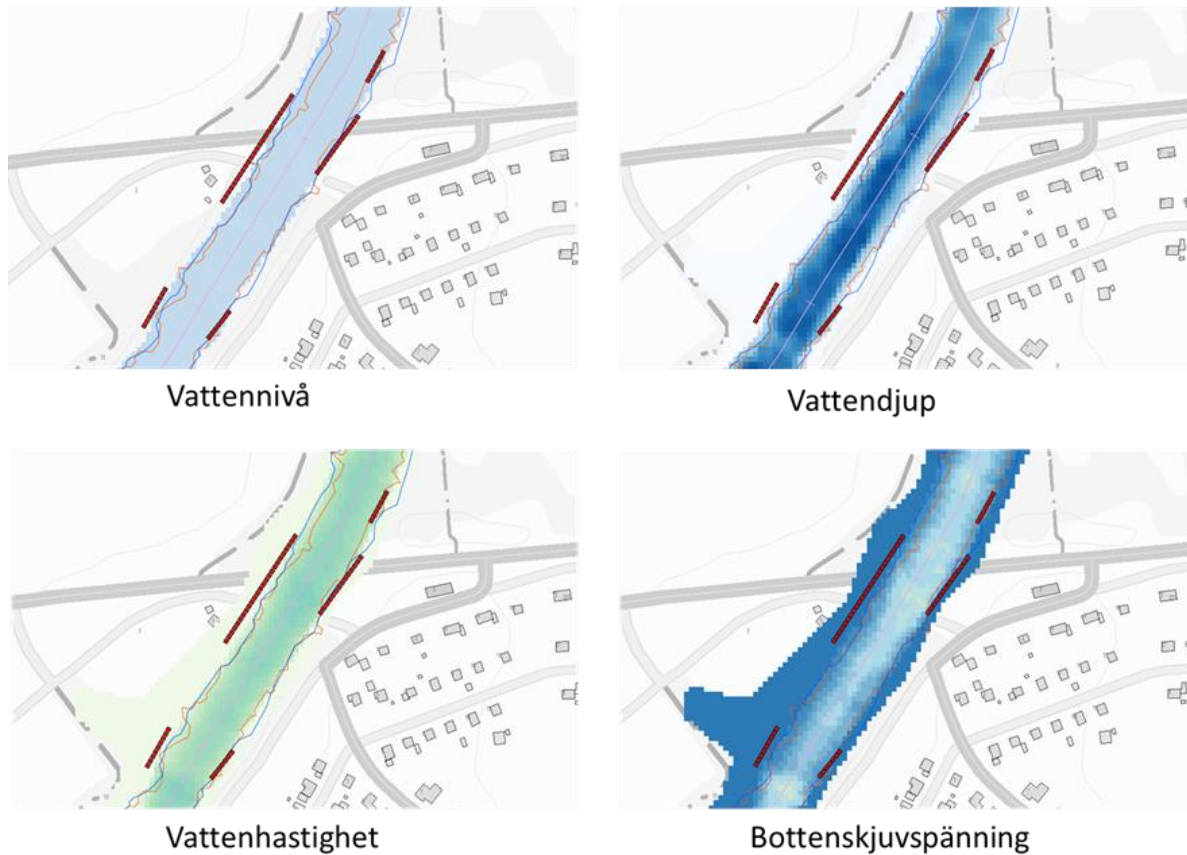
Modell	
1	Hydrodynamisk modell för bottenskjuvspänning (SMHI) (τ_o)
2	Kritisk skjuvspänning (τ_c)
3	Eroderbarhetskoefficient utifrån halten suspenderat material (k_d)
4	Dimensionerande flöden och eroderbarhetskoefficient (Q , k_d)
5	Varaktighet för erosionsflöden (Δt)
6	Sektioner att beräkna bankerosion
7	Beräkning av bottenerosion mha GIS
8	Beräkning av bankerosion mha BSTEM

3.4.1 Delmodell 1 Hydrodynamisk modell för bottenskjuvspänning (SMHI) (τ_o)

Den hydrodynamiska modellen upprättades av Dan Eklund, SMHI (Bilaga 1). Modellen är uppdelad på tre delmodeller, en för respektive delområde: Fryken-Frykfors, Frykfors-Edsvalla och Edsvalla-Vänern. För varje simulerad vattenföring (20, 50, 70, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 och 500 m³/s) och för respektive delområden levererades:

- Raster i TIF-format:
 - Ytnivå (m)
 - Vattendjup (m)
 - Djupintegrerad vattenhastighet (m/s)
 - Bottenskjuvspänning (Pa)
- Diagram över påverkad delsträckas area med avseende på vattenhastighet och skjuvspänning vid olika vattenföring.
- Kartbilder i PNG-format, avsedda att ses tillsammans med diagrammen.
 - Djupintegrerad vattenhastighet (m/s)
 - Bottenskjuvspänning (Pa)
- Därtill levererades samtliga modellfiler till SGI.

Ett exempel på resultatfiler visas i Figur 4.

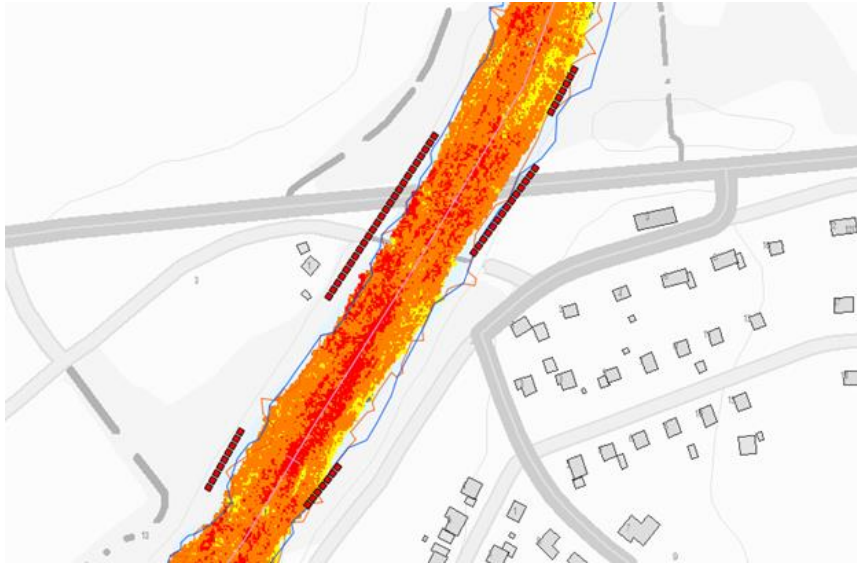
Vid flöde 200 m³/s

Figur 4. Norsälven vid Norsbron. Exempel på resultat från den hydrodynamiska modellen. Kartorna visar modellerade vattennivåer, vattendjup, vattenhastigheter och bottenskjuvspänningar vid flödet 200 m³/s. De kraftiga röda linjerna markerar var erosionsskydd ligger utlagt. I figuren för bottenskjuvspänning har det mörkblå området ej buffrats efter strandlinjen utan följer terrängen och ska bortses ifrån, "bulan" ner till vänster finns således inte i verkligheten. (© Geodatasamverkan, SGI).

3.4.2 Delmodell 2 Kritisk skjuvspänning (τ_c)

Baserat på resultaten från bottenundersökningen och kornstorleksanalyserna klassades bottenhårdenheten (backscatterdata) grovt in i fyra sedimenttyper: siltig lera (siLe), sandig silt (saSi), siltig sand (siSa) och grus/sten/block. Underlaget leverades som shape-filer med en upplösning på 0,5×0,5 m grid. Filerna lästes in i QGIS (Figur 5).

För varje sedimenttyp (klass) beräknades en kritisk skjuvspänning baserat på andelen finjordshalt (ekv. 12). För de grövre fraktionerna grus/sten/block användes tabellvärden baserade på empirisk data. Varje klass tilldelades slutligen en kritisk skjuvspänning: 0,26 Pa (siLe), 0,21 Pa (saSi), 0,14 Pa (siSa) och 5 Pa (grus, sten).



Figur 5. Norsälven vid Norsbron. Bilden visar resultatet av jordartsklassad backscatterdata baserat på kornfördelningsanalys av sedimentprover. Röd = grus, sten, block. Orange = siltig sand. Gul = sandig silt. Grå = siltig lera. De kraftiga röda linjerna markerar var erosionsskydd finns utlagt. (© Geodatasamverkan, SGI).

3.4.3 Delmodell 3 Eroderbarhetskoefficient utifrån halten suspenderat material (k_d)

Denna delmodell var ett försök att efterlikna metodiken som användes i Göta älvutredningen. Dock fanns ingen sedimentbudget utan i föreliggande fall gjordes ett test med att använda resultaten av analyserade halter av suspenderat material i två punkter längs sträckan Fryken-Frykfors, tre punkter längs sträckan Frykfors-Edsvalla och två punkter längs sträckan Edsvalla-Vänern, på vattendjupet 0,5 m över botten och vid ett flöde på 55 m³/s (se Avsnitt 3.3.2). Baserat på det grundläggande antagandet att sediment först rör på sig när bottenskjuvspänningen överstiger den kritiska och baserat på antagandet att allt det suspenderade materialet på detta djup kommer från botten gjordes ett försök att uppskattas ett värde på k_d genom följande formel:

$$k_d = \frac{(C_{susp} \times Q)}{(A \times \rho_{bulk})} / (\tau_o - \tau_c) \quad \text{ekv. 13}$$

Där,

C_{susp} = concentration suspenderat material (kg/m³)

Q = flöde (m³/s)

A = påverkad bottenarea vid visst flöde (m²)

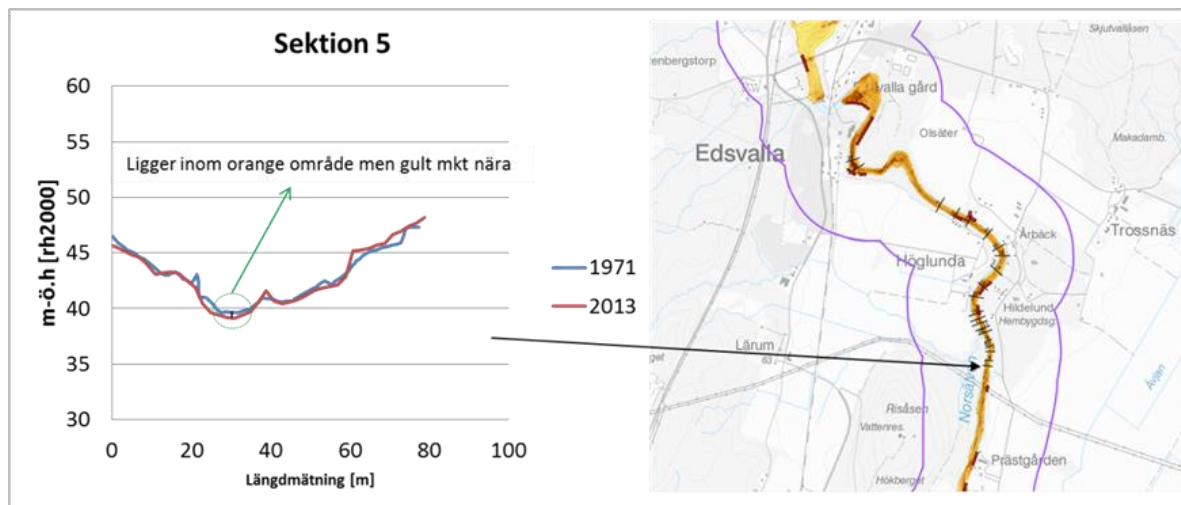
ρ_{bulk} = bulkdensitet (kg/m³)

Utifrån SMHI:s hydrodynamiska modell kunde SMHI plocka fram hur stor andel av botten som påverkas av olika bottenskjuvspänningar vid olika flöden. Ett medelvärde på halten suspenderat material på de prover som togs närmast botten och för respektive delsträcka samt flödet vid provtagningsstillfället användes för att ta fram k_d .

3.4.4 Delmodell 4 Dimensionerande flöden och eroderbarhetskoefficient (Q , k_d)

Bestämning av vilken ekvation som ska gälla för beräkning av k_d och erosionsflöde gjordes baserat på jämförelse mellan sektionerna från 1971 och 2013 som fanns att tillgå för delsträcka Edsvalla-Vänern, och där bottenerosion förekommit. För övriga två delsträckor fanns det inte några tidigare lodade sektioner att jämföra med.

Den ekvation på k_d (inkl. k_d beräknat från halten suspenderat material), det värde på τ_c och det värde på Q som bäst kunde beskriva uppmätt bottenerosion valdes slutligen. Det kan redan här nämnas att beräknat erosionsdjup utifrån ekv. 13 (k_d baserat på halt suspenderat material i vattenprover) blev mycket litet och överrenstämde dåligt med uppmätt bottenerosion.



Figur 6. Exempel jämförd sektion 5. Observera att sektionen är digitaliserad i flödesriktningen (norr-söder) och att höger i sektionen är väster. Svart streck inom grön cirkel markerar var i sektionen beräknad erosion jämförts med uppmätt. Till höger visas var längs med sträckan sektionen ligger. Älvens botten är här markerad med ett färggraster som illustrerar olika jordarter (hårdhet). Erosionsskydd finns även markerat som röda streck längs med vattendraget. (© Geodatasamverkan, SGI).

Eftersom endast jämförande sektioner fanns för sträckan Edsvalla-Vänern är valet endast baserat på beräkningsresultaten för denna delsträcka. Av totalt 21 sektioner bedömdes fyra sektioner som de mest användbara, i övriga hade antingen muddring skett, ackumulation förekommit (genom att material rasat ner) eller att erosionsskydd ligger så att det blir svårt att göra en bra jämförelse. Det kunde också vara så att den modellerade bottenskjuvspänningen för dagens förhållanden inte översteg den beräknade kritiska skjuvspänningen.

I respektive av de fyra sektionerna valdes en till två djuppunkter för att beräkna erosionsdjup och sedan jämföra med uppmätt erosionsdjup i dessa punkter (Figur 6). Sedimentets egenskaper i just dessa punkter hämtades från tolkad backscatterdata. Vissa av dessa punkter låg i gränsen mellan olika jordartsklasser enligt backscatterdata och olika värden på kritisk skjuvspänning testades därför. En beräkningsmatris för beräkning av erosion enligt ekv. 2 sattes upp i Excel som gjorde det möjligt att testa fem olika ekvationer för k_d och för nio olika flödesscenarior (Tabell 3-5). Flödesscenariorna valdes dels som ett enskilt flöde för att se om det flödet i sig skulle kunna orsaka den uppmätta erosionen, dels som intervall från ett lägsta flöde till uppmätt maxflöde (Tabell 5). Matrisen gjorde det också möjligt att variera τ_c . Värde på τ_0 för de olika flödena kunde utläsas ur den hydrodynamiska modellen.

Tabell 3. Sammanfattning av vilka ekvationer för k_d som testades gentemot uppmätt erosion. Längst ner anges även ekvationen för τ_c som har använts.

Ekvation	Referens
$k_d = 2 \times 10^{-7} \tau_c^{-0,5}$	Hanson & Simon (2001), ekv. 3
$k_d = 1,6 \times 10^{-6} \tau_c^{-0,8264}$	Simon et al. (2010), ekv. 6
$k_d = 3,16 \times 10^{-6} \tau_c^{-0,185}$	Karmaker & Dutta (2011), ekv. 7
$k_d = 1 \times 10^{-7} \tau_c^{-0,5}$	Langedeon & Ursic (2014), ekv. 4
$k_d \text{ ca } 5,24 \times 10^{-6}$	Baserat på susp.prov, ekv. 13
$\tau_c = 0,1 + 0,1779(SC) + 0,0028(SC)^2 - 2,34E^{-5} \times (SC)^3$	Karmaker & Dutta (2011), ekv. 12

Tabell 4. Kritisk skjuvspänning baserat på ekv. 12. Kritisk skjuvspänning för den grövsta fraktionen är inte beräknad utan antagen utifrån tabellvärden.

Jordart	Färg på karta	τ_c (Pa)
Siltig lera		0,26
Sandig silt		0,21
Siltig sand		0,14
Sten, grus, block		5,0

Tabell 5. Tabellen anger vilka flödesscenarior som testades och antal statistiska dagar mellan 1971-2013 som gällde för respektive flöde. Vid val av flödesscenarier har hänsyn tagits till den hydrodynamiska modellens begränsningar i modellerade flöden (i princip jämna 50 m³/s-flöden). Flödesdata är hämtat från Fortum.

Flödesscenario	Verkligt flödesspann (m ³ /s)	Statistiska dygn 1971-2013	Val av bottenskuvspänning baseras på följande Q
Q = 200 m ³ /s	175 ≤ Q ≤ 225	178 dygn	τ_0 vid Q = 200 m ³ /s
Q = 250 m ³ /s	175 ≤ Q ≤ 225	60 dygn	τ_0 vid Q = 250 m ³ /s
Q = 300 m ³ /s	275 ≤ Q ≤ 325	26 dygn	τ_0 vid Q = 300 m ³ /s
Q = 400 m ³ /s	375 ≤ Q ≤ max	17 dygn	τ_0 vid Q = 400 m ³ /s
Q ≥ 150 m ³ /s	150 ≤ Q ≤ max	712 dygn	τ_0 vid Q = 150 m ³ /s
Q ≥ 190 m ³ /s	190 ≤ Q ≤ max	219 dygn	τ_0 vid Q = 200 m ³ /s
Q ≥ 225 m ³ /s	225 ≤ Q ≤ max	189 dygn	τ_0 vid Q = 250 m ³ /s
Q ≥ 250 m ³ /s	250 ≤ Q ≤ max	120 dygn	τ_0 vid Q = 250 m ³ /s
Q ≥ 300 m ³ /s	300 ≤ Q ≤ max	61 dygn	τ_0 vid Q = 300 m ³ /s

Det som påverkar storleken på den beräknade erosionen är dels hur stor differensen är mellan den aktuella bottenskuvspänningen (τ_0) och den kritiska bottenskuvspänningen (τ_c) och dels varaktigheten för denna bottenskuvspänning. Ett högt flöde ger större differens mellan τ_0 och τ_c (större värde på bottenskuvspänningen) men en kortare varaktighet, och tvärtom ger ett lägre flöde en lägre differens mellan τ_0 och τ_c men en längre varaktighet eftersom flöden nära medelflöde förekommer mer frekvent än extremer.

Slutligt val av ekvation för eroderbarhetskoefficient, k_d

Erosionen kunde i princip inte beskrivas i något av fallen genom att använda beräkning av k_d baserat på analys av halten suspenderat material eller enligt ekvationerna efter Simon et al. (2010) och Karmaker & Dutta (2011) (ekv. 6 och ekv. 7), det vill säga avvikelserna var flera meter, ibland flera tiotals meter. De två övriga ekvationerna (Hanson & Simon 2001; Langedoen & Ursic 2014) var ungefär likvärdiga och med en noggrannhet som varierar upp till dryga metern. Båda dessa ekvationer finns med i BSTEM och vid kontakt med US Department of Agriculture (Langedoen) förordar de ekvationen enligt Langedoen och Ursic (2014), det vill säga ekv. 4 ovan, om den ger god överensstämmelse. Eftersom det också är ekv. 4 som används i den senaste versionen av BSTEM föll det slutliga valet på denna.

Slutligt val av flöde, Q , som styrande för erosionen

I beräkningsfallen baserade på ekv. 4 för k_d förekommer flöden runt 300 m³/s flest gånger som det som kan beskriva erosionen bäst i respektive beräkningspunkt, följt av 250 m³/s. Andra flöden och flödesintervall förekommer också men variationen är större och samstämmigheten sämre. Sannolikt är det därför flöden strax under 300 m³/s och uppåt som har störst påverkan på erosionen. Eftersom den hydrodynamiska modellen i princip är simulerad för jämna 50 m³/s-steg var det dock inte möjligt att testa flöden på 275 m³/s.

Att notera

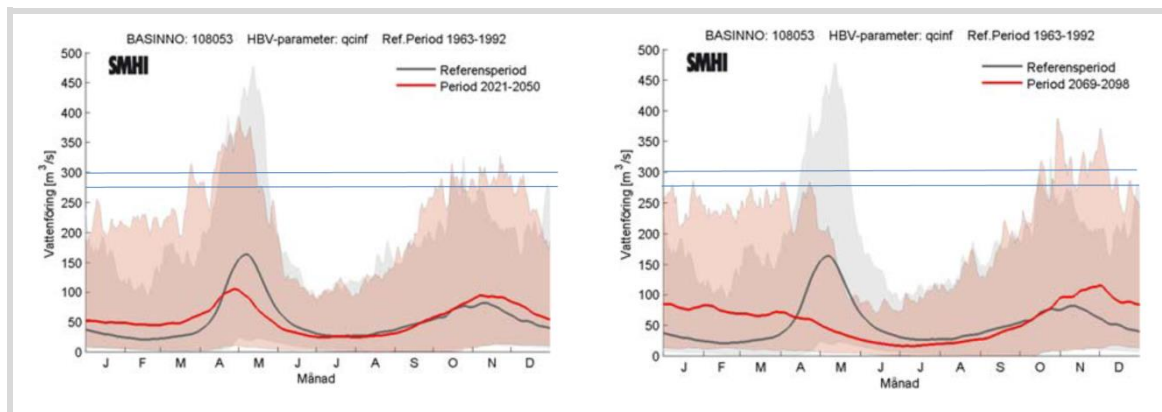
Det ska noteras att oavsett vilken ekvation på k_d och valt erosionsflöde Q som används kommer det inte att vara möjligt att kunna beskriva alla förändringar av bottengeometrin men förhoppningsvis var en majoritet av förändringarna kommer att ske och i ungefärlig storlek.

3.4.5 Delmodell 5 Varaktighet för erosionsflöden (Δt)

Den sista delen för att beräkna erosion var att försöka bedöma varaktigheten för erosionsflöden, det vill säga antal dagar fram till 2100 som det teoretiskt kan uppstå flöden strax under 300 m³/s och uppåt.

Det ingick inte i uppdraget att genomföra en separat klimatscenarioanalys utifrån uppdragets specifika frågeställning utan information måste baseras på befintlig information (befintliga utredningar). Den klimatanalys som fanns att tillgå var den klimatanalys för Värmlands län som SMHI utfört på uppdrag av länsstyrelsen (Persson et al. 2014). Klimatanalysen är basera på 16 klimatsimuleringar och är gjord med hänsyn till en referensperiod (1963-1992) och för perioderna 2021-2050 samt 2069-2098 (för mer information om klimatanalysen hänvisas till rapporten). I figurerna 5.3-6 i Persson et al. (2014) redovisas säsongsdynamik för total tillrinning (vattenföring = flöde) med linjer för medeltillrinning för referensperioden och framtidsperioderna samt med 75:e percentilen av alla scenariers maxvärde och 25:e percentilen av alla scenariers minvärde (Figur 7). Det framgår ur dessa figurer att varaktigheten för höga flöden sannolikt blir längre under första perioden (2021-2050) än under andra perioden (2069-2098), vilket måste tas hänsyn till.

Medelflödet har och kommer aldrig nå så högt som de bedömda erosionsflödena och det går därför inte att utgå från en förändring i medelflöde, däremot skulle det kanske gå att utgå från en förändring i 75-percentilen och anta den förändringen på frekvensen av erosionsflöden mellan åren 1971-2013. Detta gjordes för hand och baserat på Länsstyrelsens Publikation 2014:2 (Persson et al. 2014, se Figur 7).



Figur 7. Figuren visar vattenföringsdiagram för Norsälven och är en del av figur 5.3-6 i SMHI:s klimatanalys för Värmlands län (Persson et al. 2014). De vertikala blå linjerna markerar 275 m³/s och 300 m³/s. Text till figur 5.3-6: "Säsongsdynamik för total tillrinning. Svart linje avser medeltillrinning för referensperioden 1963-1992 och röd linje avser framtidsperioden 2021-2050 i vänstra diagrammen och 2069-2098 i högra diagrammen. De grå fälten visar variationen mellan 75:e percentilen av alla scenariers maxvärde och 25:e percentilen av alla scenariers minvärde under referensperioden. De ljusröda fälten visar motsvarande för de framtida perioderna. Figuren är baserad på 16 klimatsimuleringar för 2021-2050 och 12 klimatsimuleringar för 2069-2098." (Källa: Persson et al. 2014).

Eftersom det troligen är flöden strax under 300 m³/s som är den kritiska flödesnivån för erosion har antal dagar i beräkningarna nedan baserats på flödet 300 m³/s och 275 m³/s, det vill säga en medelväg. Beräkningsunderlaget framgår av Tabell 6 och beräkningen har gjorts enligt ekv. 14 och med detta tankesätt blir varaktigheten 150 dygn.

$$\Delta t = T \times f_e \times \Delta F_e \quad \text{ekv. 14}$$

Där,

Δt = varaktighet för framtida erosionsflöde, år 2014-2100

T = tid i dagar 2014-2100

f_e = andel av tiden mellan åren 1971-2013 med erosionsflöde

ΔF_e = ökning av andel av tiden med erosionsflöde fram till år 2100 baserat på 75-persentilen och i förhållande till referensperioden

Förenklat innebär det att ökade flöden till följd av klimatförändring bidrar till att antalet tillfällen med erosionsflöden troligen ökar med drygt 30 %.

Tabell 6. Frekvensen av $Q \geq 300 \text{ m}^3/\text{s}$ och $Q \geq 275 \text{ m}^3/\text{s}$ mellan perioden 1971-2013 och superponerat på 75-percentilen för perioden 2021-2098 (se Figur 7).

Underlag för bedömning av varaktighet för erosionsflöde			
Erosionsflöde (Q_e)	$Q_e \geq 300 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_e \geq 275 \text{ m}^3/\text{s}$	
1971-2013, antal dygn	Ca 47 dygn	Ca 61 dygn	
1971-2013, andel av tid	0,003 (0,3%)	0,004 (0,4%)	
1971-2013, andel av tid, medel			0,35%
Flöde $Q_{75\text{-percentil}}$, 1963-1992 (referensperiod)	Ca 42 dygn/år	Ca 55 dygn/år	
Medelflöde $Q_{75\text{-percentil}}$, 2021-2050—2069-2098	Ca 46 dygn/år	Ca 87 dygn/år	
Procentuell ökning $Q_{75\text{-percentil}}$ till 2098 i förhållande till referensperioden	10%	58%	
Procentuell ökning $Q_{75\text{-percentil}}$, medel			34%
2014-2100, antal dygn (inkl skottår)			31412 dygn
Δt	$31412 \text{ d} \cdot 0,0035 \cdot 1,34 = 147 \text{ d}$		Ca 150 dygn

3.4.6 Delmodell 6 Sektioner för beräkning av bankerosion

Geotekniska fältundersökningar och stabilitetsberäkningar genomfördes i 30 sektioner längs Norsälven av konsult. I sju av dessa ska stabilitetsberäkningar också göras med hänsyn till klimatförändringar. I syfte att välja ut sju representativa sektioner klassades samtliga sektioner in i geologiska typmiljöer utifrån de geologiska förutsättningarna. Det kunde till exempel vara grund lerbassäng och flack mark, mäktig lerbassäng och ravinlandskap, stor lerbassäng över isälvs-material, och så vidare. I Tabell 7 framgår vilka sektioner som valdes och karakteristika för dessa.

Tabell 7. Valda sektioner för erosionsberäkning. Av tabellen framgår vilken sträcka beräkningen ska representera och på vilken sida, en beskrivning av typmiljö, samt modellerade maximal botten-skjuvspänning i sektionen vid flödet $300 \text{ m}^3/\text{s}$.

Sektion	Delsträcka som sektionen är tänkt att representera	N/S/E/W sida om älven	Typmiljö	Högsta botten-skjuvspänning (Pa) vid $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$
26/081	25/700-27/500	S	Stor mäktig lerbassäng, flack mark	0,3
17/336	16/800-18/400	W	Mycket mäktig lerbassäng, ravinlandskap	0,3
12/768	11/900-13/300	E	Mäktig lerbassäng bortom strandlinjen och över mäktigt isälvs-material, svämsediment, ravinlandskap	0,8
8/639	7/800-9/600+9/900-10/800 N/E samt 7/800-10/200 S/V	N	Stor lerbassäng över isälvs-material, svämsediment, brant slänt, flack överyta	0,7
7/101	5/500-7/800	E	Stor mycket mäktig lerbassäng, svämsediment, slänt, flack överyta	1,6
3/960	3/000-4/400	N	Mycket mäktig lerbassäng, svämsediment, slänt, flack överyta	0,6
0/879	0/000-1/400	E	Stor mycket mäktig lerbassäng, svämsediment, slänt, flack överyta	1,1

3.4.7 Delmodell 7 Beräkning av bottenerosion i GIS

Baserat på resultaten från samtliga delmodeller 1-6 (Tabell 2) kunde bottenerosionen beräknas i GIS (i bilaga 4 beskrivs hur detta görs i GIS). Baserat på resultaten från samtliga delmodeller 1-6 gjordes beräkningarna enligt följande riktlinjer:

- k_d , eroderbarhetskoefficienten enligt ekv. 4
- τ_o , bottenskiuvspänning för $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$
- τ_c , kritiska skiuvspänningar för de fyra jordartsklasserna och enligt (Tabell 8)
- Δt , tiden (varaktighet) för erosionsflöde mellan perioden 2014-2100 = cirka 150 dagar
- E_b , beräkning av erosion för en given tidsperiod och enligt ekv. 2

Observera återigen att ekv. 2 endast beräknar erosion och resultaten fås i eroderad meter per delta-tid. Ett resultat som ger ett minusvärde är således ingen ackumulation utan måste negligeras. Detta kommer att uppstå i de pixlar där bottenskiuvspänningen understiger den kritiska skiuvspänningen. Områden som markerats som berg i botten måste likaså negligeras från erosion.

Detaljeringsnivån på redovisning av erosion är $\pm 0,5\text{m}$. Det bedömdes inte relevant med högre noggrannhet på grund av att det föreligger osäkerheter i beräkningarna av ansatta parametrar. Resultatet levererades som shp-filer och erosionsberäkningarna i GIS är yttäckande för hela älvssträckan.

Landhöjningen är cirka $3,5 \text{ mm}/\text{år}$ i Karlstadsområdet (SMHI 2000), vilket på 86 år blir cirka 3 dm. Landhöjningen påverkar bottenerosionen men höjningen är så liten att den ryms inom osäkerhetsmarginalen.

Eftersom GIS-beräkningarna inte särskilt bra beskriver erosionen i själva undervattenslätten och släntfot kompletterades analysen med beräkningar i BSTEM (se Avsnitt 3.4.8) för ett antal utvalda sektioner, representativa för större områden (Tabell 7).

Tabell 8. Indelning av botten i fyra sedimentklasser utifrån backscatterdata och jordartsanalyser. dB=decibel. Kritisk skiuvspänning är beräknad enligt ekv. 12.

Klass (backscatter dB-range)	Tolkad backscatter (jordartsbenämning)	Tolkad backscatter (färg i GIS-skikt)	Kritisk skiuvspän- ning (Pa)
0-54	Siltig lera (siLe)		0,26
54-65	Sandig silt (saSi)		0,21
65-87	Siltig sand (siSa)		0,14
87-120	Grus, sten, berg		5

3.4.8 Delmodell 8 Beräkning av bankerosion i BSTEM

Bankerosionen beräknades med hjälp av Bank-Stability-Toe-Erosion-Model (USDA 2014) i Excel. Teknisk beskrivning av modellen framgår av USDA (2014). Beräkningar gjordes i sju sektioner. Erosionsberäkningarna i dessa sju sektioner låg sedan till grund för generalisering längs hela älven och redovisas i ”Skredrisker i ett förändrat klimat – Norsälven, Del 1 Kartor och beskrivningar”.

Sektionernas geometri plottades baserat på data från konsultens Slope/W-beräkningar för dessa sektioner. I BSTEM-modellen kan sektioner endast läggas in från vänster till höger och jordlager endast läggas in horisontellt. Lager, lagertjocklek och lageregenskaper bestämdes baserat på konsultens utvärdering av jordlagerparametrar redovisade i programvaran Slope för beräkning av släntstabilitet.

Varje sektion plottades i BSTEM och egenskaper för varje geologiskt lager angavs. Vattennivån ansattes till den modellerade vattennivån vid $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$. I BSTEM beräknas bottenskjuvspänning baserat på vattennivån och bottenlutningen men i föreliggande fall visste vi bottenskjuvspänningen utifrån den hydrodynamiska modelleringen. Eftersom ett värde på bottenlutning måste anges valdes den genom trial-and-error för att bottenskjuvspänningarna i BSTEM skulle stämma överens med de modellerade i SMHI:s modell vid $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$. För att kunna göra detta togs kontakt med Eddy Langedeon vid USDA som gav oss en version av BSTEM med en beräkningsflik som inte annars är synlig. I denna flik framgår vad skjuvspänningarna blir fördelat över sektionen.

I BSTEM går det även att lägga in information om vegetation och erosionsskydd. Erosionsskydd förekommer inte i någon av de valda sektionerna. Information om vegetation har inte lagts in.

Varaktigheten sattes till 150 dygn. Det finns möjlighet att köra BSTEM iterativt med olika tidssteg och uppdatera profilen efter varje tidssteg. Detta gjordes dock inte för att vara mer samstämmigt med beräkningen i GIS, samt att uppdateringen av profilen var relativt tidskrävande.

Stegen är följande i BSTEM (Figur 8-10):

- Lägg in geometri, flödesegenskaper och jordlagertjocklek, kör geometrin
- Välj egenskaper för jordlagren
- Kör Toe-Erosion Model
- Kör Bank-Stability Model
- Exportera ny (bankeroderad) profil, det vill säga uppdatera profilen i BSTEM

BSTEM simulerar erosion främst av släntfot och inkluderar därför inte bottenerosionen särskilt bra. Resultaten från BSTEM-simuleringarna kompletterades därför med beräkningar av bottenerosion i GIS.

Input bank geometry and flow conditions

Work through all 4 sections then hit the "Run Bank Geometry Macro" button.

1) Select EITHER Option A or Option B for Bank Profile and enter the data in the relevant box-cells in the alternative option are ignored in the simulation and may be left blank if desired.

2) Enter bank material layer thicknesses (if bank is all one material it helps to divide it into several layers)

3) If bank is submerged then select the appropriate channel flow elevation to include confining pressure and calculate erosion amount; otherwise set to an elevation below the bank toe.

To ensure bank profile is correct you can view it by clicking the View Bank Geometry button.

Option A - Draw a detailed bank profile using the boxes below

Option B - Enter a bank height and angle, the model will generate a bank profile

Channel and flow parameters

View Bank Geometry

Run Bank Geometry Macro

Definition of points used in bank profile

A - bank top: place beyond start of shear surface
 B - bank edge
 C-P - breaks of slope on bank (if no breaks of slope place as intermediary points)
 Q - top of bank toe
 R-U - breaks of slope on bank toe (if no breaks of slope then insert as intermediary points)
 V - base of bank toe
 W - end point (typically midpoint of channel)

Notes:
 Bank profile may overhang. If the bank profile is fully populated, the shear surface emergence point should be anywhere between points B and Q. The shear surface emergence point must not be on a horizontal section - the elevation of this point must be unique or an error message will display.

Figur 8. Indatafläk för släntgeometri. Exempel från sektion 0+879 E. Alternativ A har valts för att lägga in geometri. Geometrin kan endast läggas in från vänster till höger.

Select material types (or select "own data" and add values below)

Bank Material

Layer 1: Own data, Layer 2: Own data, Layer 3: Own data, Layer 4: Own data, Layer 5: Own data

Bank Toe Material

Own data

Bank and bank-toe material data tables.

These are the default parameters used in the model. Changing the values or descriptions will change the values used when selecting soil types from the list boxes above. Add your own data using the white boxes.

Material Descriptors		Bank Model Input Data				Groundwater Model Input Data						Toe Model Input Data			
Bank material type	Description	Mean grain size, D_{50} (m)	Friction angle ϕ (degrees)	Cohesion c' (kPa)	Saturated unit weight (kN/m ³)	ϕ^b (degrees)	Chemical concentration (ppm)	Hydraulic Conductivity k_{sat} (m/s)	Bulk Modulus (Pa)	Porosity	Residual water content	van Genuchten a (1/m)	van Genuchten n	τ_c (Pa)	K (cm ³ /Ns)
1	Boulders	0.512	42.0	0.0	20.0	15.0	-	1.743E-03	5.558E+08	0.280	0.590	3.2237	2.3286	498	0.004
2	Cobbles	0.128	42.0	0.0	20.0	15.0	-	1.743E-03	5.558E+08	0.280	0.590	3.2237	2.3286	124	0.009
3	Gravel	0.0113	36.0	0.0	20.0	15.0	-	3.160E-03	1.354E+08	0.280	0.590	3.2237	2.3286	11.0	0.030
4a and 4b	Angular sand	0.00035	32.3	0.4	18.5	15.0	-	7.439E-05	1.354E+07	0.280	0.590	3.2237	3.1769	Coarse (0.71 mm) or Fine (0.18 mm)	
5a and 5b	Rounded sand	0.00035	28.3	0.4	18.5	15.0	-	1.130E-06	6.004E+07	0.380	0.593	3.0583	2.3286		
6a, 6b and 6c	Silt	-	26.6	4.3	18.0	15.0	-	5.064E-06	1.049E+07	0.480	0.550	0.6577	1.6788	Erodible (0.100 Pa),	
7a, 7b and 7c	Soft clay	-	26.4	8.2	17.7	15.0	-	9.473E-07	1.354E+06	0.442	0.590	1.5812	1.4158	Moderate (5.00 Pa), or	
8a, 8b and 8c	Stiff clay	-	21.1	12.6	17.7	15.0	-	1.708E-06	5.417E+06	0.450	0.590	1.4962	1.2531	Resistant (50.0 Pa)	
	Own data layer 1		31.0	0.0	19.0	15.0	0.0							8.13	0.277
	Own data layer 2		30.0	4.5	18.5	15.0	0.0							0.21	0.218
	Own data layer 3		30.0	0.3	16.0	15.0	0.0							6.14	0.267
	Own data layer 4		30.0	2.3	17.5	15.0	0.0							0.26	0.196
	Own data layer 5														
	Own data Bank Toe													9.14	0.267

Need to know the critical shear stress (τ_c) ?

Input non-cohesive particle diameter (mm):

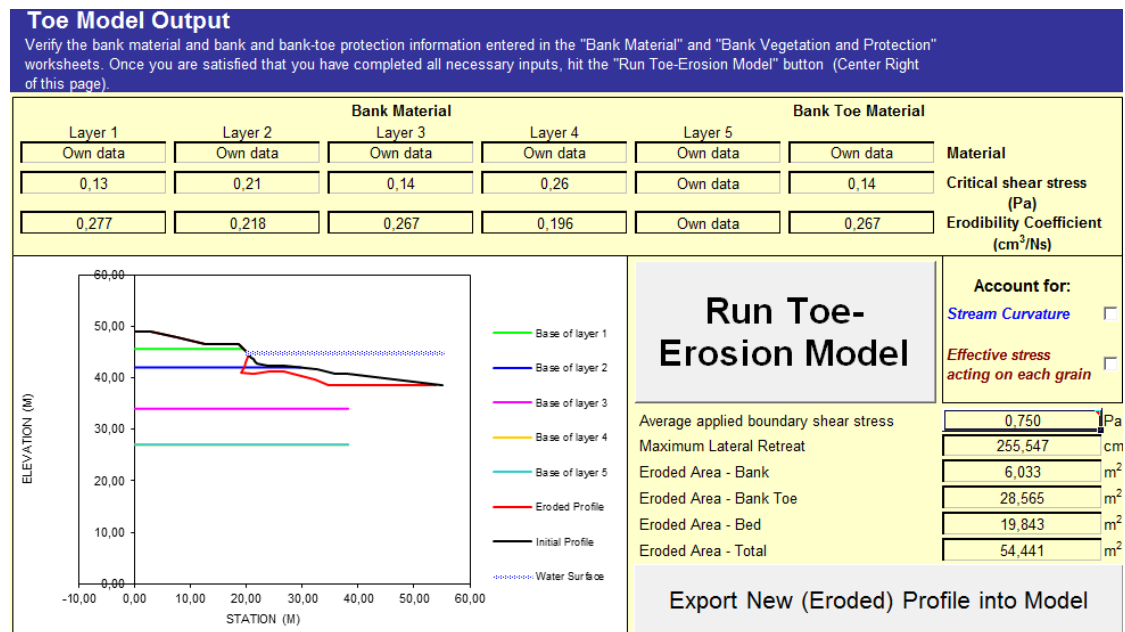
Critical Shear Stress τ_c (Pa):

Need to know the erodibility coefficient (k) ?

Input critical shear stress τ_c (Pa):

Erodibility Coefficient k (cm³/Ns):

Figur 9. Indatafläk för materialegenskaper. Exempel från sektion 0+879E.

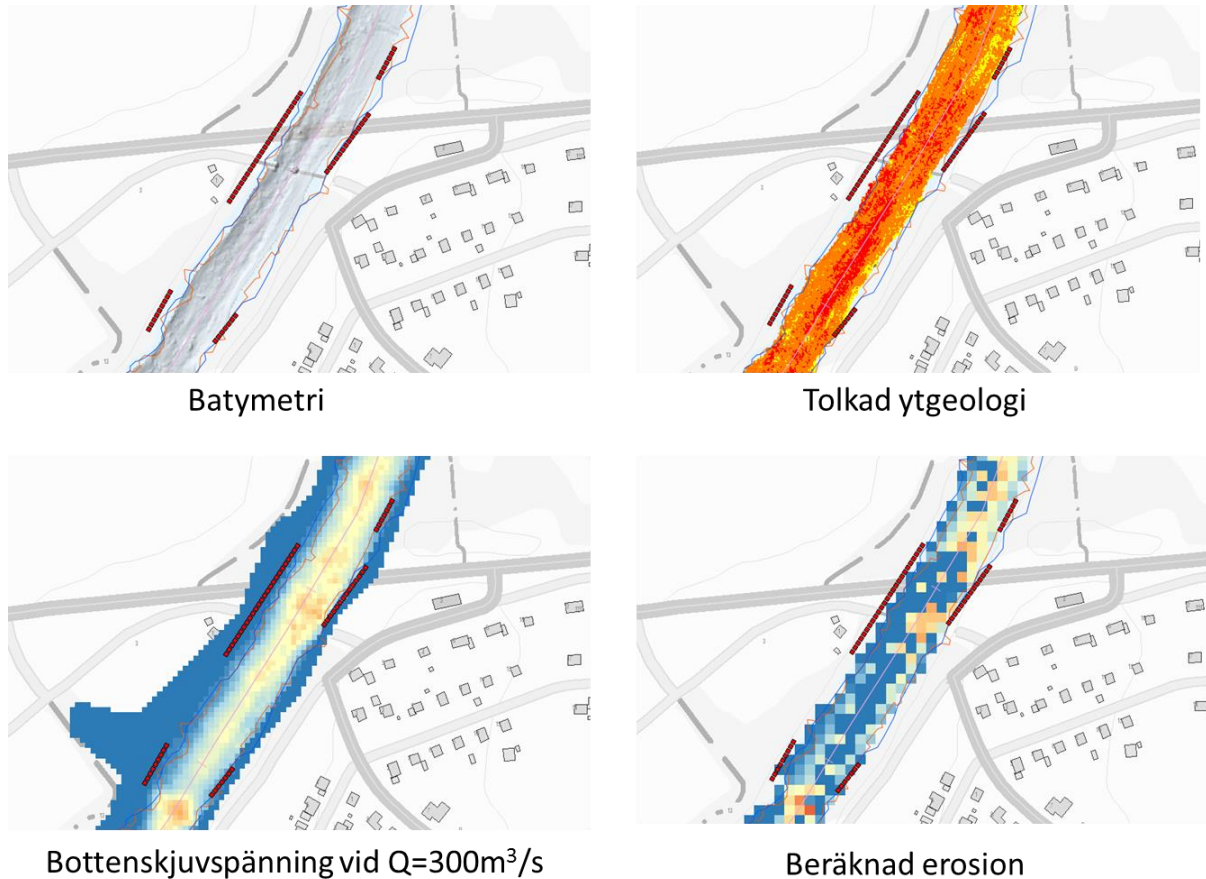


Figur 10. Simulerad bankerosion. Exempel från sektion 00/879E. Den svarta linjen visar ursprunglig geometri och den röda visar simulerad erosion. Det är endast bankerosion som simulerats, ej bottenerosion. Cellerna till höger i figuren visar den genomsnittliga bottenskjuvspänningen och hur mycket material som har eroderats bort.

4. Resultat av erosionsberäkningarna

4.1 Arbetsyta i QGIS

En av grundförutsättningarna för att ha överblick över all data och för att kunna hantera och beräkna data var att arbeta i GIS. En arbetsyta för erosionsuppdraget skapades således i QGIS och med ett antal lager relevanta för utredningen (se exempel, Figur 11).



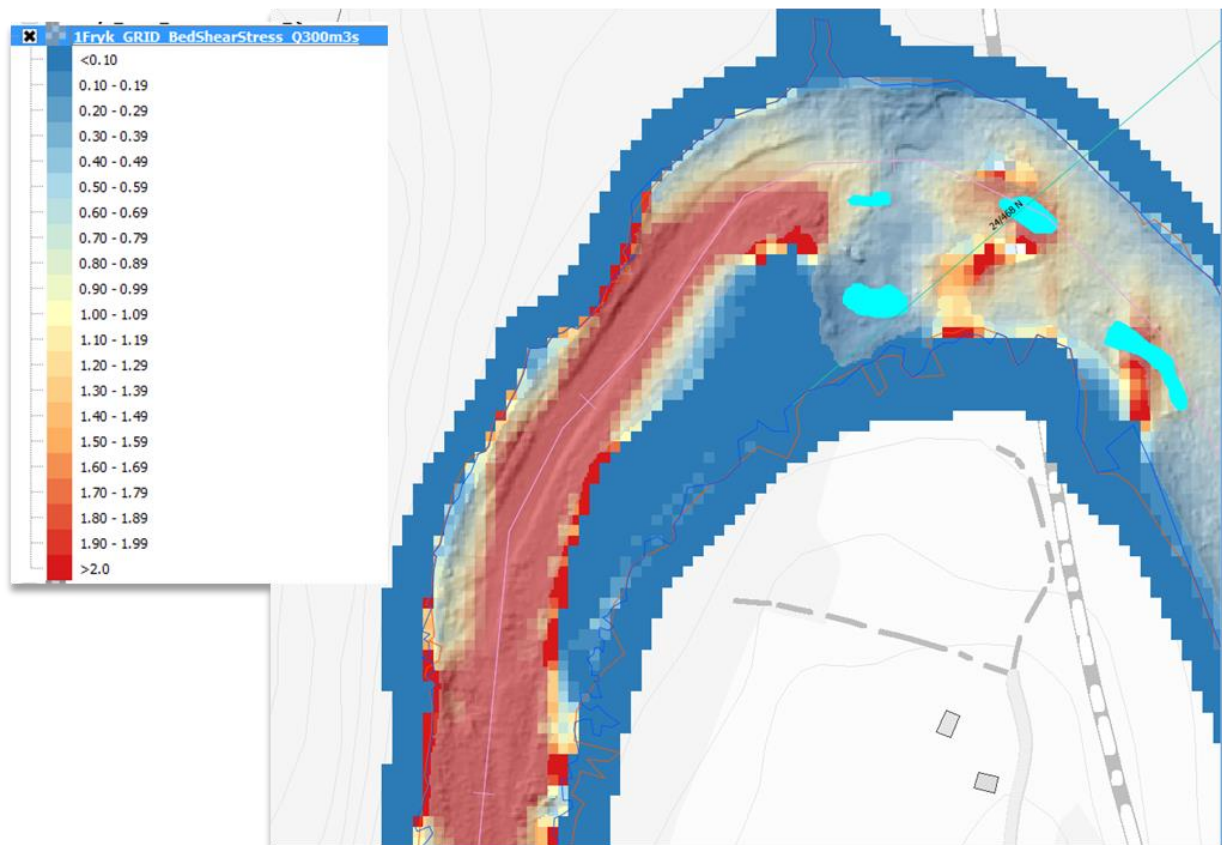
Figur 11. Norsälven vid Norsbron. Exempel på GIS-lager som visar batymetri (hillshade), tolkad ytgeologi, botten-skjuvspänningar och beräknad erosion. I figuren för botten-skjuvspänning har det mörkblå området inte buffrats efter strandlinjen utan följer terrängen, "bulan" ner till vänster finns således inte i verkligheten. De tjocka röda strecken är erosionsskydd. De tunna blåa och röda linjerna längs med strandlinjen är tolkad strandlinje från flygfoto år 1965/66 (blå) och 2013 (röd). (© Geodatasamverkan, SGI).

4.2 Bottenerosion, GIS

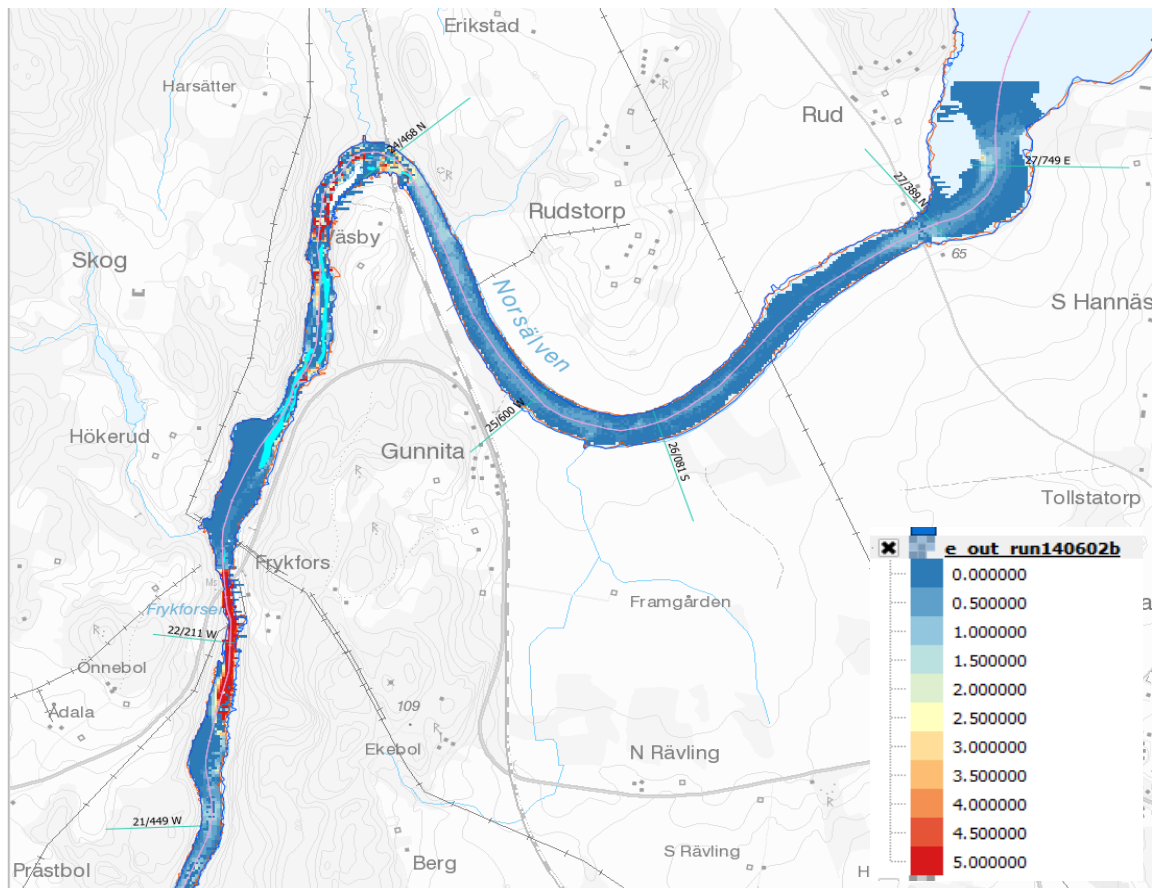
Bottenerosionen beräknades för de tre delsträckorna Fryken-Frykfors, Frykfors-Edsvalla och Edsvalla-Vänern och enligt modellerna beskrivna ovan. Detaljerad beskrivning av arbetsgången i GIS beskrivs i Bilaga 4. Beräkningarna resulterade i tre delmodeller, en för varje delsträcka, vilka lästes in i QGIS.

4.2.1 Fryken-Frykfors

Erosionen är tämligen ringa längs sträckan från Frykens utlopp i Norsälven till första skarpa kröken mot Frykfors. Omgivningen är flack och det är inte mycket erosion som sker längs sträckan. I kröken mot Väsby ökar skjuvspänningarna markant men materialet där utgörs också av grovt material. Muddring har tidigare skett i mittfåran strax söder om järnvägsbron, vilket syns tydligt på den batymetriska kartan (Figur 12). Det förekommer också berg-i-botten mellan denna skarpa krök och Frykforsens kraftstation som är belägen mellan två bergsklackar. Generellt varierar bottenerosionen från noll till under en meter mellan S Hannäs och Väsby. I kröken vid Väsby finns det områden med betydligt djupare erosion på sina ställen. Sannolikt är det berget som orsakat älvens nuvarande lopp med en skarp krök vid Väsby. Beräknad bottenerosion fram till år 2100 framgår översiktligt av Figur 13.



Figur 12. Norsälven Fryken-Frykfors, kröken vid Väsby. Bilden visar skuggrelief av batymetrin och botten-skjuvspänning (Pa) vid $Q=300 \text{ m}^3/\text{s}$. De ljusblå fälten är berg-i-botten och betongfundament för brofäste (järnvägsbro).



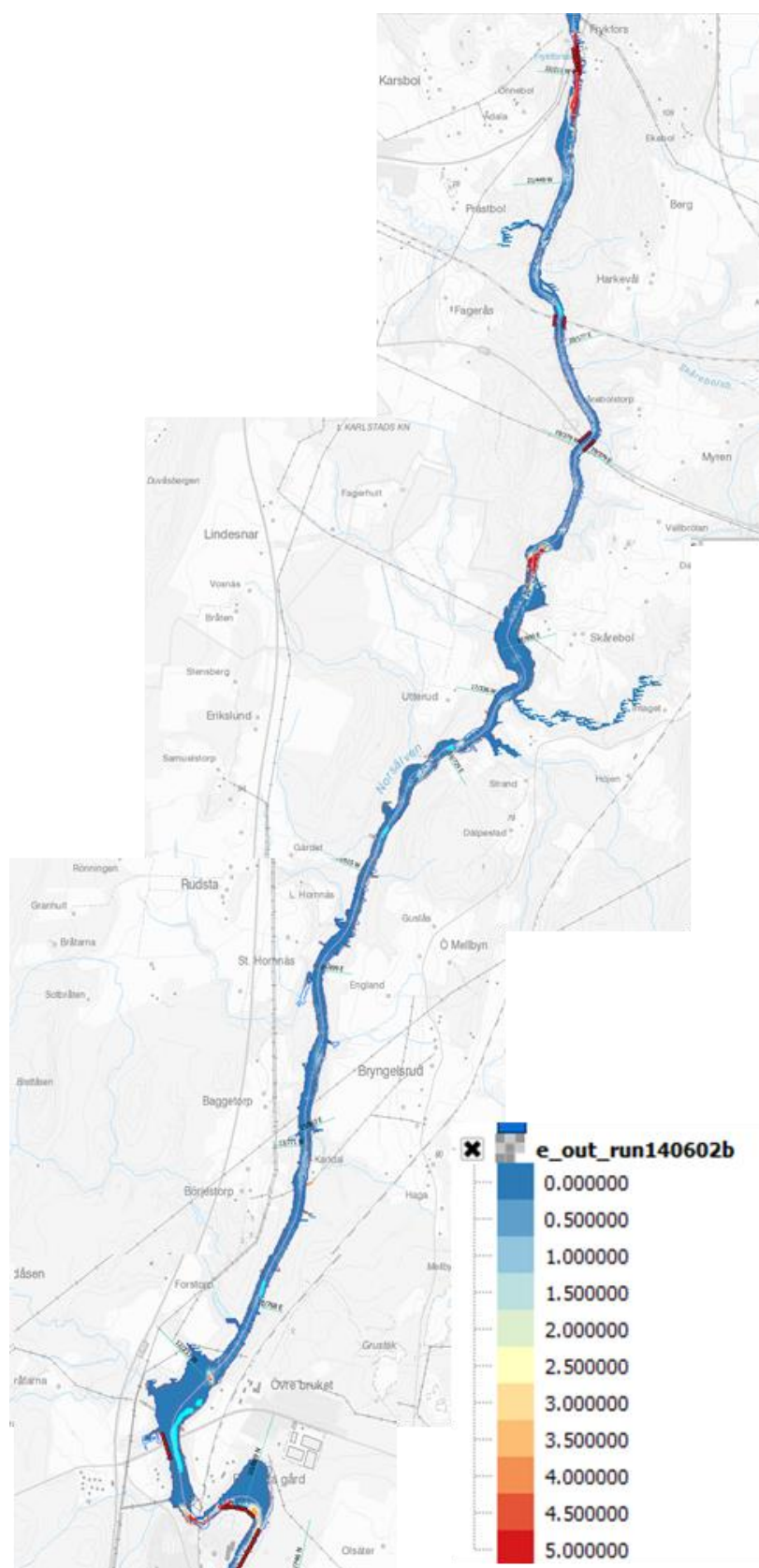
Figur 13. Norsälven, Fryken-Frykfors. Bilden visar modellerad erosion (m) fram till år 2100. De ljusblå fälten är berg-i-botten översiktligt tolkat från djuppenetrerande ekolod.

4.2.2 Frykfors-Edsvalla

Älven är mycket smal vid Frykforsens utlopp på grund av berg på båda sidor. Bottensjuvspänningen blir därför hög där eftersom vattnet tvingas igenom en smal passage och strömhastigheten därmed blir hög. Sannolikt ligger även berget nära botten och den kritiska bottensjuvspänningen är troligen ansatt för lågt, erosionsberäkningarna visar nämligen på orimligt stora erosionsdjup (över tio meter i vissa griddar).

Sträckan Frykfors-Edsvalla skär ner i ett utvecklat ravinlandskap och kraftstationen vid Edsvalla är placerad mellan två bergsklackar. Berg-i-botten förekommer sannolikt på enstaka ställen längs med älven. Förloppet är något meandrande men analys av strandförskjutning (se Avsnitt 4.5) visar inte på att det skulle pågå någon aktiv förändring av meanderlopp. Bottensjuvspänningarna vid $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ är främst förhöjda precis nedströms Frykfors kraftstation vilket inte är förvånande eftersom berg på båda sidorna gör att älven är ganska smal här. Erosionsskydd är här utlagda på båda sidor om älven. Därtill är bottensjuvspänningarna tydligt förhöjda strax söder om vägbro 61, vid Skårebol (Figur 14). Bottensjuvspänningen är här över 2 Pa ($Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$) och erosionen är därför som tydligast vid dessa två områden även om den sannolikt är överskattad vid Frykforsen.

Strax söder om Utterud är bottensjuvspänningen något förhöjd vid $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$, mellan 0,4-0,8 Pa (upp till drygt 2 m bottenerosion), så även vid Bryngelsrud och Karldal (0,3-0,6 Pa, upp till drygt 1 m bottenerosion). I övrigt är beräknade bottenerosion fram till år 2100 ganska låg (under 1 m). Beräknad bottenerosion fram till år 2100 framgår översiktligt av Figur 14.



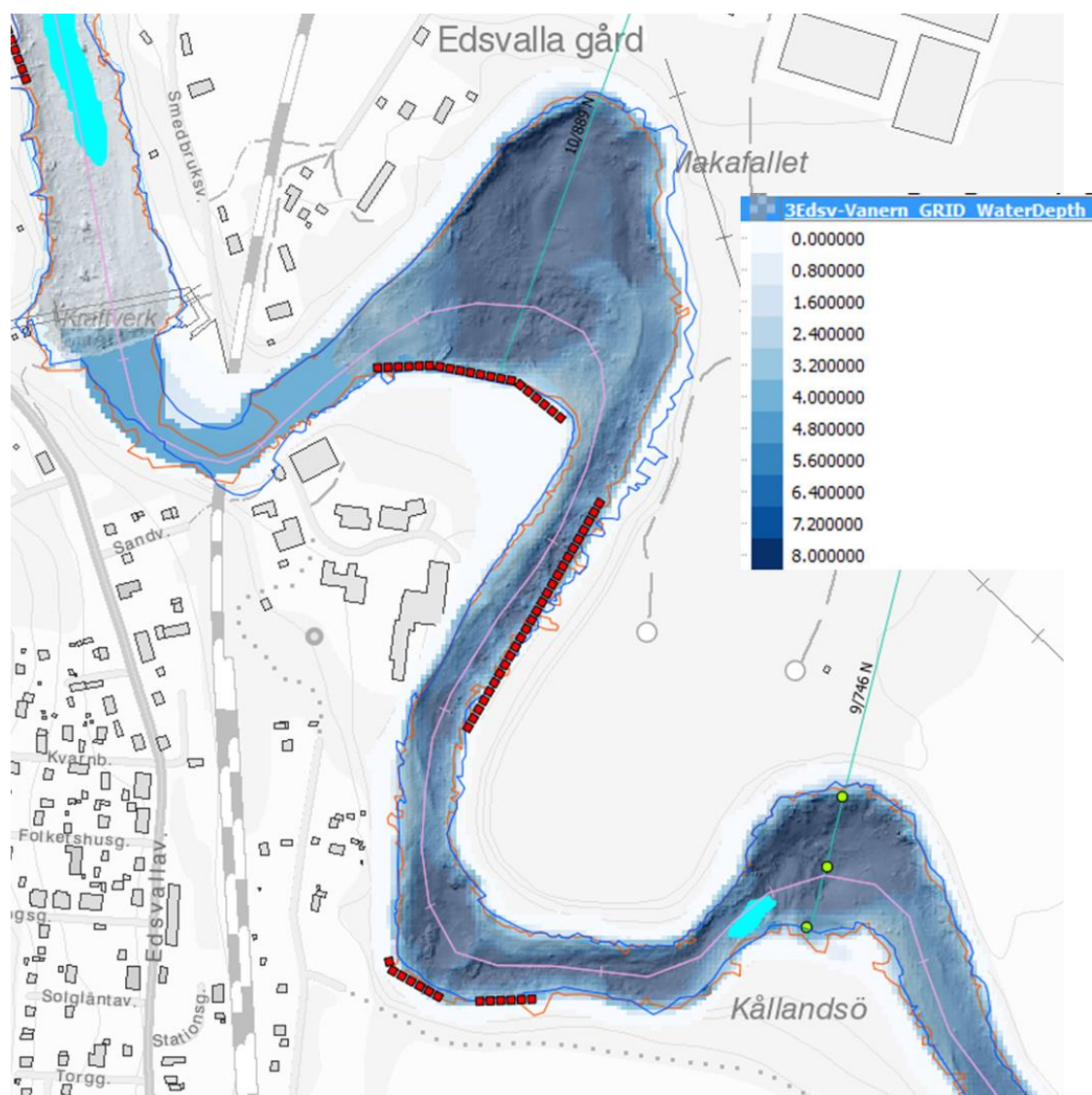
Figur 14. Norsälven, Frykfors-Edsvalla. Bilden visar modellerad erosion (m) fram till år 2100. De ljusblå fälten är berg-i-dagen översiktligt tolkat från djuppenetrerande ekolod. Erosionsskydd är markerade som tjocka röda sträck längs med strandlinjen. Detaljerna är svåra att se i figuren men är tydliga i GIS där det går att zooma in.

4.2.3 Edsvalla-Vänern

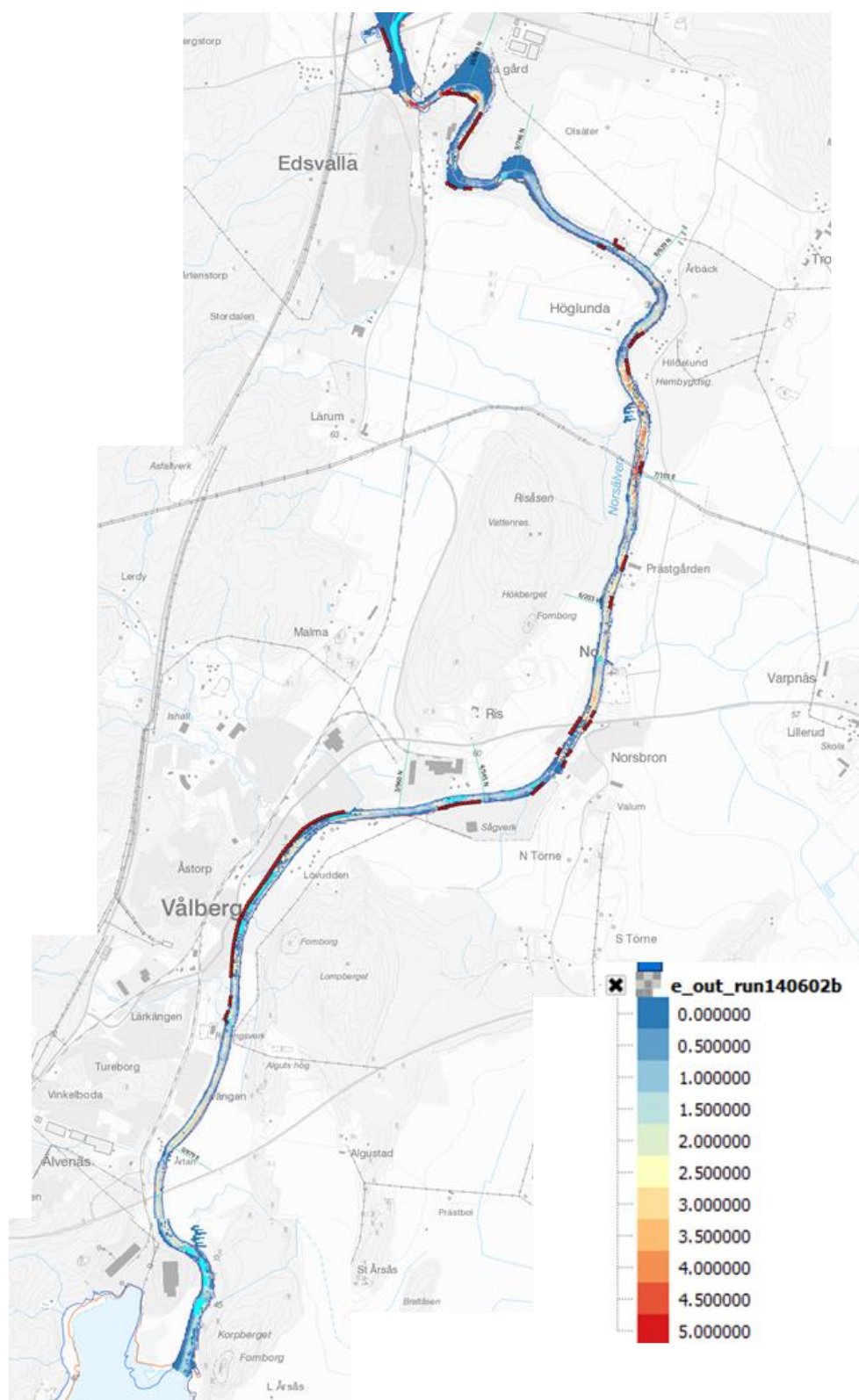
Bottenskjuvspänningarna är tydligt förhöjda vid ett flertal platser längs älven vid $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$: kröken precis söder om Edsvalla kraftstation, Hildelund, Prästgården, Nor, Norsbron, Vålberg vid Lövudden, Älvängen, Årtan – i princip en större del av hela älvsträckan. Bottenskjuvspänningarna ligger runt 1 Pa med undantag för första kröken precis söder om Edsvalla med över 2 Pa, samt sträckan från Hildelund och mot Prästgården med upp mot cirka 1,5 Pa.

Den beräknade bottenerosionen precis efter Edsvalla kraftstation och mot älvens södra/västra strand är sannolikt något överskattat på grund av att den kritiska skjuvspänningen sannolikt borde ansatts ett högre värde eftersom det troligen finns berg nära botten. Utlagt erosionsskydd längs med den sydvästra stranden visar dock på att bankerosion pågår. På motstående sida, vid Edsvalla gård och Makafallet, finns en djuphåla (över 15 m vattendjup) och ingen bottenerosion beräknas uppstå här. Det är oklart vad som format djuphålan. Ytterligare en djuphåla finns i kröken vid Kållandsö (ner mot 20 m vattendjup), se Figur 15. Vid udden mitt emot Edsvalla gård ser det ut som om det formats en spit (sediment som lagt sig i formen av en krok) och vattendjupet är här bara 3-5 m medan vattendjupet i djuphålan (mörkblått, sektion 10/889N) når över 15 m. Det tyder på att det förekommer viss virvelbildning just här. I kröken mellan Makafallet och Kållandsö, sydvästra strandlinjen där det ligger erosionsskydd, är vattendjupet också relativt stort med ner till cirka 11 m.

Beräknad bottenerosion fram till år 2100 framgår översiktlig av Figur 16. Genomsnittlig beräknad bottenerosion fram till år 2100 och för sträckan Kållandsö-Rosenlund beräknas uppgå till 1,5-2,5 m, för att öka söder om Rosenlund där bottenerosionen kan nå över 3 m på sina ställen. En bit söder om Norsbron minskar sedan bottenerosionen något till under 2 m och det finns indikation på att berget ligger grunt. Berg förekommer troligen också grunt vid Lövudden. Beräknad bottenerosion fram till år 2100 för sträckan Norsbron-Vålberg varierar från någon halvmeter upp till 3 m, för att sedan öka längs med Älvängen där bottenerosionen kan nå över 3 m.



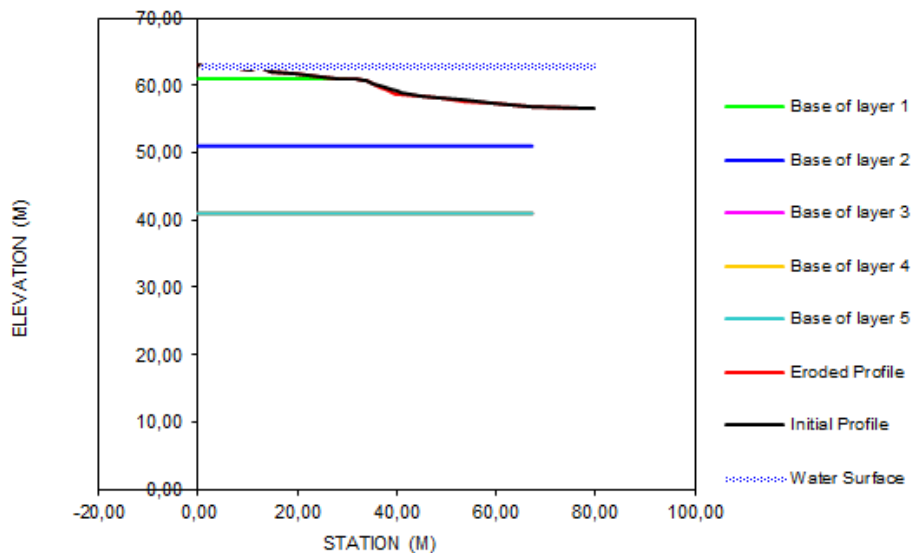
Figur 15. Bilden visar bottendjup och batymetri, samt två djuphålor vid sektion 10/889N och 9/746N. Vid 10/889N ser det ut som om det har formats en spit (sediment som lagt sig i formen av en krok) vid udden, det vill säga att det sedimenterar material där. De ljusblå fälten är berg-i-botten översiktligt tolkat från djuppenetrerande ekolod. De tjocka röda strecken är erosionsskydd. De tunna blåa och röda linjerna längs med strandlinjen är tolkad strandlinje från flygfoto år 1965/66 (blå) och 2013 (röd).



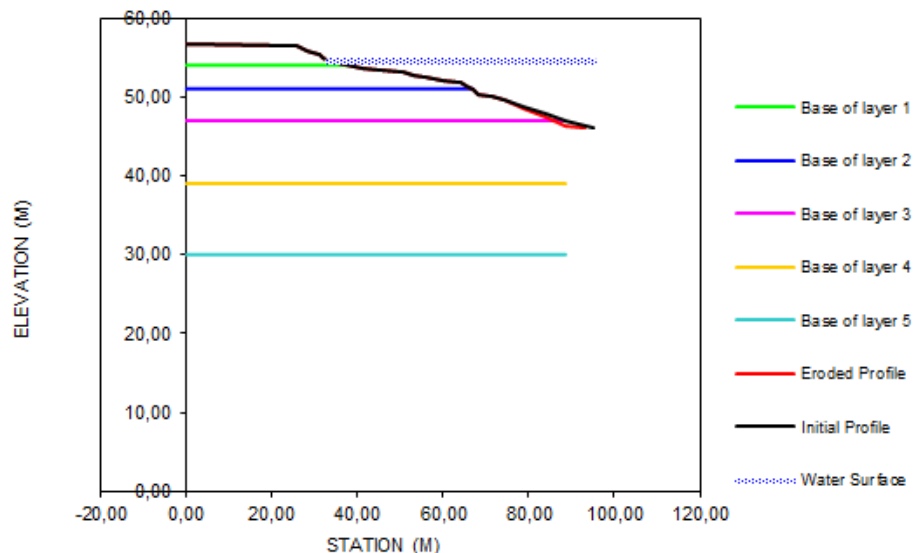
Figur 16. Norsälven, Edsvalla-Vänern. Bilden visar modellerad erosion (m) fram till år 2100. De ljusblå fälten är berg-i-botten översiktligt tolkat från djuppenetrerande ekolod. Erosionsskydd är markerade som tjocka röda sträck längs med strandlinjen. Detaljerna är svåra att se i figuren men är tydliga i GIS där det går att zooma in.

4.3 Bankerosion i sektioner, BSTEM

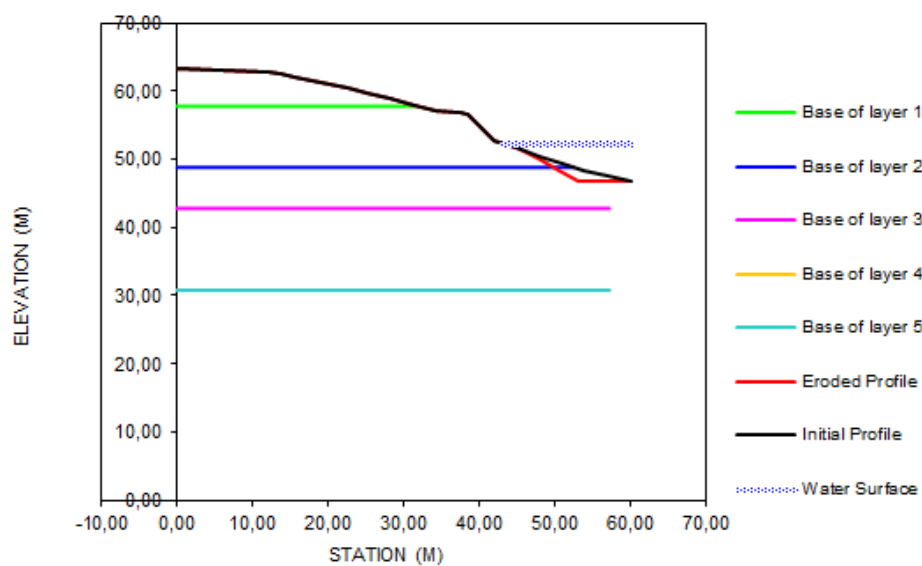
Simuleringarna av bankerosion resulterade i en originalfil och minst en resultatfil i Excel per sektion. Simulerad bankerosion med BSTEM framgår av Figur 17-23 (figureerna visar resultaten så som de redovisas i BSTEM). Som framgår av simuleringarna ökar erosionen nedströms, med mycket liten erosion i den översta delen mellan Fryken och Frykfors, något tydligare i mellersta delen, Frykfors-Edsvalla, och störst längs sträckan Edsvalla-Vänern.



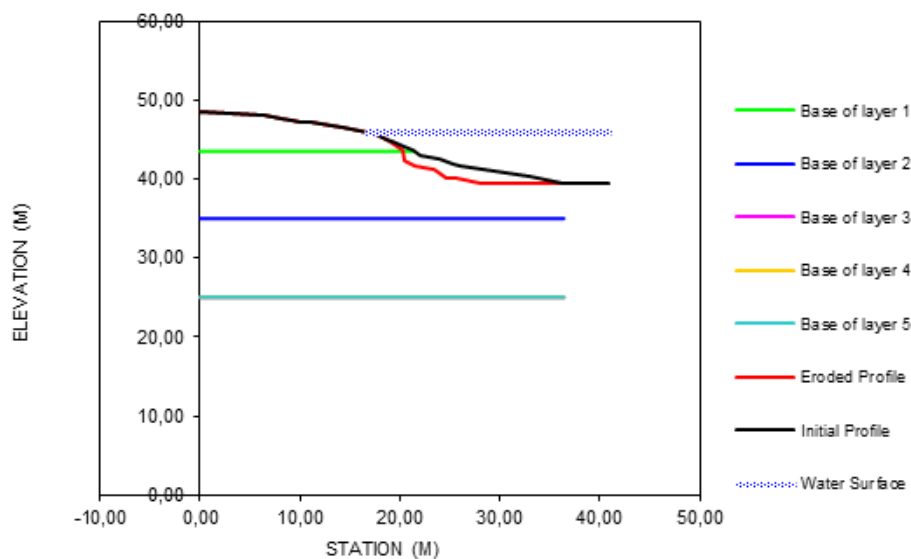
Figur 17. Sektion 26+081 S, sträcka Fryken-Frykfors. Simulerad bankerosion. Svart linje visar ursprunglig geometri och röd linje visar simulerad erosion.



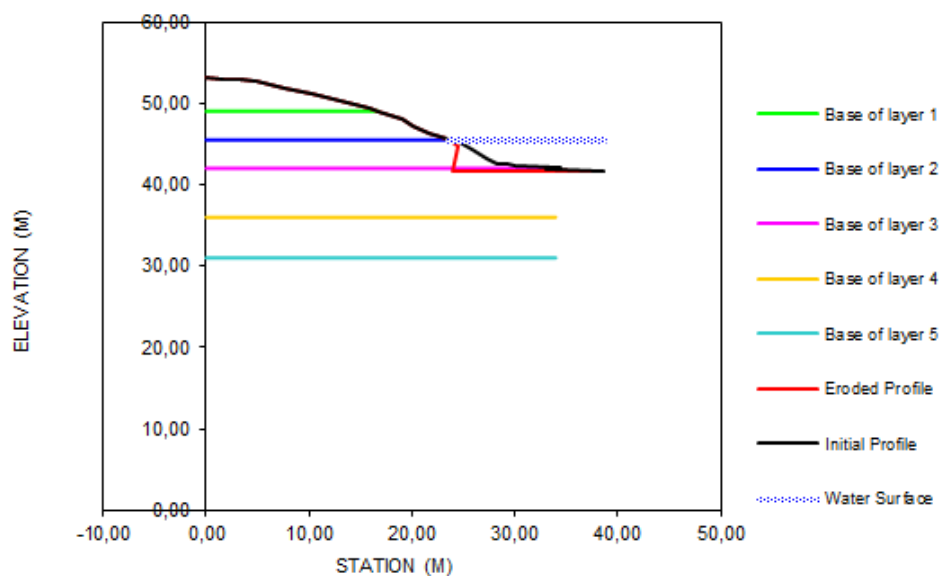
Figur 18. Sektion 17+336 W, sträcka Frykfors-Edsvalla. Simulerad bankerosion. Svart linje visar ursprunglig geometri och röd linje visar simulerad erosion.



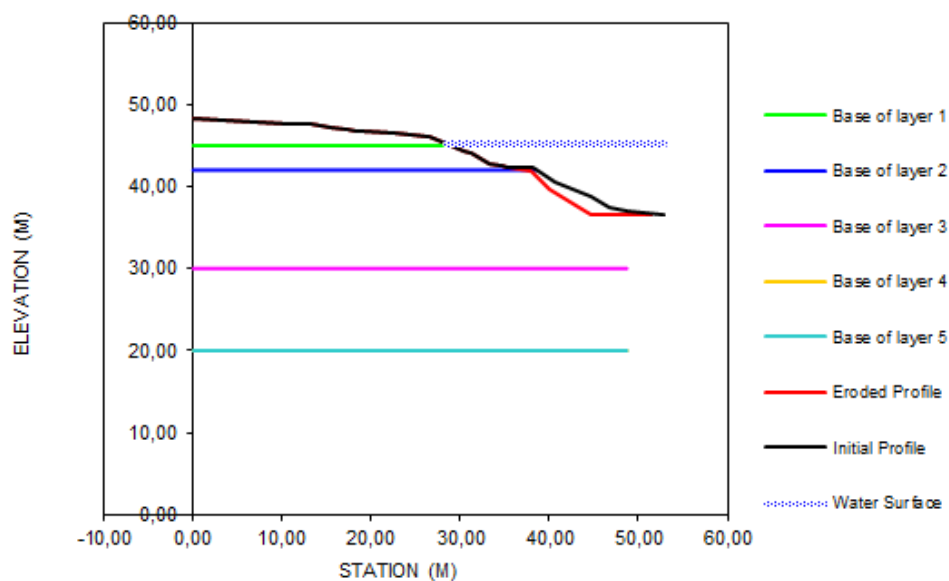
Figur 19. Sektion 12+768 E, sträcka Frykfors-Edsvalla. Simulerad bankerosion. Svart linje visar ursprunglig geometri och röd linje visar simulerad erosion.



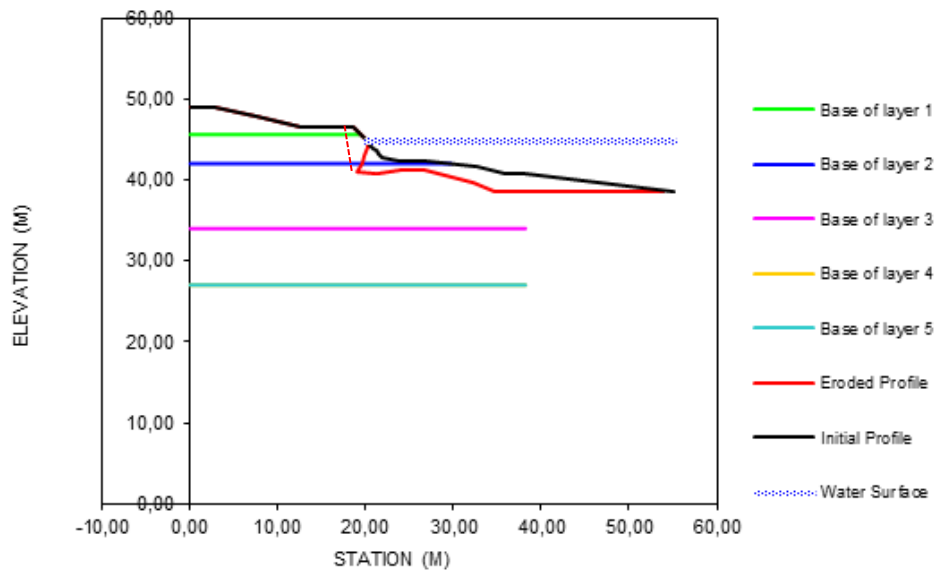
Figur 20. Sektion 8+639 N, sträcka Edsvalla-Vänern. Simulerad bankerosion. Svart linje visar ursprunglig geometri och röd linje visar simulerad erosion.



Figur 21. Sektion 7+101 E, sträcka Edsvalla-Vänern. Simulerad bankerosion. Svart linje visar ursprunglig geometri och röd linje visar simulerad erosion.



Figur 22. Sektion 3+960 N, sträcka Edsvalla-Vänern. Simulerad bankerosion. Svart linje visar ursprunglig geometri och röd linje visar simulerad erosion.



Figur 23. Sektion 0+879 E, sträcka Edsvalla-Vänern. Simulerad bankerosion. Svart linje visar ursprunglig geometri och röd linje visar simulerad erosion. I det här fallet visar det på underminering och överhänget kommer att rasa ner (streckad linje).

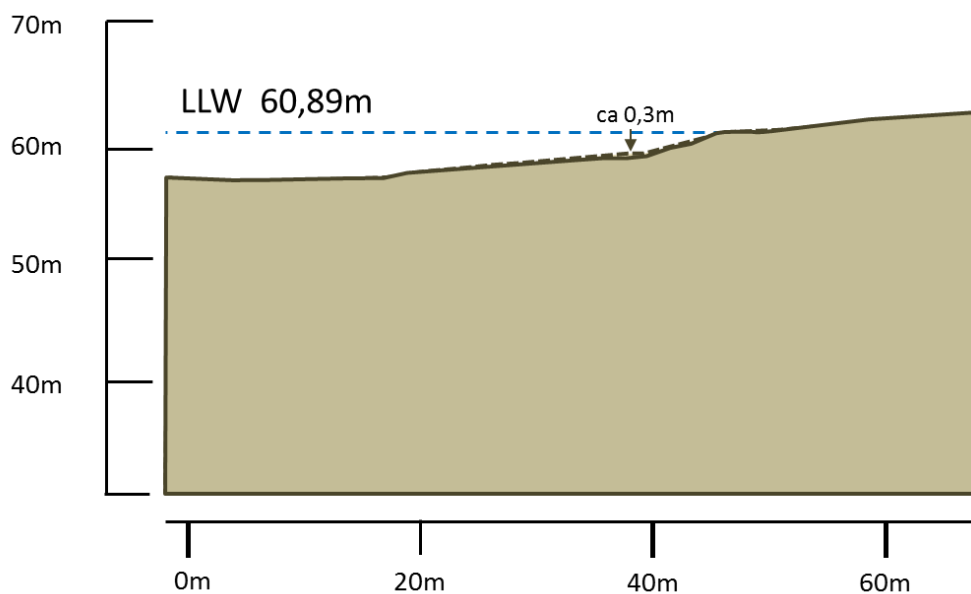
4.4 Sammanvägning av bankerosion och bottenerosion i beräkningssektioner

I BSTEM finns den nya geometrin plottad och med koordinater som går att plocka ut. Detta underlag tillsammans med resultatet i GIS sammanvägdes. Både GIS-beräkningarna och simuleringarna i BSTEM visar på att erosionen är som tydligast i Norsälvens södra del, det vill säga sträckan Edsvalla-Vänern.

Sammanvägning av resultaten fick göras för hand och skissades in på konsultens uppritade sektioner, tillsammans med instruktioner för justering av sektionernas geometri under vatten med hänsyn till erosion. Detta redovisas i det styrande dokumentet 99ST001 (SGI 2013). Avstämning gjordes med den konsult som skulle genomföra stabilitetsberäkningar med hänsyn till förändrad släntgeometri. Sektionerna före och efter erosion framgår även av skisserna i Figur 24-30. Notera att skalan varierar mellan figurerna.

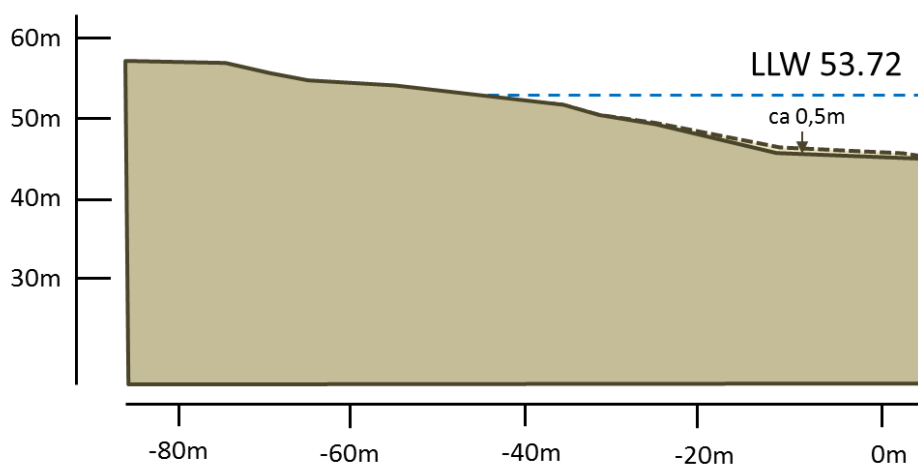
Beräkningarna är gjorda med hänsyn till ökad flöde till följd av klimatförändring, men erosionen pågår även utan klimatförändring. Baserat på beräkningarna i Avsnitt 3.4.5 kan klimatförändringen orsaka en ökning av varaktigheten för möjliga erosionsflöden med drygt 30 %. Ett beräknat erosionsdjup på 3 m blir istället knappt 2 m utan effekt av klimatförändringen. Men, i princip är detta inte relevant eftersom en klimatförändring redan pågår.

Sektion 26+081S



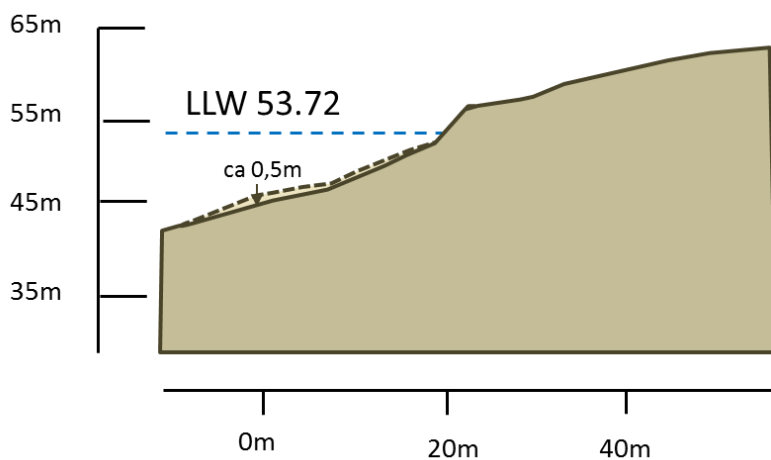
Figur 24. Sektion 26+081 S, sträcka Fryken-Frykfors. Mycket begränsad erosion av slänkfot. Ingen eller mycket begränsad bottenerosion.

Sektion 17+336W



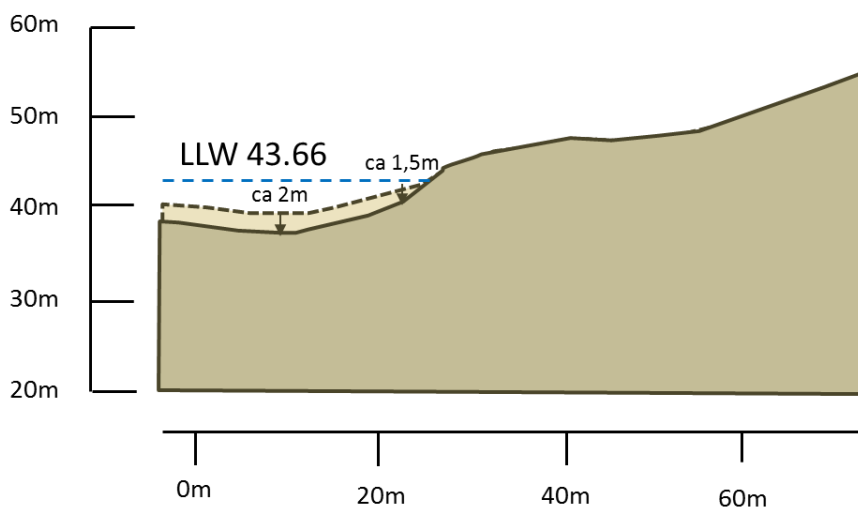
Figur 25. Sektion 17+336 W, sträcka Frykfors-Edsvala. Mycket liten erosion av slänkfot och undervattenslänt, cirka 0,5 m.

Sektion 12+768E



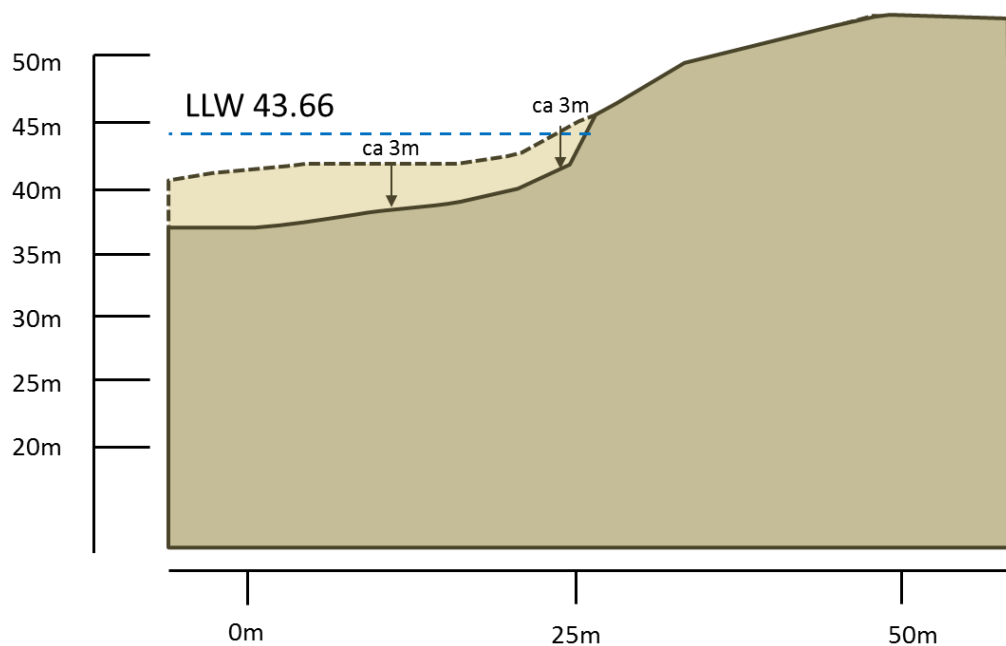
Figur 26. Sektion 12+768 E, sträcka Frykfors-Edsvalla. Mycket liten erosion av undervattenslän, cirka 0,5 m. vid slänfot.

Sektion 8+639N



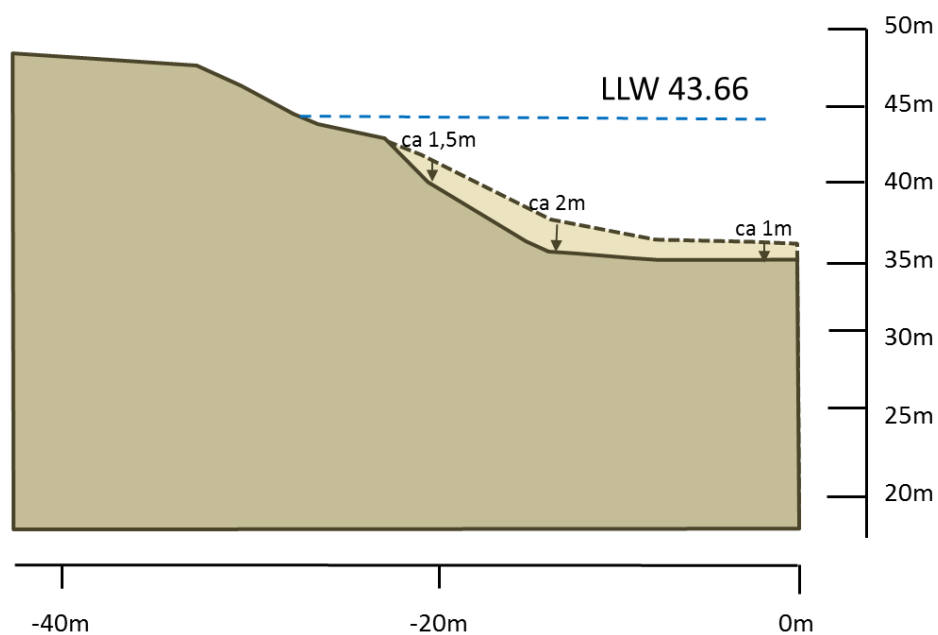
Figur 27. Sektion 8+639 N, sträcka Edsvalla-Vänern. Erosion av slän och botten, framförallt bottenerosion med cirka 2 m som mest vid "väglinjen".

Sektion 7+101E



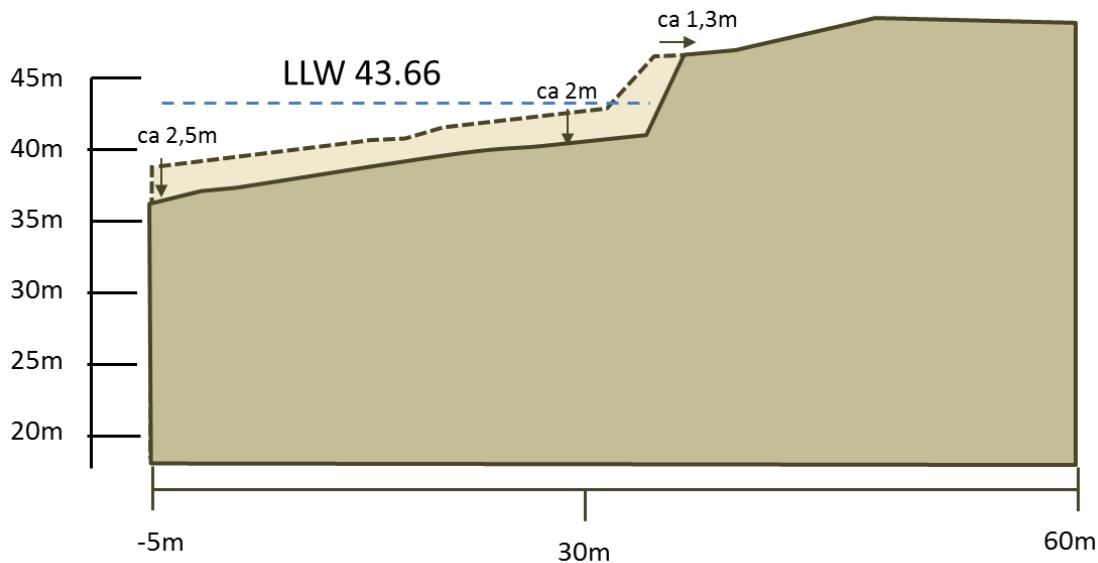
Figur 28. Sektion 7+101 E, sträcka Edsvalla-Vänern. Kraftig erosion av slänt (strandförsjutning) och botten med cirka 3 m. Erosionen avtar i mitten av älven.

Sektion 3+960N



Figur 29. Sektion 3+960 N, sträcka Edsvalla-Vänern. Erosion av undervattenslänt och botten, cirka 1-2 m, erosion med cirka 1 m i den djupaste delen av älvfåran.

Sektion 0+879E



Figur 30. Sektion 0+879 E, sträcka Edsvalla-Vänern. Kraftig erosion av slänt (strandförskjutning) och botten med cirka 2-3 m till den djupaste delen av älvfåran.

4.5 Bedömning av rimlighet i resultaten

Erosionsberäkningarna kan översiktligt verifieras genom att jämföra resultaten med uppgifter om tidigare strandförskjutningar och genom att jämföra geometriska förändringar i sektioner lodade vid olika tillfällen. I många fall baseras en bedömning av erosionens storlek på just analys av strandförskjutning via flygfoton. Förändringar i strandlinje beräknades genom diakronisk analys (analys av strandförskjutning med tiden) av digitaliserade flygfoton från 1965/66 som jämfördes med flygfoton från 2013 (Figur 31, se Bilaga 5 för beskrivning). Resultatet levererades som en shp-fil. Resultaten gav också information om förändringar i meanderlopp.

Norsälven är måttligt meandrande och erosionsprocesserna är så långsamma att inga stora förändringar hinner uppstå inom en tidsram på knappt 50 år.

Beräknad erosion i släntens överkant och i sektioner har jämförts med strandförskjutningen. Baserat på detta har resultaten bedömts som rimliga. Resultaten i den södra delen (Edsvalla-Vänern) har även jämförts med resultaten av den jämförande batymetrin och baserat på detta har beräknad storlek på bottenerosion bedömts som rimliga. Det finns dock två stora undantag och det är strax söder om kraftstationerna där den kritiska skjuvpänningen sannolikt har ansatts för lågt eftersom det sannolikt ligger berg nära botten. Erosionsberäkningarna visar därför på orimligt stora erosionsdjup (över 10 m precis nedanför Frykfors kraftstation och upp mot 9 m precis nedanför Edsvalla kraftstation).



Figur 31. Exempel på resultat av analys av strandförskjutning baserad på flytfoton från åren 1965/66 och 2013. Den blå linjen visar strandlinjen 1965/66 och den röda visar strandlinjen 2013.

4.6 Osäkerheter

Kritisk skjuvspänning är bestämd utifrån ett fåtal (< 30 stycken) ytprov på bottensediment och inga analyser är gjorda på djupare sediment.

Vid jämförelse mellan tidigare och nu uppmätta sektioner är analysen gjord med hänsyn till befintligt bottensediment. Det är möjligt att sedimentet var finare eller grövre och den kritiska skjuvspänningen därmed något högre eller lägre. Jämförande sektioner fanns endast att tillgå för sträckan Edsvalla-Vänern och inte alla kunde användas på grund av att muddring skett och att erosionsskydd lagts ut, det vill säga att undervattenslätten medvetet har modifierats.

Vid försöket att gaffla in vilken ekvation på eroderbarhetskoefficienten (k_d), erosionsflöde (Q) och kritisk bottenskjuvspänning (τ_c) framgår att ingen ekvation kan beskriva erosionen i samtliga sektioner helt korrekt. Däremot har det gått att ta bort de som definitivt inte stämmer och om valda parametrar kan beskriva den uppmätta erosionen $\pm 0,5$ m upp till 1 m har det bedömts som en tillräckligt god överensstämmelse. Noggrannare än så har inte varit möjligt. Målet har heller inte varit att ha en noggrannhet högre än 0,5 m eftersom osäkerheterna är så stora vad gäller att ansätta/beräkna rätt värden på ingående parametrar i ekvationerna och inte minst vad gäller framtida klimatscenarier. En möjlighet hade varit att arbeta mer med osäkerheter och tydliggöra dessa i resultaten. Det har dock inte funnits utrymme för det inom detta uppdrag.

På det sättet som erosion har räknats har det inte gått att beräkna erosion i steg och därmed inte heller att uppdatera botten och sedimentets egenskaper efter varje erosionssteg och räkna om skjuvspänningarna till följd av vattenströmningen. Erosionen sker inte i jämn takt utan sker vid enstaka flödestoppar. Efter varje erosion ändras förutsättningarna och geometrin förändras, särskilt om erosionen orsakar att delar av banken rasar ner.

Resultaten redovisade här ger en uppfattning om var erosionen sannolikt kommer att bli som störst men man ska vara medveten om att osäkerheterna är stora.

5. Slutsatser och rekommendationer

Metodiken som sådan är framkomlig om än något tidskrävande. Svårigheterna ligger i att kunna få fram så bra värden på parametrarna som möjligt för att kunna beskriva processerna så korrekt som möjligt. Både beräkningarna i GIS och BSTEM är samstämmiga och på de platser där bottenerosionen beräknats som stor är också simulerad erosion i sektionerna stora, och tvärtom. De stämmer också med en generell uppfattning av älven efter allt arbete som pågått inte bara inom erosionsuppdraget utan även inom andra deluppdrag. Sammantaget ger det en trygghet i levererade resultat.

Det finns en möjlighet att modellera/simulera förändringar i hydromorfologin med mjukvara för att på så sätt få en mer heltäckande bild av erosion (samt ackumulation och transport). Noggrannheten i sådana modeller är inte bättre än underlaget och osäkerheterna hade sannolikt varit lika stora ändå. En hydromorfologisk modellering har en hydrodynamisk modell i grunden och steget däremellan är inte så stort när ändå batymetri och hydrodynamisk data finns, vilket bör beaktas inför framtida erosionsberäkningar.

Önskvärt för att förbättra noggrannheten är framför allt fler sektioner att jämföra verklig erosion med beräknad men detta är svårt att efterkonstruera. Därtill är det önskvärt med fler sedimentanalyser och på flera nivåer. Både eroderbarhetskoefficienten och kritisk bottenskjuvspänning bör mätas i fält för att ge mer korrekta värden men detta är en stor insats både vad gäller inköp av utrustning och genomförande.

Inom detta uppdrag gjordes ett försök för att få fram varaktigheten för de flöden som bedömdes vara mest styrande för erosionen. Den ansatsen som användes kan förstås ifrågasättas men det var den vägen som bedömdes möjlig utifrån det underlag som fanns att tillgå.

Referenser

- Chanson, H 2004, *The hydraulics of open channel flow: An introduction, Second edition*, Elsevier.
- Fischenich, C 2001, *Stability thresholds for stream restoration materials*, EMRRP Technical Notes Collection (ERDC TN-EMRRP-SR-29), Vicksburg, MS.
- Göransson, G, Persson, H & Lundström, K 2011, *Transport av suspenderat material i Göta älv*, Statens geotekniska institut, SGI, Göta älvutredningen, GÄU, Delrapport 4, Linköping.
- Hanson, G 1990, 'Surface erodibility of earthen channels at high stresses: Part I, Open channel testing', *Transactions of the ASAE*, vol. 33, no 1, pp. 127–131.
- Hanson, G & Cook, K 1997, 'Development of excess shear stress parameters for circular jet testing', ASAE, Paper No. 97-2227.
- Hanson, G & Simon, A 2001, 'Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the Midwestern USA', *Hydrological Processes*, vol. 15, no. 1, pp. 23–38.
- Karmaker, T & Dutta, S 2011, 'Erodibility of fine soil from the composite river bank of Brahmaputra in India', *Hydrological Processes*, vol. 25, no. 1, pp. 104–111.
- Klingberg, F 2011, *Bottenförhållanden i Göta älv*, Statens geotekniska institut, SGI, Göta älvutredningen, GÄU, Delrapport 6, Linköping.
- Larson, M 2014, Kommunikation med professor Magnus Larson, Lunds tekniska högskola, LTH.
- Marin Miljöanalys AB 2011, *Ytgeologisk undersökning med backscatter – Analys för Göta älv och Nordre älv*, Statens geotekniska institut, SGI, Göta älvutredningen, GÄU, Delrapport 5, Linköping.
- Midgley, T, Garey, A & Derek, M 2012, 'Evaluation of the bank stability and toe erosion model (BSTEM) for predicting lateral retreat on composite streambanks', *Geomorphology*, vol. 145-146, pp. 107–114.
- MMA AB 2014, *Sjömätning av Norsälven*, Marin Miljöanalys AB (MMA AB), uppdragsnummer 497-1310.
- Partheniades, E 2009, *Cohesive sediments in open channels, Properties, transport, and applications*, Elsevier.
- Partheniades, E 1965, 'Erosion and deposition of cohesive soils', *American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulics Division*, vol. 91, no. 1, pp. 105-139.
- Persson, G, Ohlsson, A, Eklund, D, Sjökvist, E & Hallberg, K 2014, *Klimatanalys – Värmlands Län*, Publikationsnummer 2014:02, Länsstyrelsen Värmland, Karlstad.
- Påsse, T 2013, *Geologisk beskrivning av Norsälven*, Sveriges Geologiska Undersökning, dnr 35-1702/2013.
- Rydell, B, Persson, H, Blied, L & Rankka, W 2011a, *Erosionsförhållanden i Göta älv*, Statens geotekniska institut, SGI, Göta älvutredningen, GÄU, Delrapport 1, Linköping.
- Rydell, B, Persson, H, Blied, L, Åström, S & Gyllenram, W 2011b, *Fördjupningsstudie om erosion i vattendrag*, Statens geotekniska institut, SGI, Göta älvutredningen, GÄU, Delrapport 2, Linköping.
- SGI 2013, *Klimatanpassning Skredriskkartering, Dokumenthantering och projektvägledning, Konsultuppdrag*, Statens geotekniska institut, Styrdokument 99ST001, Linköping, Rev 140224.

- Simon, A, Thomas, R & Klimetz, L 2010, 'Comparison and experiences with field techniques to measure critical shear stress and erodibility of cohesive deposits', *2nd Joint Federal Interagency Conference*, Las Vegas, NV, June 27-July 1.
- Smerdon, ET & Beasley, RT 1961, 'Critical tractive forces in cohesive soils', *Agricultural Engineering*, vol.42, no. 1, pp. 26-29.
- SMHI 2000, *Väder och vatten*, 7/2000.
- USDA 2014, <<http://www.ars.usda.gov/research/docs.htm?docid=5044>>. 2014-06-12.
- USGS 2014, <<http://pubs.usgs.gov/sir/2008/5093/section6.html#eq4>>. 2014-09-30.
- Wood, A, Simon, A, Downs, PW & Thorne, CR 2001, 'Bank-toe processes in incised channels: The role of apparent cohesion in the entrainment of failed bank materials', *Hydrological Processes*, vol. 15, no. 1, pp. 39–61.
- Wynn, TM 2004, *The effects of vegetation on streambank erosion*, Ph.D thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.
- Åström, S, Eklund, D & Lindahl, S 2011, *Hydrodynamisk modell för Göta älv, Underlag för analys av vattennivåer, strömhastigheter och bottenkjuvspänningar*, Statens geotekniska institut, SGI, Göta älvutredningen, GÄU, Delrapport 3, Linköping.

Bilaga 1

**PM Hydrodynamisk modell
av Norsälven (SMHI)**

Handläggare

Dan Eklund, Kristoffer Hallberg, Maja Wänström, Christer Gustafsson, Buban Sehalic

Granskare

Signild Nerheim

Beställare

Gunnel Göransson

Statens Geotekniska Institut, SGI

Avdelning Geoplanering och klimatanpassning

Hugo Grauers gata 5 B

412 96 GÖTEBORG

Hydrodynamisk modell av Norsälven

1 Bakgrund

1.1 Samarbete kring erosionsbedömning i Norsälven

SMHI och SGI har inom ramavtal samarbetat i ett projekt för metodutveckling inom utredning av erosionsförhållanden i Norsälven, idag och i framtida klimat (Följdöverenskommelse nr 2, SGI Dnr: 1.1-1305-0367, SMHI Dnr: 2009/2076/180). I detta projekt har SMHI satt upp en hydrodynamisk modell av Norsälven för beräkning av ytnivåer, vattenhastigheter och bottenskjuvspänning i älven. Fältmätningar i Norsälven har utförts under två dagar för modelleringsunderlag. Beräkningsresultaten skall användas av SGI för erosionsbedömningar i älven.

Modellarbetet har utförts av Dan Eklund och Kristofer Hallberg med stöd av Maja Wänström, fältarbetet har utförts av Christer Gustafsson, Buban Sehalic och Dan Eklund.

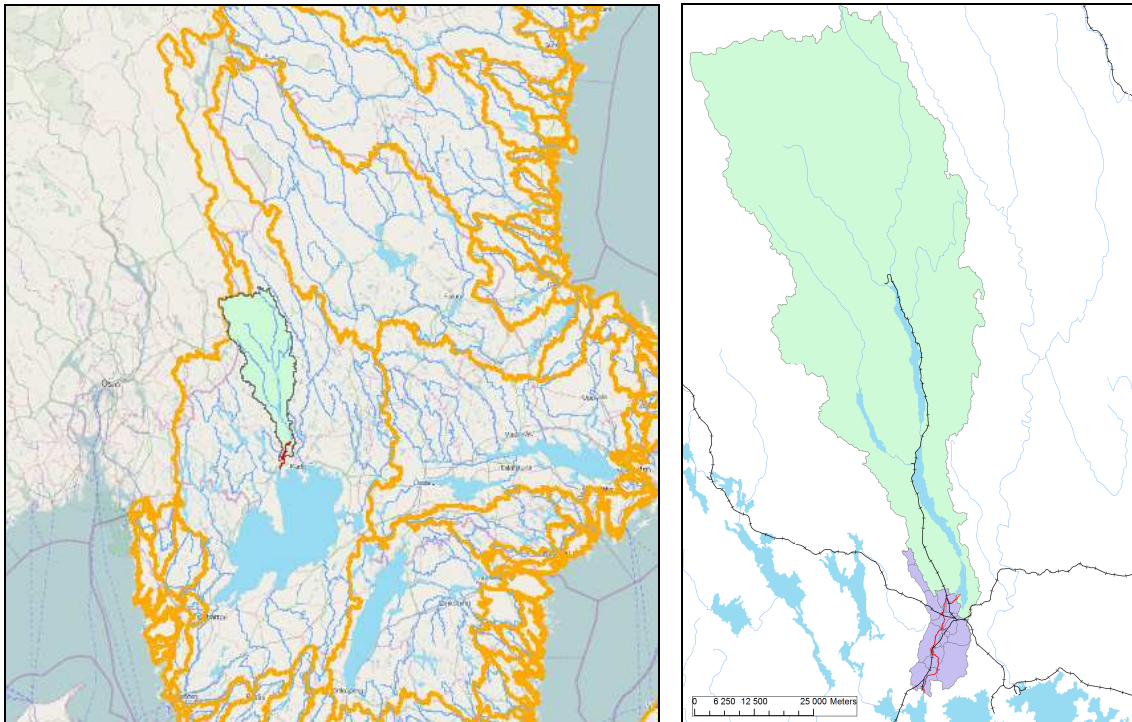
1.2 Syfte

Syftet med detta PM är att beskriva den hydrodynamiska modell som satts upp av SMHI över Norsälven för beräkning av vattenhastigheter, ytnivåer och bottenskjuvspänning vid olika vattenföringar. Modellens uppbyggnad och kalibrering, de flödesfall som simulerats och de antaganden som är gjorda vid dessa beskrivs.

2 Metodbeskrivning och beräkningsförutsättningar

2.1 Norsälven

Figur 1 visar Norsälvens avrinningsområde. Dess totala areal är ca 4170 km². Norsälven tillhör Göta älvs huvudavrinningsområde, totalarea ca 50 100 km². Norsälven utgör sträckan mellan Nedre Frykens utlopp och Väneren, vilken är ca 28 km. Nedre Fryken regleras av Frykfors kraftverk i Norsälven. Nedströms Frykfors kraftverk ligger Edsvalla kraftverk.



Figur 1. Till vänster Norsälvens avrinningsområde i Göta älvs huvudavrinningsområde. Till höger Norsälvens avrinningsområde med Frykensjöarna (SVAR 2011).

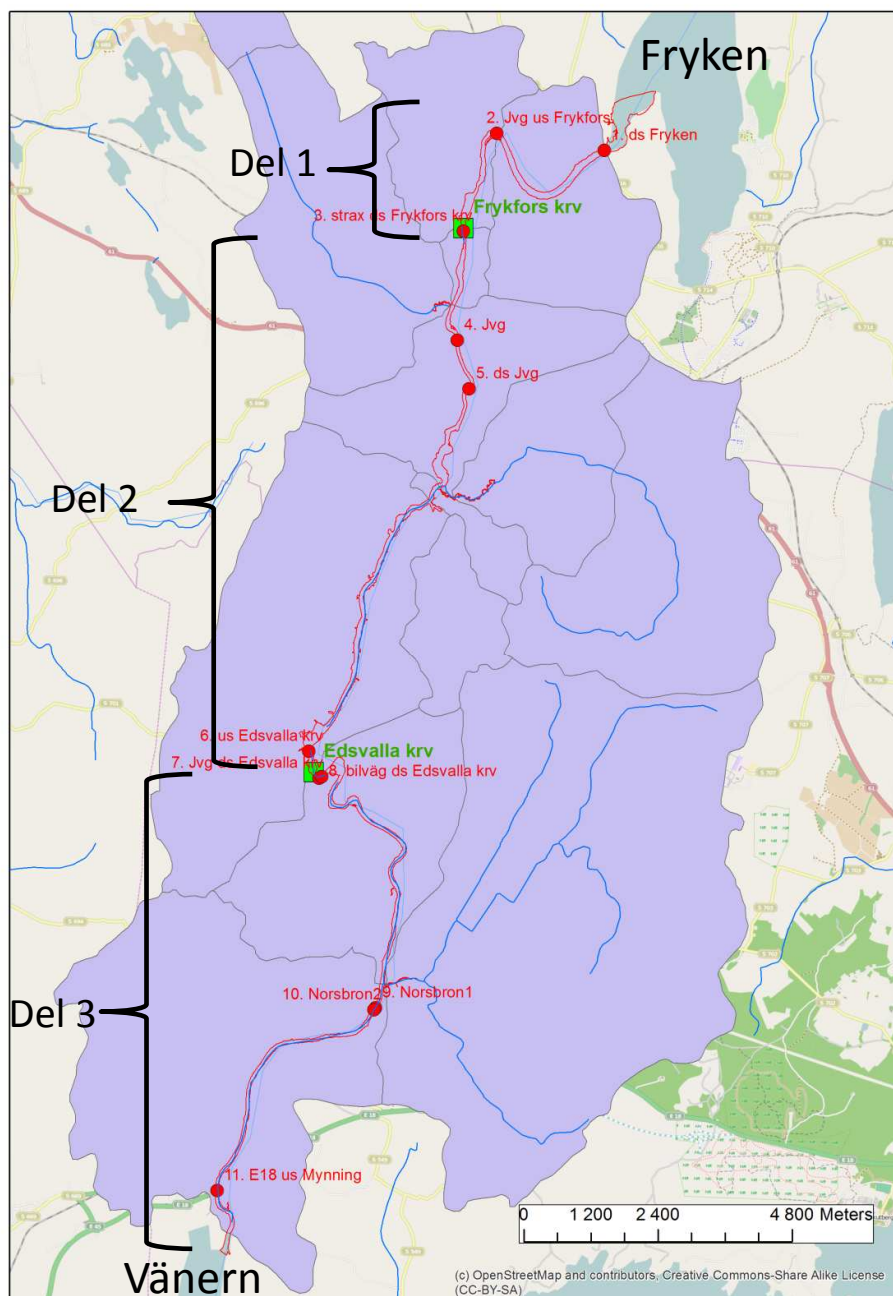
Hydrologisk statistik Norsälven:

- Årsmedelvattenföring (MQ) = 51 m³/s
- Medelhögvattenföring (MHQ)= 190 m³/s
- Vattenföring med 100-års återkomsttid (HQ₁₀₀)= 426 m³/s
- Maximalt turbinflöde i kraftverken = 70 m³/s.

2.2 Hydrodynamisk beräkningsmodell

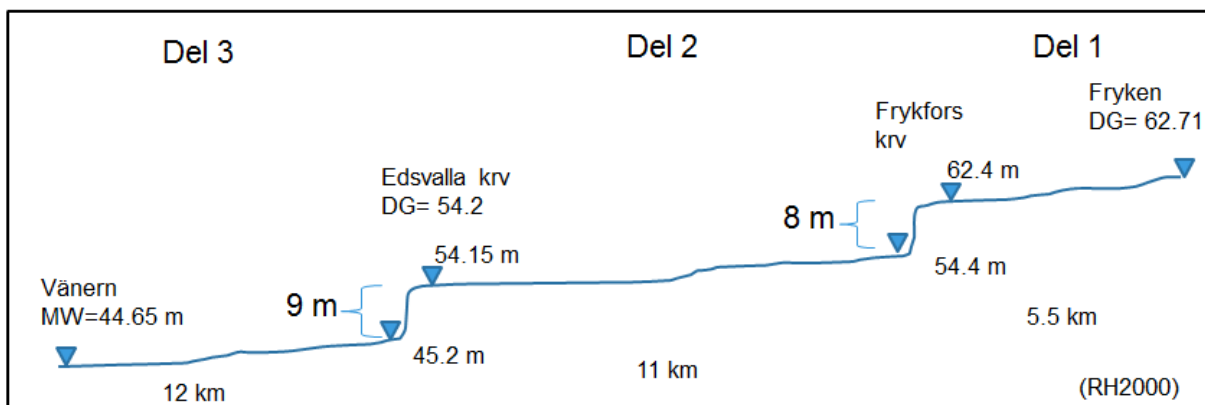
Den hydrodynamiska beräkningsmodellen har upprättats i tre etapper, indelade av kraftverkens lägen vilka visas i Figur 2.

- Del 1: Frykens utlopp – Frykfors krv
- Del 2: Frykfors krv – Edsvalla krv
- Del 3: Edsvalla krv – mynningen i Väneren.



Figur 2. Norsälven med broar (röda punkter) samt kraftverken Frykfors och Edsvalla markerade. Hydromodellens delsträckor är markerade. Bakgrundskarta: © OPEN STREET MAP.

Figur 3 visar en schematisk fallprofil av Norsälven från Fryken till mynningen i Vänern.



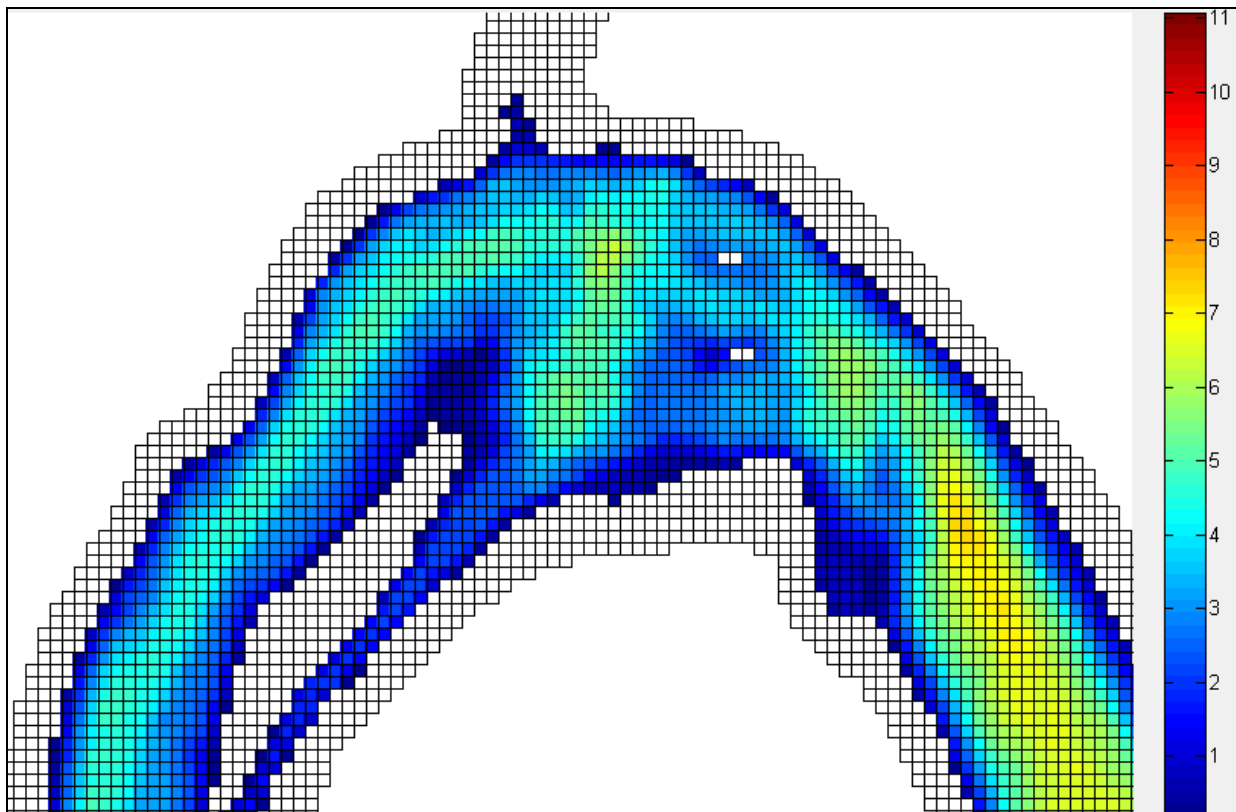
Figur 3. Schematisk fallprofil av Norsälven med angivna dämmningsgränser vid kraftverken samt ungefärliga nivåer vid fältmätningstillfälle 2014 samt fallhöjder. DG = Dämmningsgräns, MW = Medelvattenstånd. Hydromodellens delsträckor anges.

De hydrodynamiska modellerna har satts upp med modellverktyget Delft3D. Med detta sätts 3-dimensionella eller 2-dimensionella (djupintegrerade) strömningsmodeller upp som löser tillämpningar av Navier-Stokes ekvationer för ytvatten och kan beräkna strömningsmönster för transienta förlopp. Delft3D har använts på SMHI i ett mycket stort antal projekt i såväl vattendrag och sjöar som i kustområden. Systemet är framtaget och utvecklas kontinuerligt av företaget Deltares i Nederländerna och används över hela världen i olika former av tillämpningar (Deltares, 2014).

Modellen arbetar i ett beräkningsnät bestående av ett stort antal s.k. beräkningsceller. För varje beräkningscell simuleras ett värde på strömstyrka, strömriktning och turbulens. Detta betyder att man antar att dessa värden inte varierar inom den vattenrymd som beräkningscellen omfattar. Fler och mindre beräkningsceller (högre rumsupplösning) kan noggrannare beskriva rumsliga variationer.

För Norsälven täcker beräkningsnätet in älven och dess omgivande terräng i ett rektangulärt grid med cellstorlek 5 m. Djupdatat, batymetrin, har hämtats från högupplöst ekolodning av botten (MMA, 2014) och terrängdata har hämtats från Lantmäteriets nationella höjdmödel (Lantmäteriet, 2014a). Figur 4 visar en detalj ur delsträcka 1, Fryken – Frykfors, där älven kröker vid pegeln "Väsby Märke" strax uppströms järnvägsbron.

Modellen av Norsälven drivs av flödesbelastning och ytnivåer används som nedre rand, för Väners vattenstånd i delmodell 3, respektive ytnivå uppströms kraftverken i delmodell 1 och 2.



Figur 4. Beräkningsnätet i älvkröken uppströms Frykfors krv, vid pegeln "Väsby Märke" strax uppströms järnvägsbron. Järnvägsbrons brostöd syns som vita celler i älven. Färgerna visar djupet i älven, som mest på platsen ca 8 m. Vita celler är torra, dvs de ligger på land. Cellstorlek 5x5 m.

2.3 Fältmätning

I Norsälven finns ont om historiska observationer av ytnivåer mellan kraftverken. För att kunna kalibrera modellen med känd vattenföring mot uppmätta ytnivåer företog SMHI ett fältbesök under två dagar (2014-01-14, 15) då ytnivåer avvägdes på olika platser längs hela älven.

Vid detta tillfälle gjordes också strömmätningar i sektioner av älven nedströms Edsvalla kraftverk. Mätningarna utfördes med s.k. ADCP-instrument (Acoustic Doppler Current Profilers) där dopplerskiftet från reflekterade partiklar (=vattenhastigheten) och eko från botten utnyttjas för beräkning av ström, tvärsnittsarea och flöde. Detta för att validera beräknade strömningsmönster mot uppmätta.

2.4 Höjdsystem

Modellen är uppsatt i höjdsystem RH2000. Alla beräknade nivåer anges i RH2000. Följande ungefärliga förhållanden mellan olika höjdsystem råder vid Frykfors och Edsvalla (Lantmäteriet 2014):

- $RH00 + 0.31 \text{ m} = RH70$
- $RH70 = RHB70$
- $RH70 + 0.2 = RH2000$

2.5 Modellkalibrering

Modellen har kalibrerats mot avvägda ytnivåer från fältbesöket med aktuell vattenföring vid tidpunkten. Mätserier med tappning och ytnivåer uppströms kraftverken har erhållits av Fortum AB som är ägare av kraftverken.

Delsträcka 1 har också kalibrerats mot dataserier med ytnivåobservationer från pegeln "Väsby märke" uppströms Frykfors krv, strax uppströms järnvägsbron.

Vid kalibreringen har framför allt modellens råhetskoefficient, Mannings n, liksom turbulensbeskrivningen justerats. Vid kalibreringen har dessa parametrar justerats så att korrekta ytnivåer erhålls längs hela älven, dvs så att ytnivåprofilen faller enligt mätningarna på rätt platser, där de största energiförlusterna erhålls.

Vid kalibreringen justerades bottenråheten i form av råhetskoefficienten "Mannings n" först för älvsträcka 2 till 0.01 s/m³. Även på delsträcka 1 användes därför detta värde. Eftersom bottenråheten är en parameter som kan variera stort och är svår att uppskatta och just därför används som kalibreringsparameter, får det antas rimligt att ansätta lika värde för denna i hela älven, istället för att sätta antagna, varierande men osäkra värden på olika platser i älven.

Dessutom styrs beräknad bottenskjuvspänning (τ_b) i hög grad av parameter n eftersom

$$\tau_b = \frac{n^2 \rho g v^2}{\sqrt[3]{H}}$$

där

- n = Mannings n [s/m³]
- v = vattenhastigheten [m/s]
- ρ = vattnets densitet [kg/m³]
- g = tyngdaccelerationen [m/s²]
- H = vattendjupet [m]

Därför är det ur jämförelsesynvinkel en poäng med att inte variera råhetskoefficienten på olika platser i älven, så att bottenskjuvspänningarna beroende av framför allt vattenhastigheten kan jämföras mellan olika platser i älven.

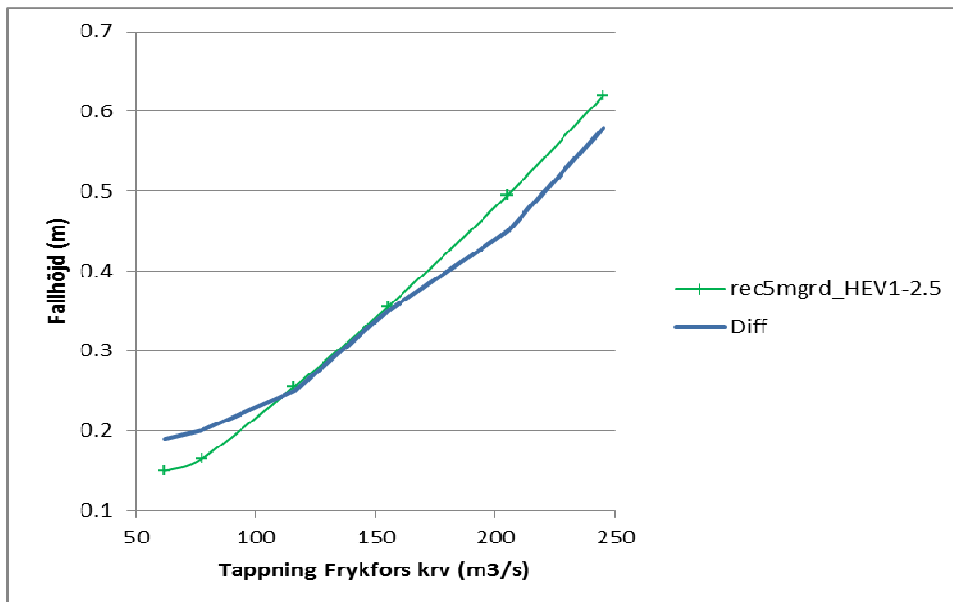
3 Resultat

3.1 Del1, Utloppet av Fryken – Frykfors kraftverk

3.1.1 Modellkalibrering delsträcka 1

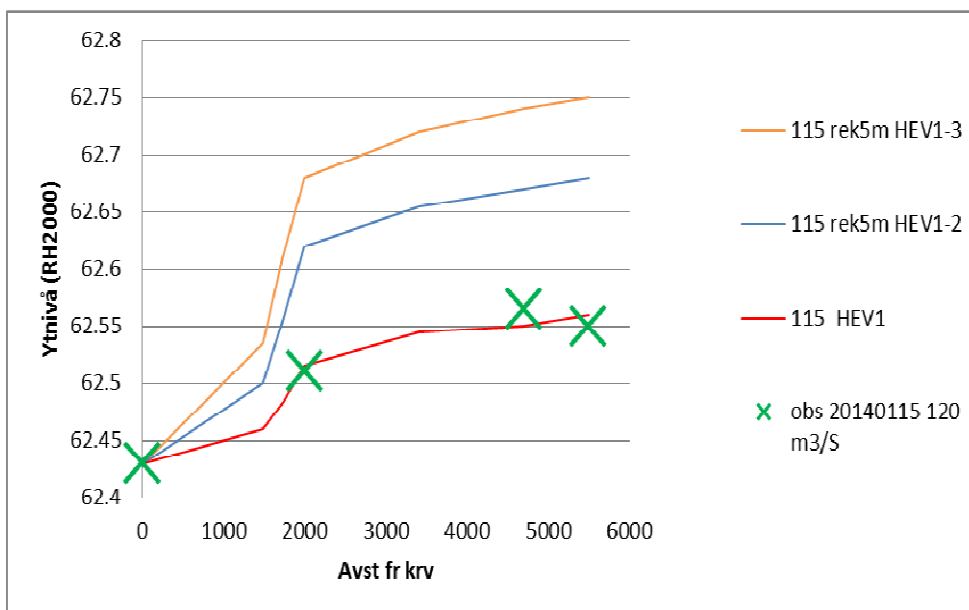
För kalibrering av delsträcka 1 fanns förutom mätdata (ytnivåer) från fältmätningen 2014-01-15 nivå- och tappningsserier för Frykfors krv och pegeln vid Jvg-bron, "Väsby märke" som används för reglering av nedre Fryken enl. Fortum.

Nivåerna kalibrerades in genom justering av viskositetsparametrarna (V_H) vid flöden mellan 60 och 245 m³/s. Lokalt i den större älvkröken ökades dessa 1.5 gånger (från 1) för bra resultat. Detta motiveras med att turbulensen på denna sträcka sannolikt är särskilt stor vid de höga hastigheter som uppkommer vid högflöden, och att stora energiförluster därmed fås, utan att bottenråheten för den skull behöver vara större här än på andra platser i älven. Förenklat kan det beskrivas som att älvens vattens viskositet ökas för att trögheten mellan vatten i de olika beräkningscellerna skall öka och ge upphov till större energiförlust vid hög turbulens.



Figur 5. Fallhöjd (y-axel) mellan Väsby märke (pegel vid jvg-bro) och Frykfors krv vid 6 olika flöden okt – nov 2006 (x-axeln). Blå linje observerad fallskillnad. Blå linje är observerad fallskillnad, grön linje motsvarar viskositetsparametern $V_H = 2$.

Figur 6 visar fallprofilen vid fältmätningen, vilken tydligen var betydligt flackare än normalt (vanligen 1-2 dm). Lokalt $V_H = 2.5$ överskattar fallförlusten för just detta tillfälle, men observationerna gör tydligt att gradienten är lägre mellan pegeln och Frykens utlopp än mellan kraftverket och pegeln.



Figur 6. Tappning 115 m³/s genom Frykfors, fältmätningstillfället 2014-01-15. Fallförlusten var vid tillfället lägre än den normala (vanligtvis 10 – 20 cm) för lägre flöden, gröna kryss är avvägda nivåer. $V_H = 2$ lokalt överskattar fallförlusterna något för just detta flöde. Orange och röd linje visa $V_H = 3$ respektive 1 lokalt.

3.1.2 Vattenföringssimulering

För att bestämma vattenhastigheter och bottenkjuvspänningar vid ett stort flödesregister simulerades vattenföringar mellan 20 och 500 m³/s:

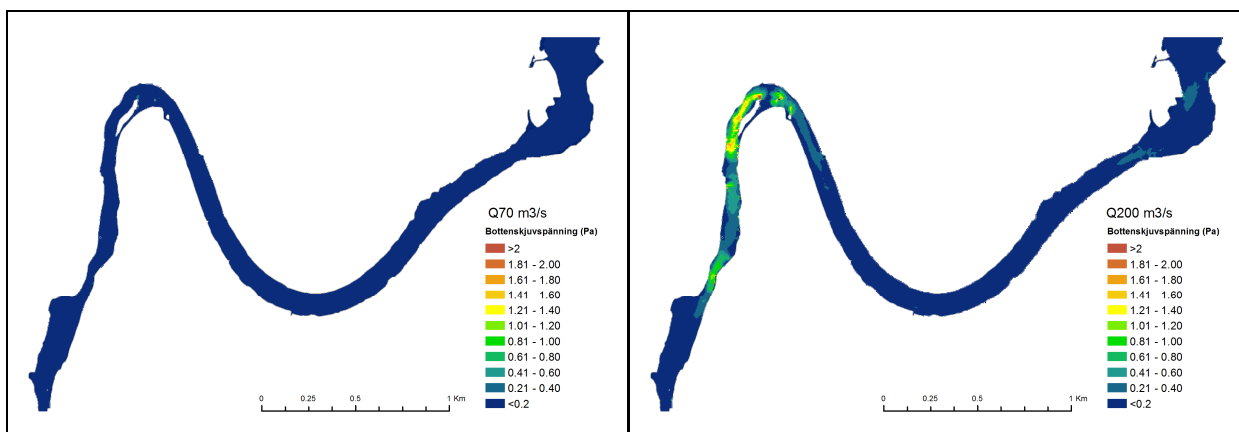
- 20 m³/s, ytnivå Frykfors krv = 62.2 m RH2000
- 50 m³/s (medelvattenföring), ytnivå Frykfors krv = 62.2 m RH2000

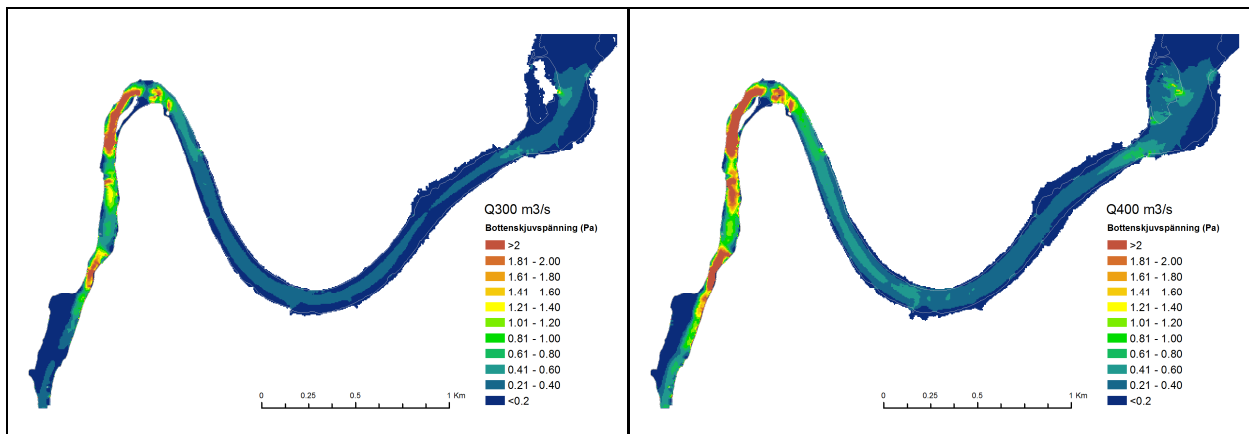
- 70 m³/s (max produktionstappning) , ytnivå Frykfors krv = 62.2 m RH2000
- 100 m³/s, ytnivå Frykfors krv = 62.2 m RH2000
- 150 m³/s, ytnivå Frykfors krv = 62.2 m RH2000
- 200 m³/s (ungefärlig medelhögvattenföring) , ytnivå Frykfors krv = 62.2 m RH2000
- 250 m³/s, ytnivå Frykfors krv = 62 m RH2000
- 300 m³/s, ytnivå Frykfors krv = 62 m RH2000
- 350 m³/s, ytnivå Frykfors krv = 62 m RH2000
- 400 m³/s, ytnivå Frykfors krv = 62 m RH2000
- 425 m³/s (Beräknad 100-årsvattenföring) , ytnivå Frykfors krv = 62 m RH2000
- 450 m³/s, ytnivå Frykfors krv = 62 m RH2000
- 500 m³/s, ytnivå Frykfors krv = 62 m RH2000

För varje vattenföring togs fram:

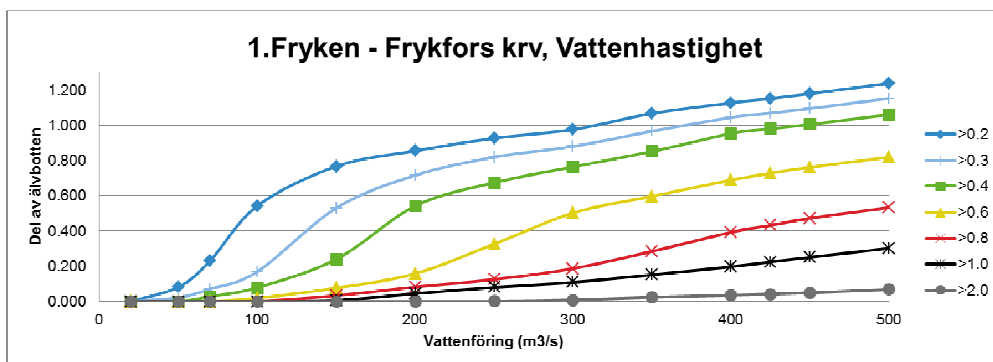
- Raster i TIF-format:
 - o Ytnivå (m)
 - o Vattendjup (m)
 - o Djupintegrerad vattenhastighet (m/s)
 - o Bottenskjuvspänning (Pa)
- Diagram över påverkad delsträckas area med avseende på vattenhastighet och skjuvspänning vid olika vattenföring, se figur 8 och 9.
- Kartbilder i PNG-format, avsedda att ses tillsammans med diagrammen. Intervall 0.2, se figur 7.
 - o Djupintegrerad vattenhastighet (m/s)
 - o Bottenskjuvspänning (Pa)

Dessa resultat har levererats i digital form av SMHI till SGI.

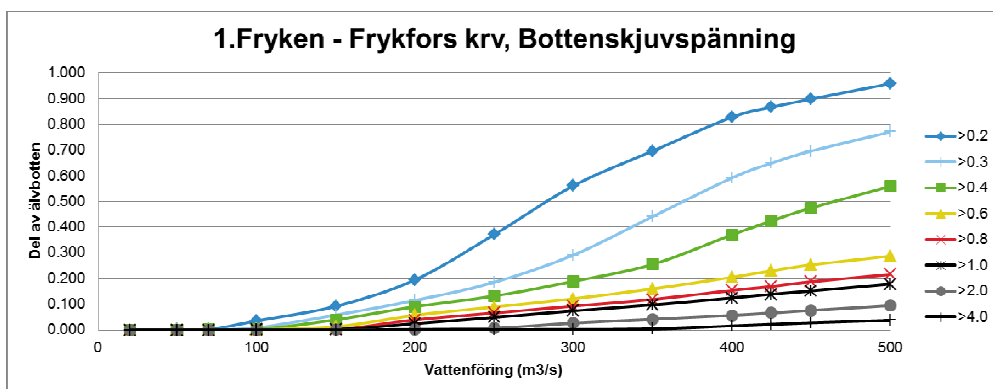




Figur 7: Beräknade skjuvspänningar på delsträcka 1 vid vattenföring 70, 200, 300 och 400 m³/s.



Figur 8. Andel av älvarea på delsträcka 1 med viss beräknad vattenhastighet vid olika vattenföringar. De olika linjerna motsvarar olika vattenhastigheter vid olika vattenföringar. Vid vattenföring 300 m³/s råder tex vattenhastigheter på minst 0.2 m/s över ungefär hela älvbotten, men hastigheter på minst 0.6 återfinns på ca halva totala älvbotten. Vid högre vattenföringar är andelen älvarea med vattenhastighet minst 0.2 större än 1 eftersom översvämning sker.



Figur 9. Andel av älvarea på delsträcka 1 med viss beräknad bottenskujuvspänning vid olika vattenföringar. De olika linjerna motsvarar olika bottenskujuvspänning vid olika vattenföringar. Vid vattenföring 300 m³/s råder tex bottenskujuvspänningar på minst 0.2 Pa över ungefär halva älvbotten, men hastigheter på minst 0.6 återfinns på endast ca 1 % av totala älvbotten.

3.2 Del2, Frykfors krv – Edsvalla krv

3.2.1 Modellkalibrering

Vid kalibrering av delsträcka 2 visade det sig att en råhetskoefficient $n = 0.01$ krävdes för bra överensstämmelse med observerade nivåer över hela sträckan över hela sträckan, utifrån kalibrering mot uppmätta nivåer vid fältmätningarna 2014-01-14 -15 (Tappning = $125 \text{ m}^3/\text{s}$ genom Edsvalla). Högre eller lägre bottenråhet gav sämre total fallhöjd på älvsträckan. Lokalt förändras nivåerna snabbare, dessa ”steg” i ytnivå kunde ej återskapas med lokalt varierande (ökat) bottenmotstånd. Däremot kan nivåerna justeras in genom lokal variation av turbulensbeskrivningen, med parametern ”horizontal eddy background visc” (V_H).

Detta får anses rimligt då hastigheterna lokalt ökar på dessa platser och älven här är mindre likformig med avseende på djup och bredd än på övriga sträckor. Turbulensen bör här ha större betydelse för energiförlusterna än bottenmotståndet. Lokal ökning av V_H med det dubbla (till 2) mot övrig sträcka gav bra resultat.

3.2.2 Vattenföringssimulering

Vattenföringssimulering gjordes på samma sätt som för delsträcka 1. Ytnivå vid Edsvalla krv = 54.2 m RH2000 under simuleringarna.

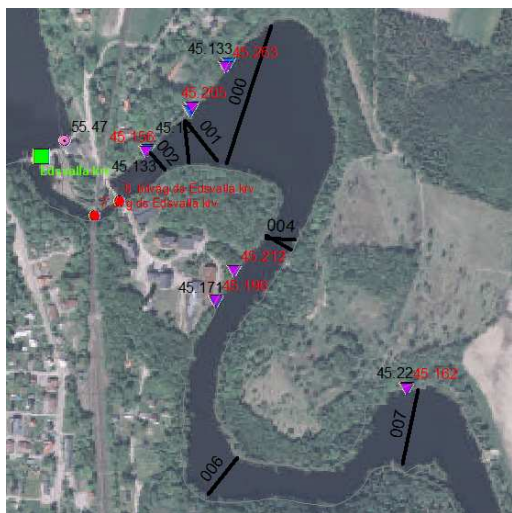
Samma typ av resultat som för delsträcka 1 har tagits fram och levererats.

3.3 Del3, Edsvalla krv – mynningen i Vänern

3.3.1 Modellkalibrering

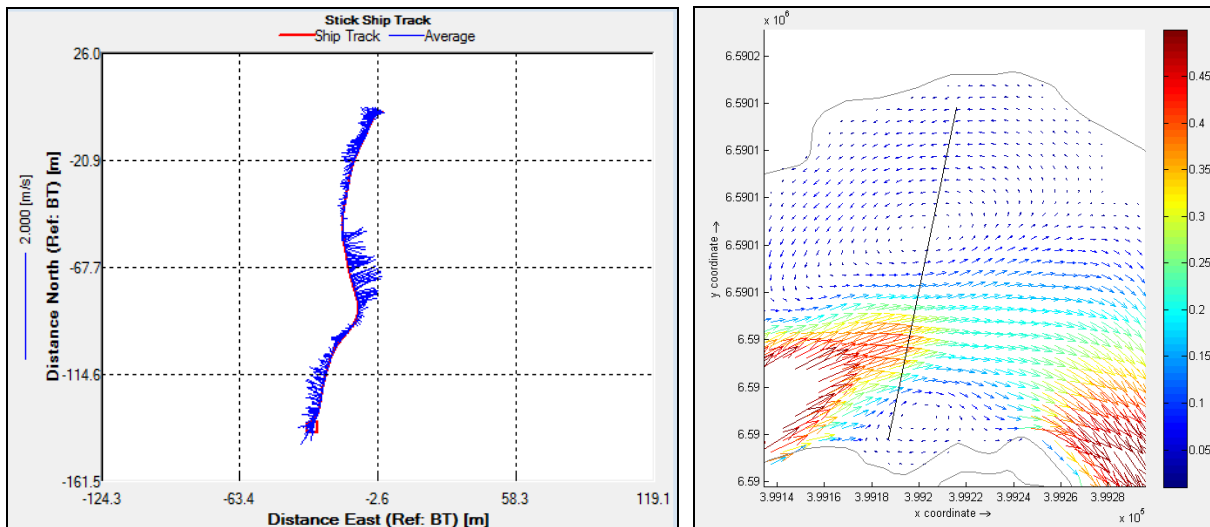
Vid kalibrering av delsträcka 3 användes de avvägda ytnivåerna från fältbesöket 2014-01-14, 15 tillsammans med uppgifter om tappning vid tillfället. Vid kalibrering mot kända nivåer bestämdes turbulensparametern V_H till mellan 0.55 och 1.2 på sträckan.

Dessutom mättes strömhastighet och strömriktning i åtta sektioner nedströms Edsvalla krv där älven breddar upp på några platser. Detta för att validera att modellen återskapar strömningsmönster motsvarande verkligheten. Vattenföringen mättes till ca $125 \text{ m}^3/\text{s}$ vid tidpunkten, ungefär som angiven tappning genom kraftverket. Figur 10 visar strömmätningssektionerna.



Figur 10. Sektioner med strömmätning. 8 st, nr 000 – 007. Sektion 003 ligger mellan 002 och 001. Sektion 005 strax nedströms sektion 004. Uppmätta ytnivåer är utmärkta i bilden liksom Edsvalla krv.

Figur 11 visar uppmätt strömhastighet i sektion 007, samt simulerat strömningsmönster och vattenhastigheter på samma plats. Modellen återskapar de två större virvlarna som bildas på platsen relativt väl, liksom vattenhastigheterna. Liknande resultat erhöles för alla strömmättningsplatser.



Figur 11. Strömmätning i sektion 007 till vänster. Djupintegrerad vattenhastighet = ca 0.5 m/s i huvudsaklig strömriktning. Tydlig virvelbildning. Till höger: Delft3D kalibreringssimulering med 125 m³/s, vid platsen för sektion 007. 2 större virvlar på platsen. Djupintegrerad vattenhastighet ca 0.4 m/s i huvudströmriktningen. Något lägre hastigheter i återströmningen vid södra stranden än i mätningarna.

3.3.2 Vattenföringssimulering

Vattenföringssimulering gjordes på samma sätt som för delsträcka 1 och 2. Ytnivå Vätern: MW = 44.65 m RH2000 under simuleringarna.

Samma typ av resultat som för delsträcka 1 och 2 har tagits fram och levererats.

4 Digital leverans

Av SMHI har följande levererats till SGI i digitalt format:

För varje simulerad vattenföring (20 till 500 m³/s) för varje delsträcka av Norsälven:

- Raster i TIF-format:
 - o Ytnivå (m)
 - o Vattendjup (m)
 - o Djupintegrerad vattenhastighet (m/s)
 - o Bottenskjuvspänning (Pa)
- Diagram över påverkad delsträckas area med avseende på vattenhastighet och skjuvspänning vid olika vattenföring.
- Kartbilder i PNG-format, avsedda att ses tillsammans med diagrammen.
 - o Djupintegrerad vattenhastighet (m/s)
 - o Bottenskjuvspänning (Pa)

5 Diskussion och slutsatser

Vid strömningsmodelleringen har ambitionen varit att upprätta så enkla delmodeller som möjligt, som med tillräcklig rumslig och tidsmässig upplösning kan simulera adekvata resultat för stora flödesspann.

En viktig erfarenhet av arbetet har varit att turbulensen sannolikt styr energiförlusterna i högre grad än variation i bottenråhet. Eftersom bottenråheten i form av Mannings tal "n" i hög grad avgör beräknad bottenskjuvspänning har denna medvetet satts till ett och samma för hel älvbotten, $n = 0.01$ vilket är ett ganska lågt men ej orimligt värde. Bottenråheten är också en parameter som kan variera stort och är svår att uppskatta och just därför används som kalibreringsparameter. Om Mannings n antogs variera efter vad man kan förvänta sig eller efter antaganden om bottenmaterial i älven skulle detta i hög grad styra beräknad bottenskjuvspänning, därför får det antas rimligt att ansätta lika värde för Mannings n i hela älven.

Modellen har kalibrerats med hjälp av turbulensbeskrivningen där den horisontella bakgrundsviskositeten, dvs älvens "tröghet" justerats inom rimliga gränser. Turbulensen är sannolikt särskilt stor lokalt vid de höga hastigheter som uppkommer vid högflödena, stora energiförluster fås därmed, utan att bottenråheten för den skull behöver vara större här än på andra platser i älven.

Avvägningen av fallprofiler i fält har visat sig vara nödvändig för kalibreringsprocessen. Utan dessa skulle justeringen av viktiga kalibreringsparametrar ej varit möjlig, utan generella värden skulle fått användas. Därmed skulle osäkerheten i uppskattningen av ytnivåer, vattenhastigheter och bottenskjuvspänning vara betydligt större.

Tillgången till noga kartlagd batymetri (skannad botten) har varit av avgörande betydelse för resultaten. Då kartor över djupdata och beräknad vattenhastighet jämförs korrelerar dessa tydligt. Bottens lokala geometriska variation tycks i högre grad avgöra energiförluster än lokala variationer i bottenråhet, detta visade sig under kalibreringsarbetet, jämför diskussionen om turbulens ovan.

Genom att simulera ett brett register av vattenföringar med modellen möjliggörs att studera när vattenhastigheter och bottenskjuvspänningar tydligt förändras, för att på så sätt ringa in kritiska flöden med avseende på erosion på olika platser i älven. De resultat som SMHI tagit fram används för detta av SGI i det fortsatta arbetet. Därmed riskerar man heller inte att missa viktiga flödesspann, mot om man simulerat enstaka höga och låga flöden. Nackdelen med detta är att simuleringarna tar tid i anspråk. Simuleringstiden för ett högflöde är dock inte längre än ett par timmar med de uppsatta modellerna.

Metodiken utarbetad i detta projekt bör kunna tillämpas på de flesta liknande vattendrag som är intressanta ur erosionssynpunkt.

6 Referenser

SVAR, 2011, Svenskt VattenArkiv, SMHI. <http://www.smhi.se/publikationer/svar-svenskt-vattenarkiv-1.17833>

Deltares, 2014, Deltaers hemsida, Delft3D, <http://www.deltaresystems.com/hydro/product/621497/delft3d-suite>

MMA, 2014, Sjömätning av Norsälven, Uppdragsnr: 15163 497-1310, Marin Miljöanalys 2014.

Lantmäteriet, 2014a, Ny Nationell Höjdmodell, Lantmäteriets hemsida 2014-05-19, <http://www.lantmateriet.se/sv/Kartor-och-geografisk-information/Hojddata/GSD-Hojddata-grid-2/>

Lantmäteriet 2014, mailkontakt med Geodetiska arkivet den 9 januari 2014.



Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut
601 76 NORRKÖPING
Tel 011-495 80 00 Fax 011-495 80 01

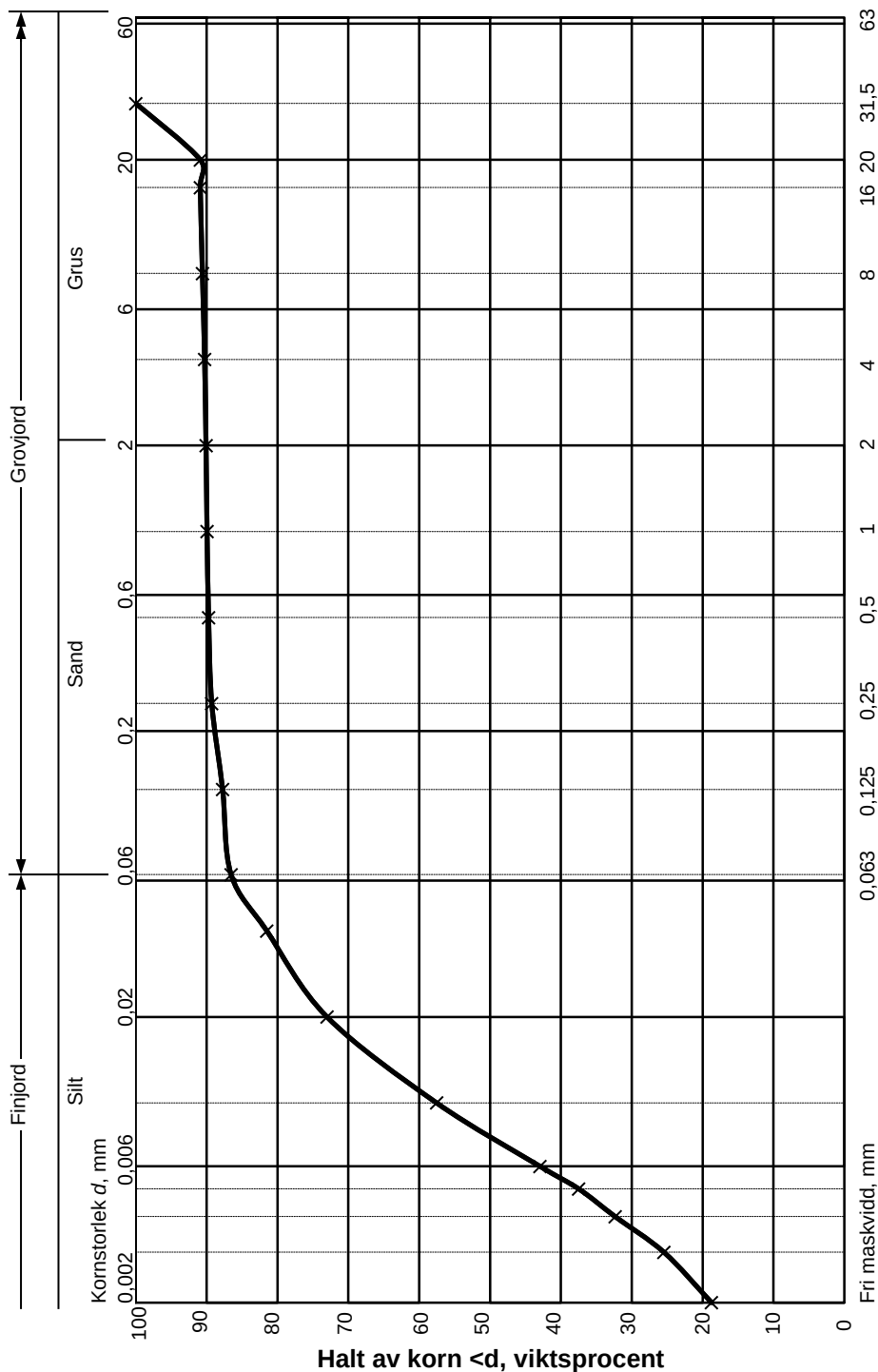
Bilaga 2

Sedimentationsanalyser laboratorieprotokoll



KORNFÖRDELNING FRAKTIONSINDELNING 1981

Uppdrag: Erosion Norsälven Beställare: Gunnel Göransson, SGI			Diagram	1(15)
			Dnr	1.1-1305-0367
Ankomstdatum	Provtagningsredskap	Laboratorieundersökning	Datum	140130
131218	-	Datum 140109--0110 Utförd av OA	Teknisk ledare	



PROV NR	BH/SEKT	DJUP	PROVET ÄR TVÄTTSIKTAT
1.1.A	-	-	

SIKTNING SS 027123 UTGÅVA 2*				SEDIMENTATIONSFÖRSÖK	
TOTAL PROV-MÄNGD g	SIKTAD PROV-MÄNGD g	STÖRSTA KORN-STORLEK mm	HALT AV MTRL % > 63 mm	PROVMÄNGD g	LERHALT % AV MTRL < 0,06 mm
740,8	740,8	503,6	0,0	42	22

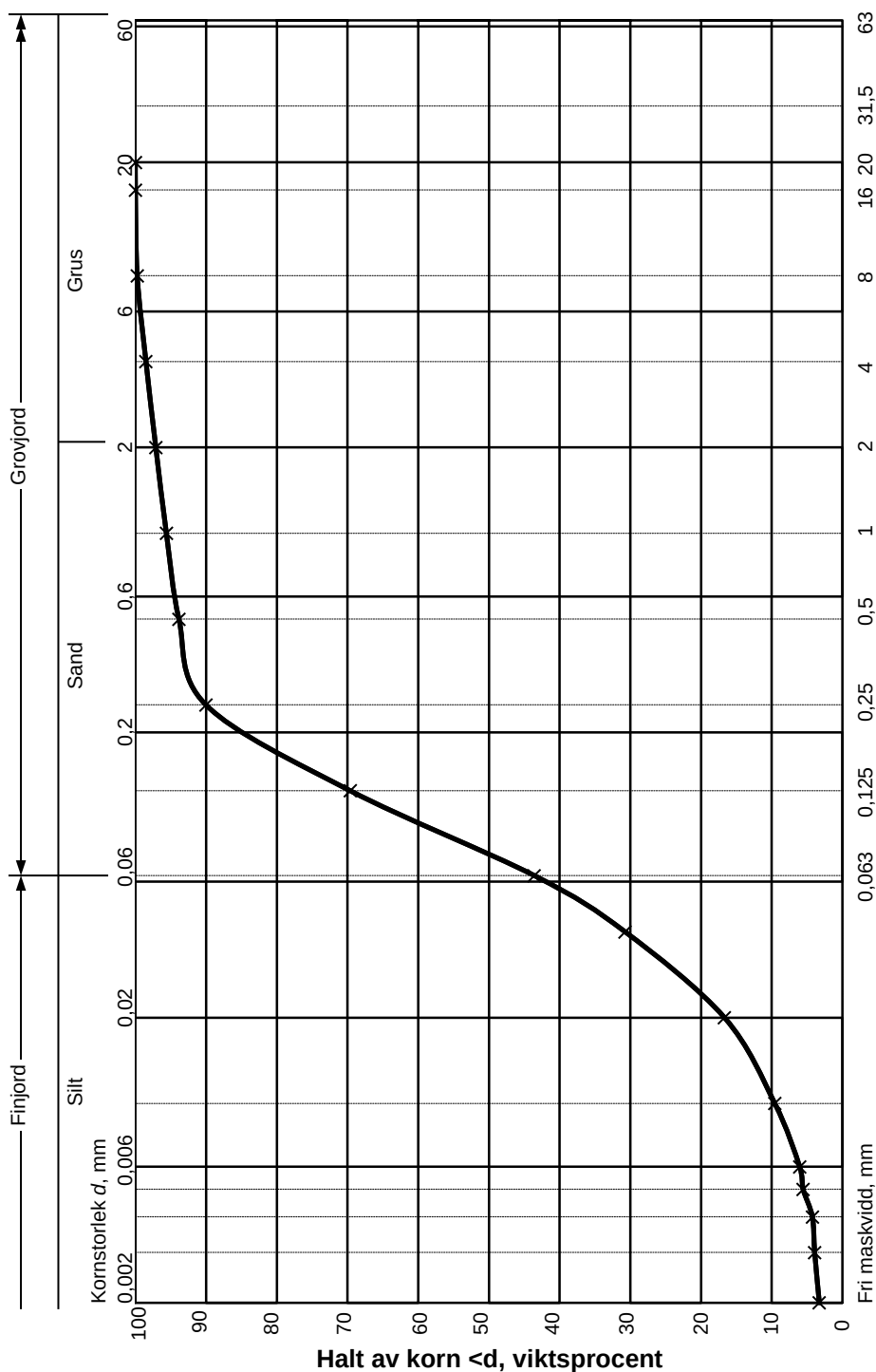
BENÄMNING AV MTRL < 63 mm	MATERIALTYP ENL. AMA 10	TJÄLFÄRLIGHETS KLASS ENL. AMA 10	GRADERINGSTAL $C_u = d_{60}/d_{10}$	ANMÄRKNING
si Le vx				Liten provmängd. Innehåller organiskt material. Korndensitet antagen till 2,70 t/m ³ .

*Standarden upphävd 2005-06-07.
Mätosäkerhet siktning (0,063-63 mm): ± 2,9 %. Mätosäkerhet sedimentationsanalys (0,002-0,06 mm): ± 0,6 %.
Programversion 1.2



KORNFÖRDELNING FRAKTIONSINDELNING 1981

Uppdrag: Erosion Norsälven			Diagram	10(15)
Beställare: Gunnel Göransson, SGI			Dnr	1.1-1305-0367
Ankomstdatum	Provtagningsredskap	Laboratorieundersökning	Datum	140130
131218	-	Datum 140115--0116 Utförd av OA	Teknisk ledare	



PROV NR	2.2.C	BH/SEKT	-	DJUP	-	PROVET ÄR TVÄTTSIKTAT	
SIKTNING SS 027123 UTGÅVA 2*							SEDIMENTATIONSFÖRSÖK
TOTAL PROV-MÄNGD g	SIKTAD PROV-MÄNGD g	STÖRSTA KORN-STORLEK mm	HALT AV MTRL % > 20 mm	PROVMÄNGD g	FÖRBEHANDLING	LERHALT % AV MTRL < 0,06 mm	
1075,4	< 63 mm	< 20 mm	500,6	0,0	48	7,5	
BENÄMNING AV MTRL < 20 mm	MATERIALTYP ENL. AMA 10	TJÄLFÄRLIGHETS KLASS ENL. AMA 10	GRADERINGSTAL $C_u = d_{60}/d_{10}$	ANMÄRKNING			
sa Si)vx(				Innehåller organsikt material. Korndensitet antagen till 2,70 t/m ³ .			

*Standarden upphävd 2005-06-07.

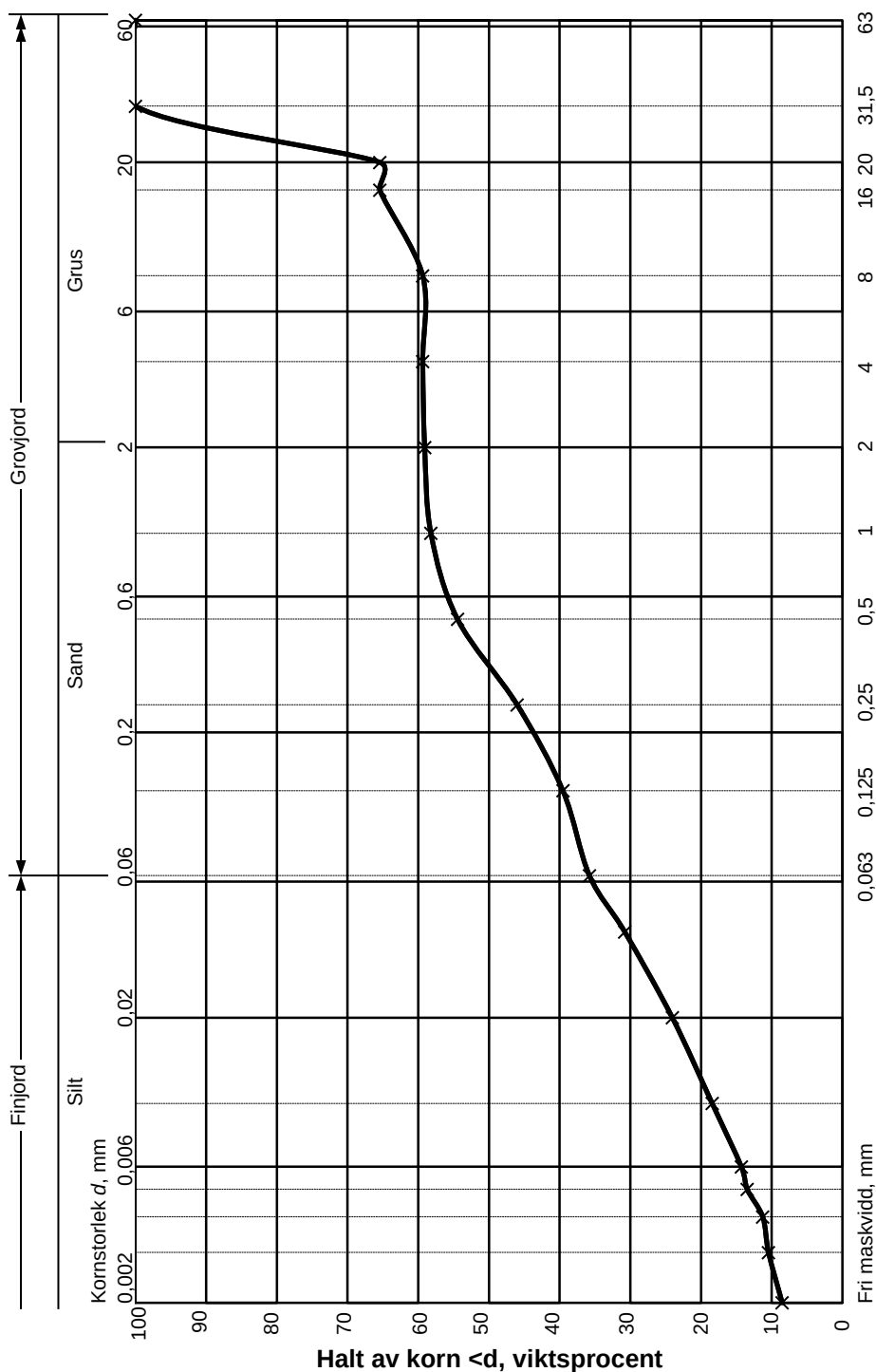
Mätosäkerhet siktning (0,063-63 mm): $\pm 2,9$ %. Mätosäkerhet sedimentationsanalys (0,002-0,06 mm): $\pm 0,6$ %.

Programversion 1.2



KORNFÖRDELNING FRAKTIONSINDELNING 1981

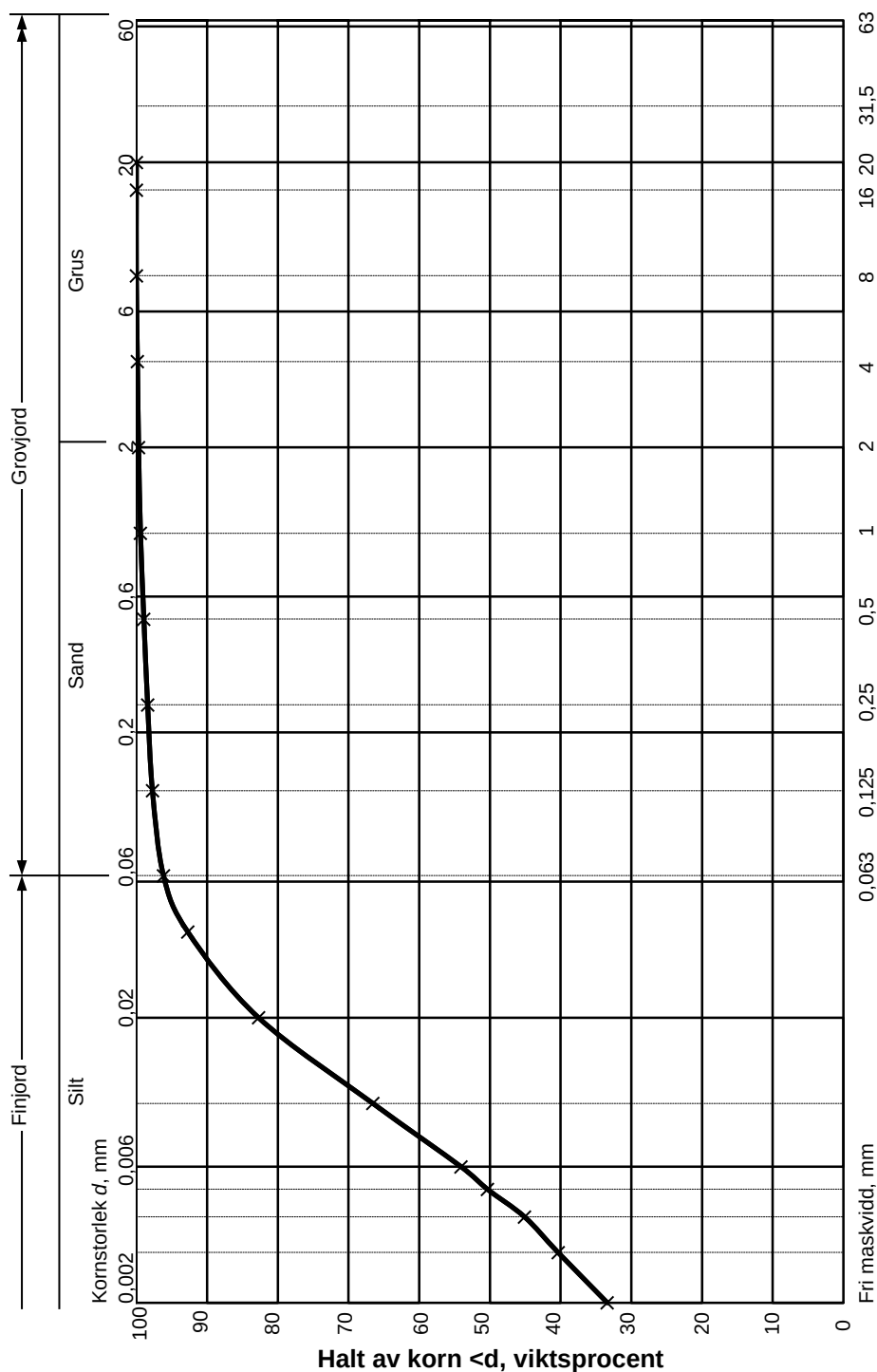
Uppdrag: Erosion Norsälven Beställare: Gunnel Göransson, SGI			Diagram	11(15)
			Dnr	1.1-1305-0367
Ankomstdatum	Provtagningsredskap	Laboratorieundersökning	Datum	140130
131218	-	Datum 140115--0116 Utförd av OA	Teknisk ledare	





KORNFÖRDELNING FRAKTIONSINDELNING 1981

Uppdrag: Erosion Norsälven			Diagram	12(15)
Beställare: Gunnel Göransson, SGI			Dnr	1.1-1305-0367
Ankomstdatum	Provtagningsredskap	Laboratorieundersökning	Datum	140130
131218	-	Datum 140116--0117 Utförd av OA	Teknisk ledare	



PROV NR	2.3.C	BH/SEKT	-	DJUP	-	PROVET ÄR TVÄTTSIKTAT	
SIKTNING SS 027123 UTGÅVA 2*							SEDIMENTATIONSFÖRSÖK
TOTAL PROV-MÄNGD g	SIKTAD PROV-MÄNGD g	SIKTAD KORN-STORLEK mm	HALT AV MTRL % > 20 mm	PROV-MÄNGD g	FÖRBEHANDLING	LERHALT % AV MTRL < 0,06 mm	
1659,9	525,9		0,0	48		35	
BENÄMNING AV MTRL < 20 mm	MATERIALTYP ENL. AMA 10	TJÄLFÄRLIGHETS KLASS ENL. AMA 10	GRADERINGSTAL $C_u = d_{60}/d_{10}$	ANMÄRKNING			
si Le vx				Innehåller organsikt material. Korndensitet antagen till 2,70 t/m ³ .			

*Standarden upphävd 2005-06-07.

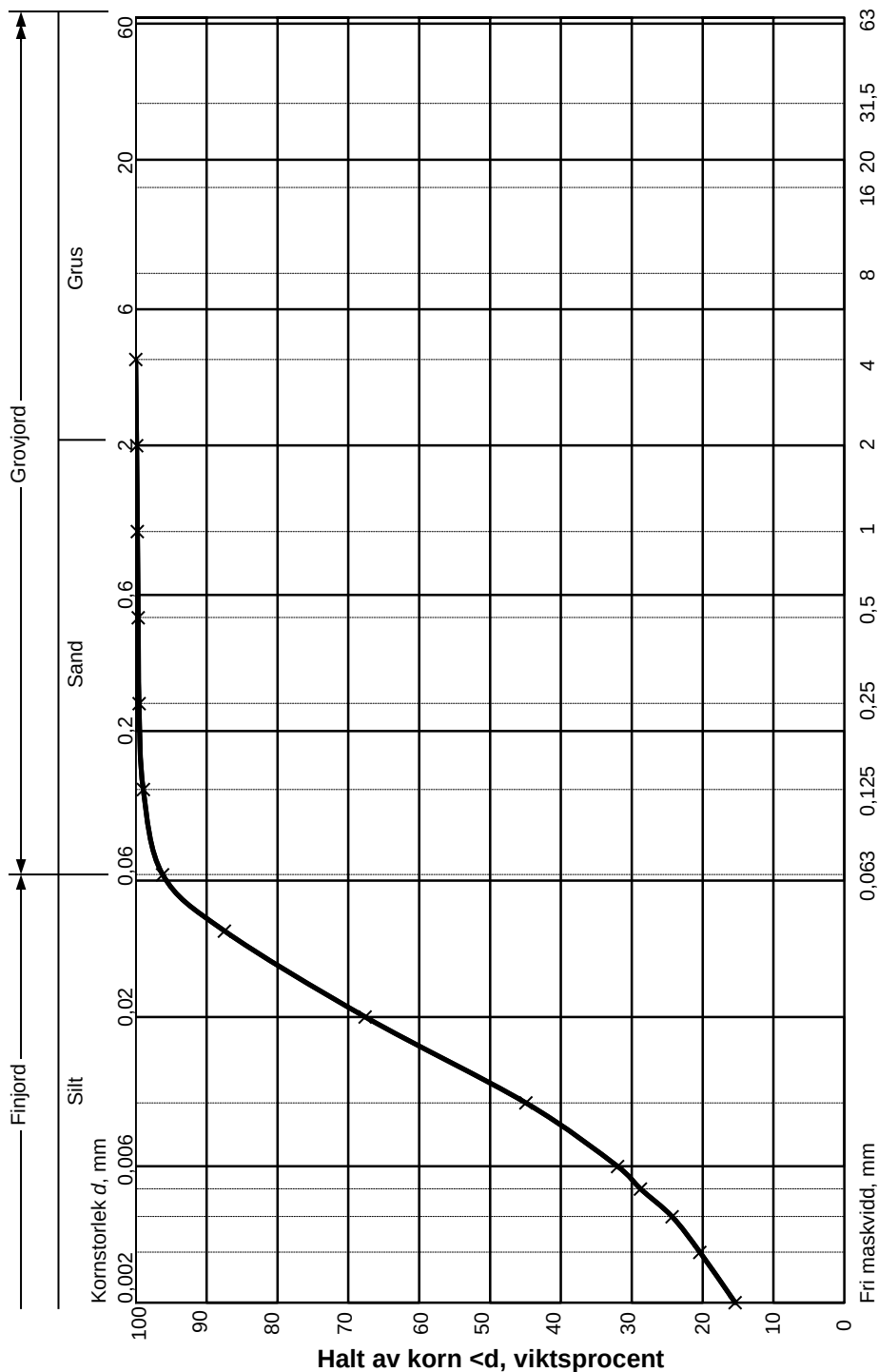
Mätosäkerhet siktning (0,063-63 mm): ± 2,9 %. Mätosäkerhet sedimentationsanalys (0,002-0,06 mm): ± 0,6 %.

Programversion 1.2



KORNFÖRDELNING FRAKTIONSINDELNING 1981

Uppdrag: Erosion Norsälven			Diagram	13(15)
Beställare: Gunnel Göransson, SGI			Dnr	1.1-1305-0367
Ankomstdatum	Provtagningsredskap	Laboratorieundersökning	Datum	140130
131218	-	Datum 140116--0117 Utförd av OA	Teknisk ledare	



PROV NR	BH/SEKT	DJUP	PROVET ÄR TVÄTTSIKTAT
3.1.A	-	-	

SIKTNING SS 027123 UTGÅVA 2*					SEDIMENTATIONSFÖRSÖK	
TOTAL PROV-MÄNGD g	SIKTAD PROV-MÄNGD g		STÖRSTA KORN-STORLEK mm	HALT AV MTRL % > 20 mm	PROV-MÄNGD g	LERHALT % AV MTRL < 0,06 mm
	< 63 mm	< 20 mm				
1079,1		534		0,0	48	16

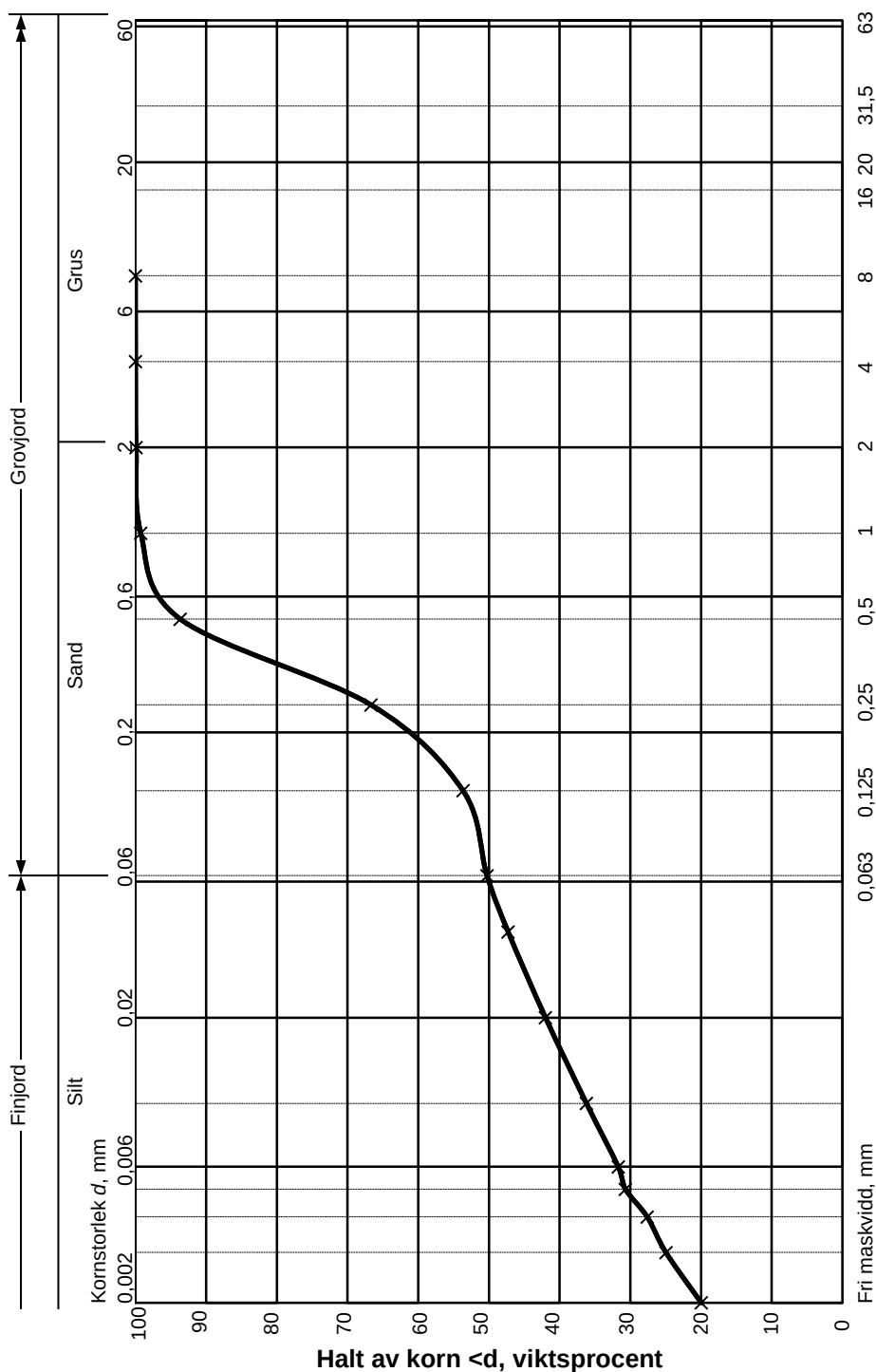
BENÄMNING AV MTRL < 20 mm	MATERIALTYP ENL. AMA 10	TJÄLFÄRLIGHETS KLASS ENL. AMA 10	GRADERINGSTAL $C_u = d_{60}/d_{10}$	ANMÄRKNING
le Si (vx)				Innehåller organsikt material. Korndensitet antagen till 2,70 t/m ³ .

*Standarden upphävd 2005-06-07.
Mätosäkerhet siktning (0,063-63 mm): ± 2,9 %. Mätosäkerhet sedimentationsanalys (0,002-0,06 mm): ± 0,6 %.
Programversion 1.2



KORNFÖRDELNING FRAKTIONSINDELNING 1981

Uppdrag: Erosion Norsälven			Diagram	14(15)
Beställare: Gunnel Göransson, SGI			Dnr	1.1-1305-0367
Ankomstdatum	Provtagningsredskap	Laboratorieundersökning	Datum	140130
131218	-	Datum 140116--0117 Utförd av OA	Teknisk ledare	



PROV NR	3.1.B		BH/SEKT	-	DJUP	-	PROVET ÄR TVÄTTSIKTAT	
SIKTNING SS 027123 UTGÅVA 2*								
SEDIMENTATIONSFÖRSÖK								
TOTAL PROV-MÄNGD g	SIKTAD PROV-MÄNGD g		STÖRSTA KORNSTORLEK mm	HALT AV MTRL % > 20 mm	PROVMÄNGD g	FÖRBEHANDLING	LERHALT % AV MTRL < 0,06 mm	
	< 63 mm	< 20 mm						
2408,1		576,4		0,0	55		40	
BENÄMNING AV MTRL < 20 mm	MATERIALTYP ENL. AMA 10	TJÄLFÄRLIGHETS KLASS ENL. AMA 10	GRADERINGSTAL $C_u = d_{60}/d_{10}$		ANMÄRKNING			
sa si Le (vx)					Innehåller organsikt material. Korndensitet antagen till 2,70 t/m3.			

*Standarden upphävd 2005-06-07.

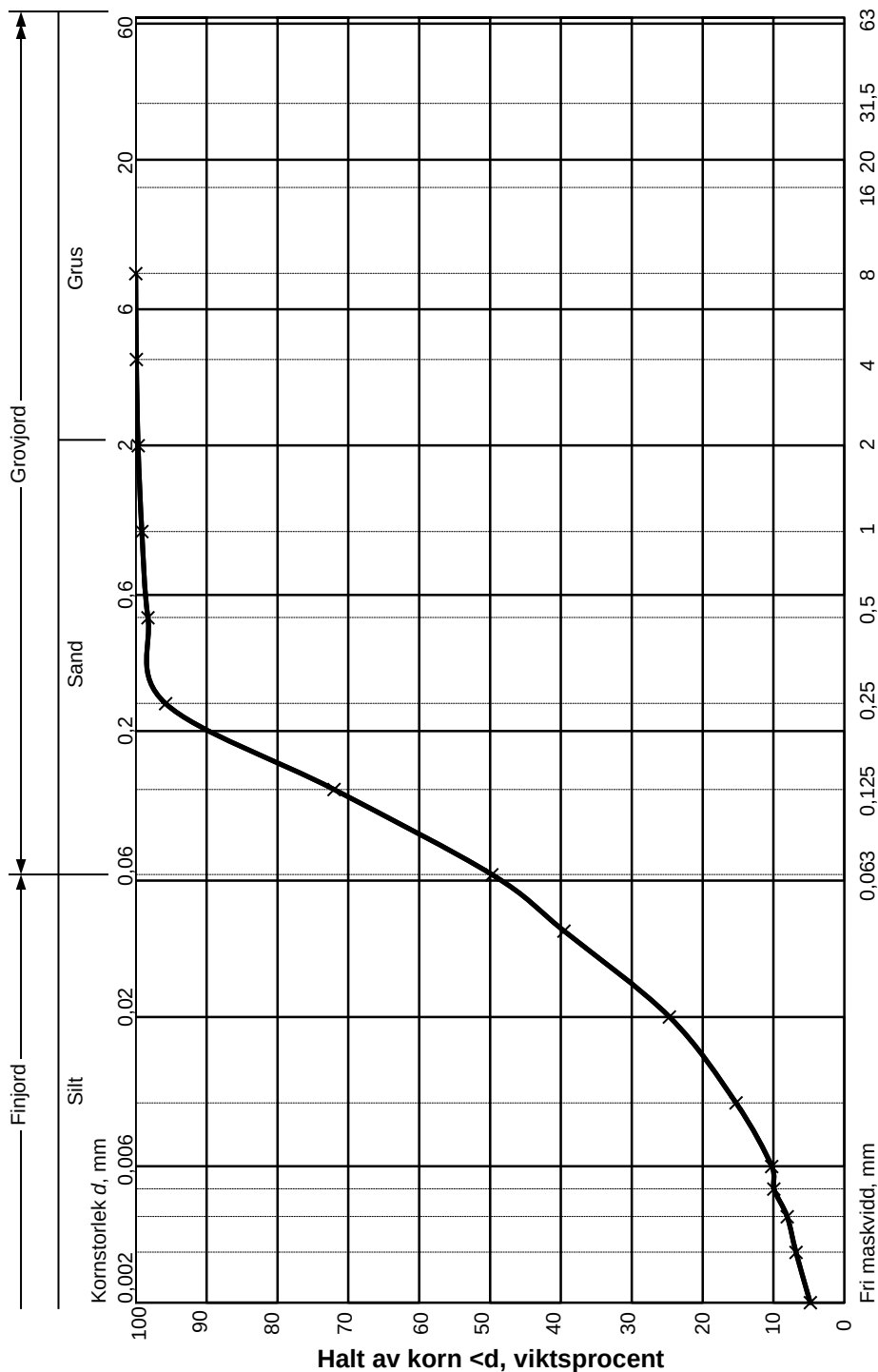
Mätosäkerhet siktning (0,063-63 mm): ± 2,9 %. Mätosäkerhet sedimentationsanalys (0,002-0,06 mm): ± 0,6 %.

Programversion 1.2



KORNFÖRDELNING FRAKTIONSINDELNING 1981

Uppdrag: Erosion Norsälven Beställare: Gunnel Göransson, SGI			Diagram	15(15)
			Dnr	1.1-1305-0367
Ankomstdatum	Provtagningsredskap	Laboratorieundersökning	Datum	140130
131218	-	Datum 140116--0117 Utförd av OA	Teknisk ledare	



PROV NR	BH/SEKT	DJUP	PROVET ÄR TVÄTTSIKTAT
3.1.C	-	-	

SIKTNING SS 027123 UTGÅVA 2*					SEDIMENTATIONSFÖRSÖK		
TOTAL PROV-MÄNGD g	SIKTAD PROV-MÄNGD g		STÖRSTA KORN-STORLEK mm	HALT AV MTRL > 20 mm %	PROVMÄNGD g	FÖRBEHÄN-LING	LERHALT % AV MTRL < 0,06 mm
	< 63 mm	< 20 mm					
1745,8		528,5		0,0	52		9,5

BENÄMNING AV MTRL < 20 mm	MATERIALTYP ENL. AMA 10	TJÄLFÄRLIGHETS KLASS ENL. AMA 10	GRADERINGSTAL $C_u = d_{60}/d_{10}$	ANMÄRKNING
sa Si vx				Innehåller organsikt material. Korndensitet antagen till 2,70 t/m ³ .

*Standarden upphävd 2005-06-07.
Mätosäkerhet siktning (0,063-63 mm): $\pm 2,9$ %. Mätosäkerhet sedimentationsanalys (0,002-0,06 mm): $\pm 0,6$ %.
Programversion 1.2



RAPPORT

utfärdad av ackrediterat laboratorium

REPORT is issued by an Accredited Laboratory

SAMMANSTÄLLNING AV LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR

Beställare: Gunnel Göransson, SGI							
Erosion Norsälven						Tabell 1B	
						Dnr 1.1-1305-0367	
Ankomstdatum	Provtagningsredskap	Laboratorieundersökning		Datum		Utförd av	
131218	-	140102--0129		OA		140129	
						Teknisk ledare	
Sektion/ Borrhål/ Djup	Benämning enligt "Jordarternas indelning och benämning", Geotekniska laboratorieanvisningar, del 2. 1981 års system ¹⁾	2) Vattenkvot w %	3) Konflytgräns w _L %	4) Plasticitetsgräns w _P %	Plasticitetstal w _L -w _P %	5) Krympgräns w _S %	Jordartsbenämning (Anmärkning)
1.1.A	BRUN, SILTIG LERA MED VÄXTDELAR OCH ENSTAKA GRUS	-	55	31	24	-	si Le vx
3.1.A	BRUNGRÅ, LERIG SILT MED ENSTAKA VÄXTDELAR	-	55	35	20	-	le Si (vx)

1) Baserad på okulär jordartsklassificering. Hänsyn har tagits till förekommande mätdata.

R11 2011-05-05

2) Vattenkvot – ISO/TS 17892-1. Medelvärde av två bestämningar.

3) Konflytgräns – Tidigare gällande standard SS 027120, utgåva 2

4) Plasticitetsgräns – Tidigare gällande standard SS027121, utgåva 2

5) Ej ackrediterad metod

Mätosäkerhet och mätområde för våra metoder redovisas på vår hemsida, www.swedgeo.se.

Ackrediterat laboratorium utses av Styrelsen för ackreditering och teknisk kontroll (SWEDAC) enligt lag. Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat. Resultaten gäller enbart för de provade materialen.

Statens geotekniska institut

Postadress, hk: 581 93 LINKÖPING
Besöksadress, hk: Olaus Magnus väg 35

Tel: 013-20 18 00
Fax: 013-20 19 14
www.swedgeo.se

E-post: sgi@swedgeo.se
Bankgiro: 5211-0053
Org.nr: 20 21 00-0712



RAPPORT

utfärdad av ackrediterat laboratorium

REPORT is issued by an Accredited Laboratory

SAMMANSTÄLLNING AV LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR

Beställare: Gunnel Göransson, SGI										
Erosion Norsälven							Tabell			1A
							Dnr			1.1-1305-0367
Ankomstdatum		Provtagningsredskap		Laboratorieundersökning			Datum			140129
131218		-		Datum 140102--0129			Utförd av OA FB			Teknisk ledare
Sektion/ Borrhål/ Djup (m)	Benämning enligt "Jordarternas indelning och be- nämning", Geotekniska laboratorieanvisningar del 2. 1981 års system ¹⁾				2) Den- sitet ρ t/m³	3) Vat- ten- kvot w %	4) Kon- flyt- gräns w _L %	5) Sen- siti- vit s _t	5) Skjuv- håll- fasthet τ kPa	Jordartsförkortning (Anmärkning)
1.1.A	BRUN, SILTIG LERA MED VÄXTDELAR OCH ENSTAKA GRUS				-	61	55	-	-	si Le vx
1.2.A	BRUNGRÅ, SILTIG SAND MED VEDRESTER				-	45	-	-	-	si Sa vx
1.2.B	GRÅ, SANDIG SILT MED ENTAKA VÄXTDELAR				-	25	-	-	-	sa Si (vx)
1.2.C	BRUNGRÅ, SILTIG SAND, RIKLIGT MED VEDRESTER				-	43	-	-	-	si Sa)vx(
2.1.A	GRÅBRUN, SANDIG SILT MED VED- OCH BARKRESTER				-	82	-	-	-	sa Si vx
2.1.B	GRÅBRUN, SANDIG, LERIG SILT, RIKLIGT MED VED- OCH BARKRESTER				-	67	-	-	-	sa le Si)vx(
2.1.C	GRÅBRUN, SANDIG SILT, RIKLIGT MED VÄXTDELAR				-	92	-	-	-	sa Si)vx(
2.2.A	BRUNGRÅ, SANDIG SILT MED VÄXTDELAR				-	63	-	-	-	sa Si vx
2.2.B	BRUNGRÅ, SANDIG, LERIG SILT MED ENSTAKA VÄXTDELAR				-	56	-	-	-	sa le Si (vx)
2.2.C	GRÅBRUN, SANDIG SILT, RIKLIGT MED VÄXTDELAR				-	78	-	-	-	sa Si)vx(
2.3.A	(BRUNGRÅTT, SANDIGT, LERIGT GRUS)				-	(26)	-	-	-	(sa le Gr) (liten provmängd)
2.3.B	(GRÅTT GRUS)				-	-	-	-	-	(Gr) (liten provmängd)
2.3.C	BRUNGRÅ, SILTIG LERA MED VÄXTDELAR				-	64	-	-	-	si Le vx
3.1.A	BRUNGRÅ, LERIG SILT MED ENSTAKA VÄXTDELAR				-	77	55	-	-	le Si (vx)
3.1.B	BRUNGRÅ, SANDIG, SILTIG LERA MED ENSTAKA VÄXTDELAR				-	46	-	-	-	sa si Le (vx)
3.1.C	GRÅ, SANDIG SILT MED VÄXTDELAR				-	49	-	-	-	sa Si vx
3.2.C	GRÅBRUNA VED- OCH BARKRESTER MED SANDINSLAG				-	104	-	-	-	Vx

1) Ej ackrediterad metod. Baserad på okulär jordartsklassificering. Hänsyn har tagits till förekommande mätdata.

R 1 2011-10-27

2) Skrymdensitet – Tidigare gällande standard SS 027114, Utgåva 2

3) Vattenkvot – ISO/TS 17892-1. Medelvärde av två bestämningar.

4) Konflytgräns – Tidigare gällande standard SS 027120, Utgåva 2

5) Skjuvhållfasthet bestämd med konmetoden. Tidigare gällande standard SS027125, Utgåva 1. Okorrigerat värde. Korrigering rekommenderas enligt SGI Information 3. Avvikelse från SS027125: Enligt rekommendationer från SGF:s laboratoriekommitté används 400 g konen då konintrycket med 100 g konen är mindre än 7 mm.

Mätosäkerhet och mätområde för våra metoder redovisas på vår hemsida, www.swedgeo.se

Ackrediterat laboratorium utses av Styrelsen för ackreditering och teknisk kontroll (SWEDAC) enligt lag. Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat. Resultaten gäller enbart för de provade materialen.

Statens geotekniska institut

Postadress, hk: 581 93 LINKÖPING
Besöksadress, hk: Olaus Magnus väg 35

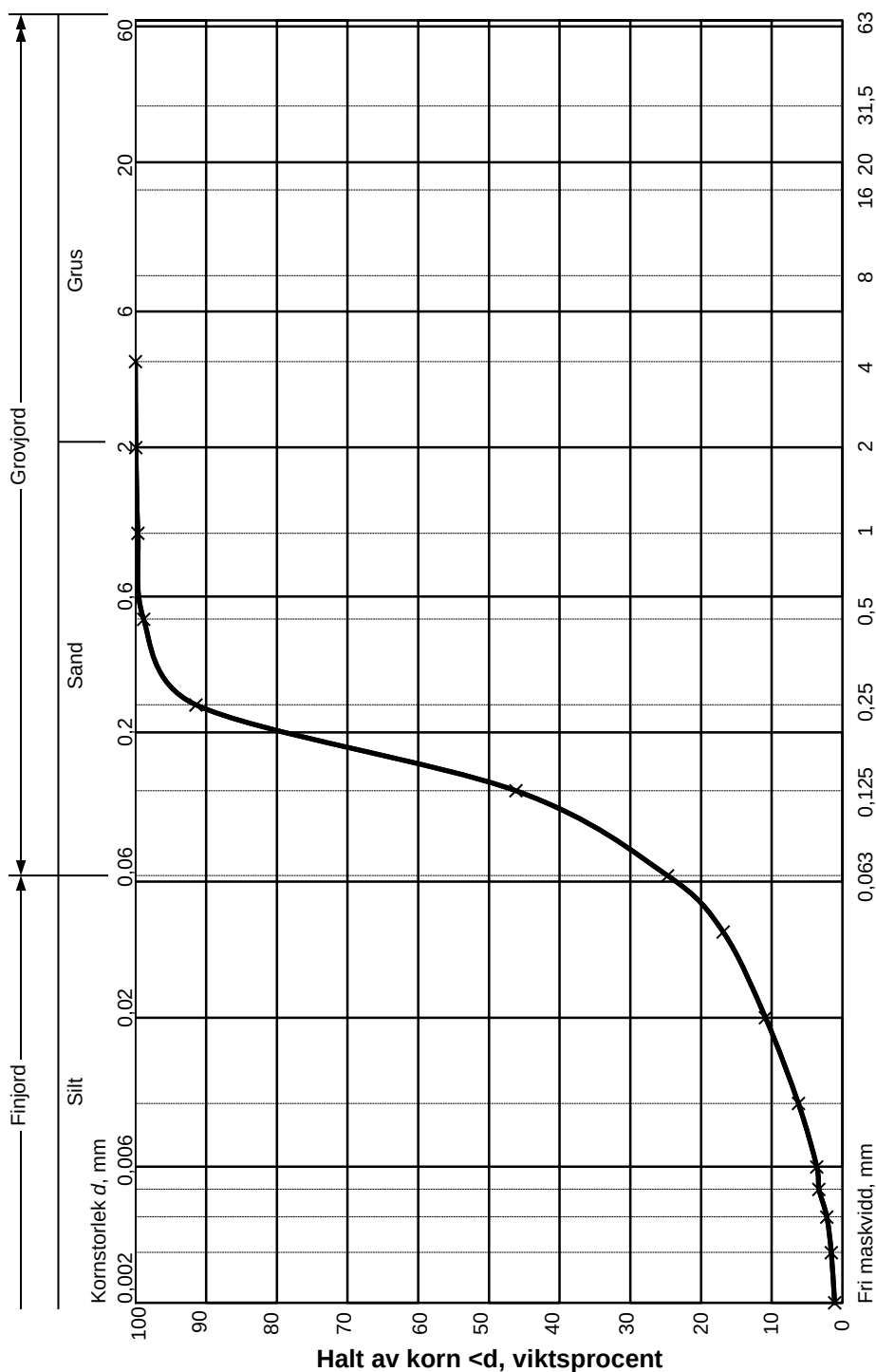
Tel: 013-20 18 00
Fax: 013-20 19 14

E-post: sgi@swedgeo.se
Bankgiro: 5211-00535
Org.nr: 20 21 00-0712



KORNFÖRDELNING FRAKTIONSINDELNING 1981

Uppdrag: Erosion Norsälven			Diagram	2(15)
Beställare: Gunnel Göransson, SGI			Dnr	1.1-1305-0367
Ankomstdatum	Provtagningsredskap	Laboratorieundersökning	Datum	140130
131218	-	Datum 140109--0110 Utförd av OA	Teknisk ledare	



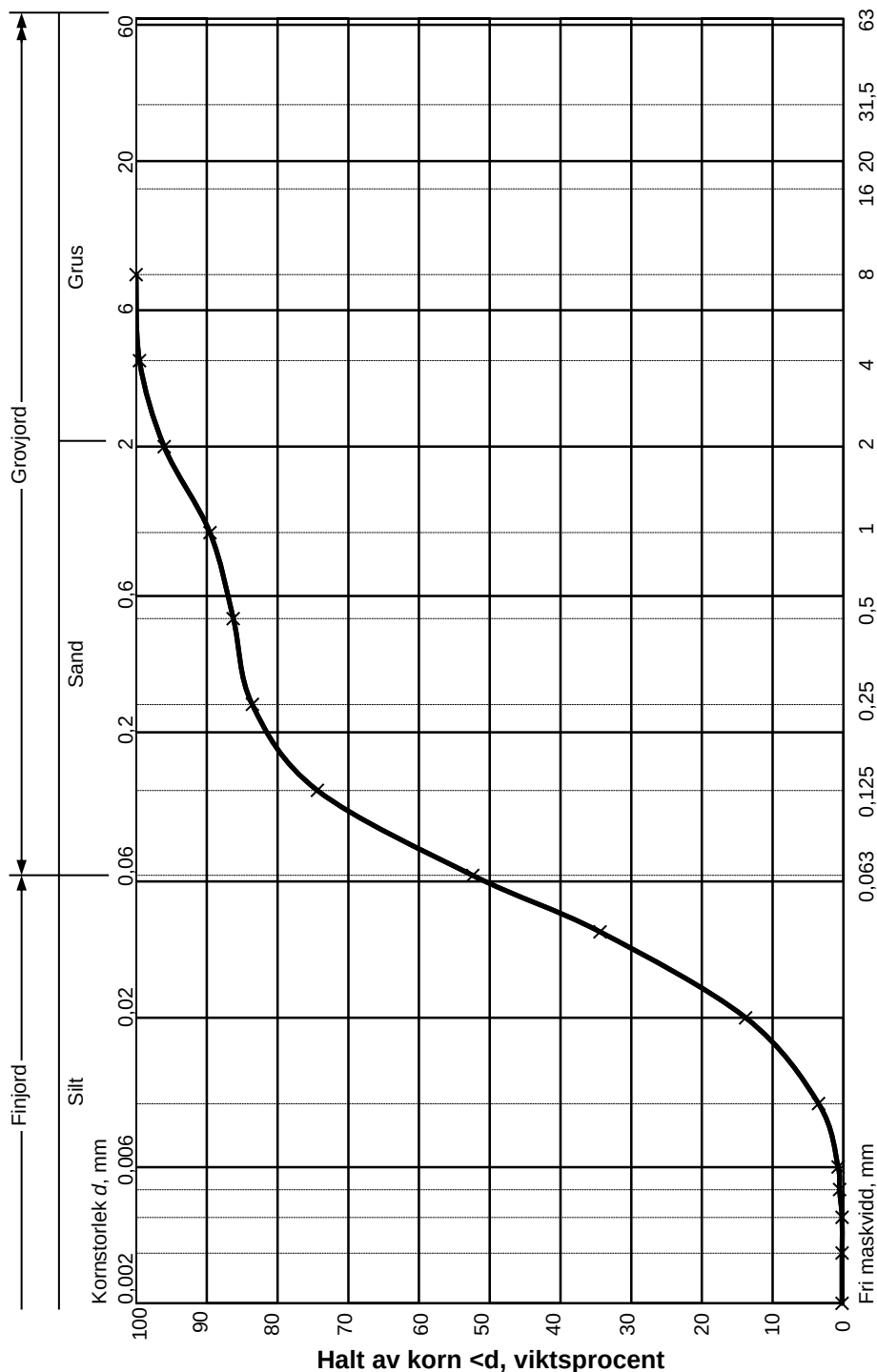
PROV NR	1.2.A	BH/SEKT	-	DJUP	-	PROVET ÄR TVÄTTSIKTAT	
SIKTNING SS 027123 UTGÅVA 2*							SEDIMENTATIONSFÖRSÖK
TOTAL PROV-MÄNGD g	SIKTAD PROV-MÄNGD g	SIKTAD KORN-STORLEK mm	HALT AV MTRL > 20 mm	PROVMÄNGD g	FÖRBEHANDLING	LERHALT % AV MTRL < 0,06 mm	
1709,8	527,4		0,0	51		4,9	
BENÄMNING AV MTRL < 20 mm	MATERIALTYP ENL. AMA 10	TJÄLFÄRLIGHETS KLASS ENL. AMA 10	GRADERINGSTAL $C_u = d_{60}/d_{10}$	ANMÄRKNING			
si Sa vx				Innehåller organiskt material. Korndensitet antagen till 2,70 t/m ³ .			

*Standarden upphävd 2005-06-07.
Mätosäkerhet siktning (0,063-63 mm): ± 2,9 %. Mätosäkerhet sedimentationsanalys (0,002-0,06 mm): ± 0,6 %.
Programversion 1.2



KORNFÖRDELNING FRAKTIONSINDELNING 1981

Uppdrag: Erosion Norsälven			Diagram	3(15)
Beställare: Gunnel Göransson, SGI			Dnr	1.1-1305-0367
Ankomstdatum	Provtagningsredskap	Laboratorieundersökning	Datum	140130
131218	-	Datum 140109--0110 Utförd av OA	Teknisk ledare	



PROV NR	1.2.B	BH/SEKT	-	DIUP	-	PROVET ÄR TVÄTTSIKTAT
SIKTNING SS 027123 UTGÅVA 2*						
TOTAL PROV-MÄNGD g	SIKTAD PROV-MÄNGD g	STÖRSTA KORSTORLEK mm	HALT AV MTRIL %	PROVMÄNGD g	FÖRBEHANDLING	LERHALT %
	< 63 mm	< 20 mm	> 20 mm			AV MTRIL < 0.06 mm
1566,1	579,2		0,0	42		0,4
BENÄMNING AV MTRIL < 20 mm	MATERIALTYP ENL. AMA 10	TJÄLFÄRLIGHETS KLASS ENL. AMA 10	GRADERINGSTAL C _u =d ₆₀ /d ₁₀	ANMÄRKNING		
sa Si (vx)				Innehåller organsikt material. Korndensitet antagen till 2,70 t/m ³ .		

*Standarden upphävd 2005-06-07.

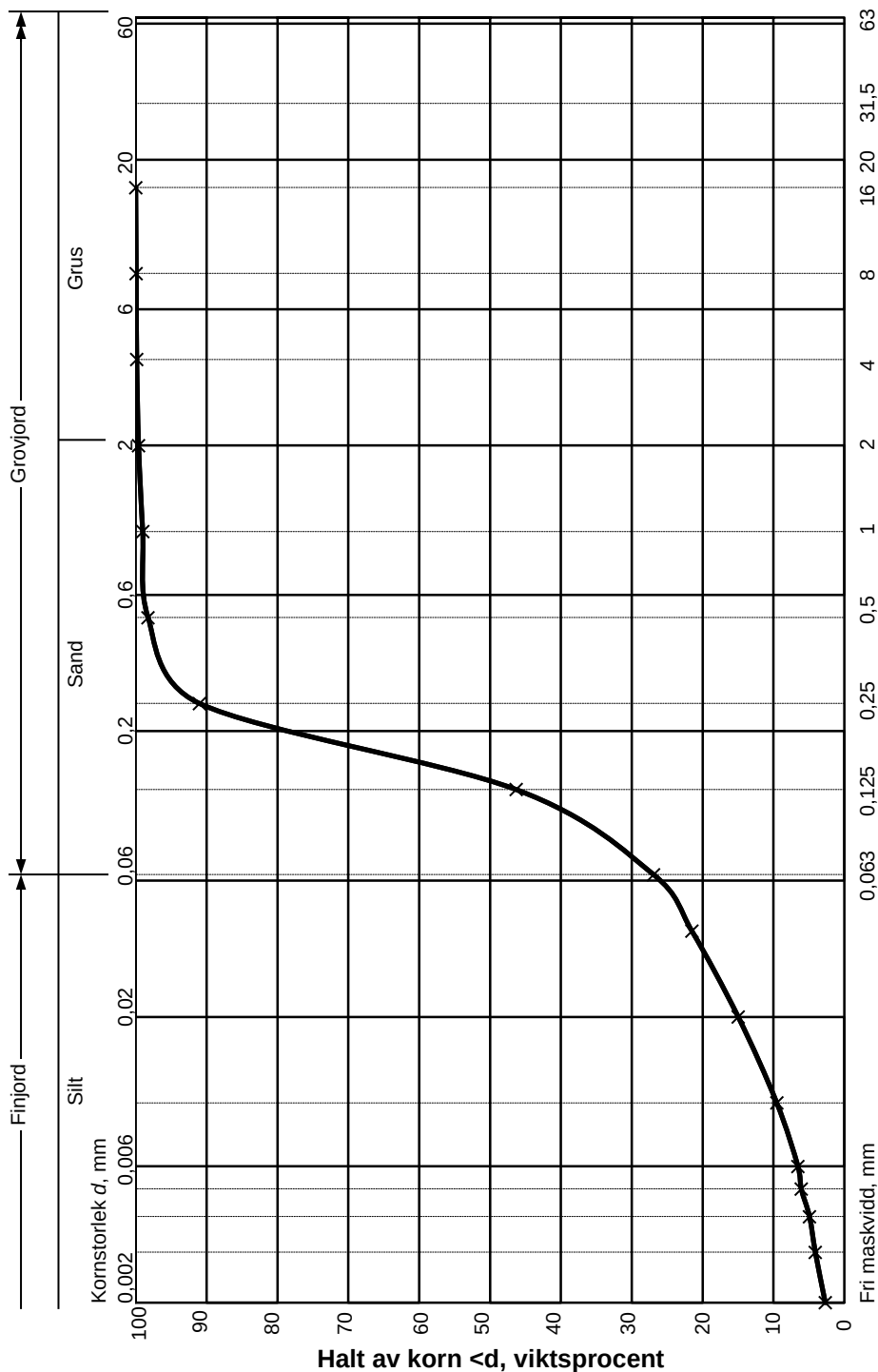
Mätosäkerhet siktning (0,063-63 mm): ± 2,9 %. Mätosäkerhet sedimentationsanalys (0,002-0,06 mm): ± 0,6 %.

Programversion 1.2



KORNFÖRDELNING FRAKTIONSINDELNING 1981

Uppdrag: Erosion Norsälven Beställare: Gunnel Göransson, SGI			Diagram	4(15)
			Dnr	1.1-1305-0367
Ankomstdatum	Provtagningsredskap	Laboratorieundersökning	Datum	140130
131218	-	Datum 140109--0110 Utförd av OA	Teknisk ledare	



PROV NR	BH/SEKT	DJUP	PROVET ÄR TVÄTTSIKTAT
1.2.C	-	-	

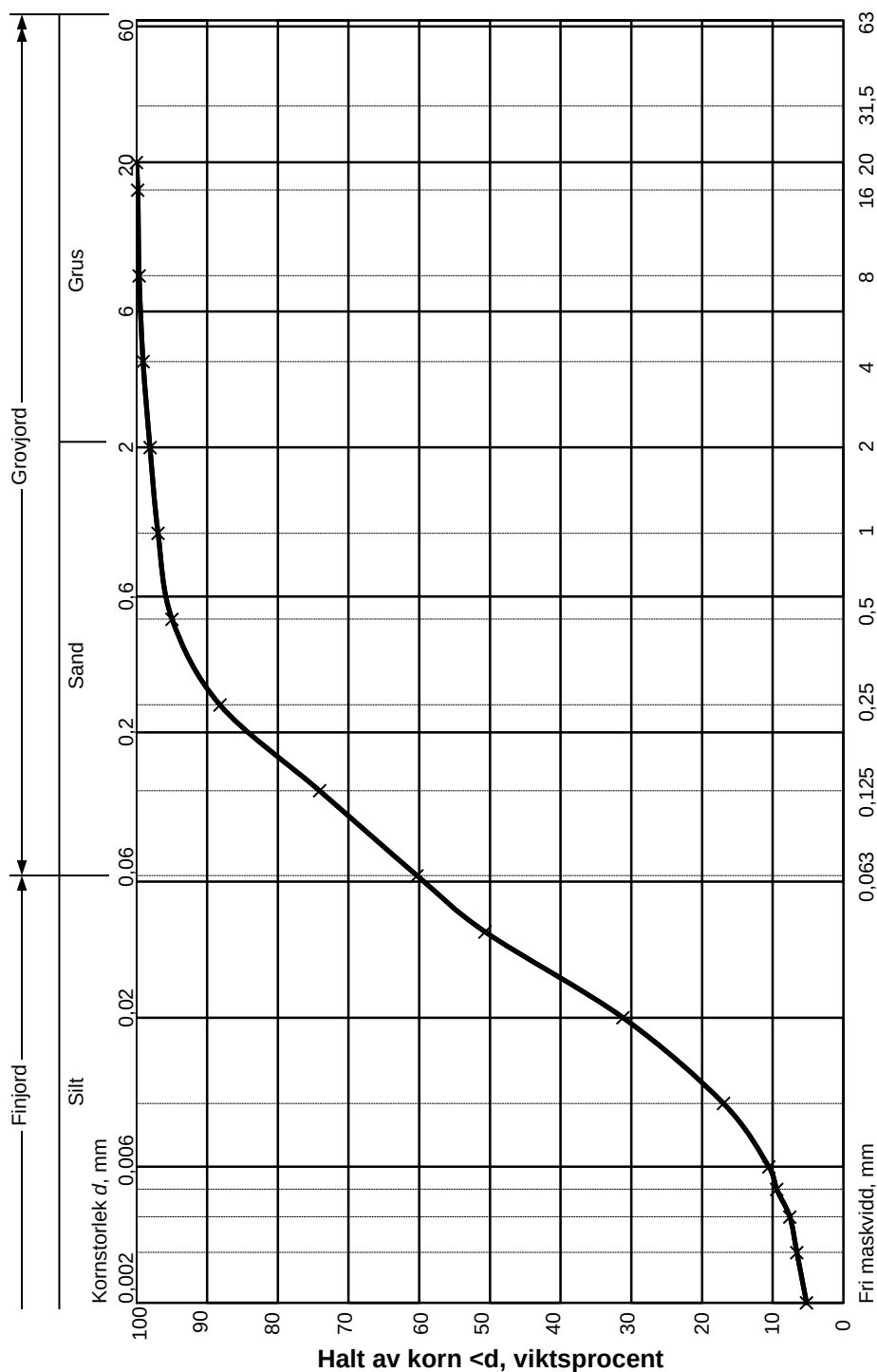
SIKTNING SS 027123 UTGÅVA 2*				SEDIMENTATIONSFÖRSÖK	
TOTAL PROV-MÄNGD g	SIKTAD PROV-MÄNGD g		STÖRSTA KORN-STORLEK mm	HALT AV MTRL % > 20 mm	PROVMÄNGD g
	< 63 mm	< 20 mm			
2299,5		565,6		0,0	69
					10

BENÄMNING AV MTRL < 20 mm	MATERIALTYP ENL. AMA 10	TJÄLFÄRLIGHETS KLASS ENL. AMA 10	GRADERINGSTAL $C_u = d_{60}/d_{10}$	ANMÄRKNING
si Sa)vx(				Innehåller organsikt material. Korndensitet antagen till 2,70 t/m ³ .

*Standarden upphävd 2005-06-07.
Mätosäkerhet siktning (0,063-63 mm): ± 2,9 %. Mätosäkerhet sedimentationsanalys (0,002-0,06 mm): ± 0,6 %.
Programversion 1.2

KORNFÖRDELNING FRAKTIONSINDELNING 1981

Uppdrag: Erosion Norsälven Beställare: Gunnel Göransson, SGI			Diagram	5(15)
			Dnr	1.1-1305-0367
Ankomstdatum	Provtagningsredskap	Laboratorieundersökning	Datum	140130
131218	-	Datum Utförd av 140113--0114 OA		
			Teknisk ledare	



PROV NR	2.1.A		BH/SEKT	-	DJUP	-	PROVET ÄR TVÄTTSIKTAT	
---------	-------	--	---------	---	------	---	-----------------------	--

SIKTNING SS 027123							UTGÅVA 2*		SEDIMENTATIONSFÖRSÖK		
TOTAL PROV-MÄNGD g	SIKTAD PROV-MÄNGD g		STÖRSTA KORN-STORLEK mm	HALT AV MTRL % > 20 mm	PROVMÄNGD g	FÖRBEHAND-LING	LERHALT % AV MTRL < 0,06 mm				
	< 63 mm	< 20 mm									
1470,9		534,4		0,0	64		8,5				

BENÄMNING AV MTRL < 20 mm	MATERIALTYP ENL. AMA 10	TJÄLFÄRLIGHETS KLASS ENL. AMA 10	GRADERINGSTAL C_u-d_{50}/d_{10}	ANMÄRKNING
sa Si vx				Innehåller organiskt material. Korndensitet antagen till 2,70 t/m3.

*Standarden upphävd 2005-06-07.

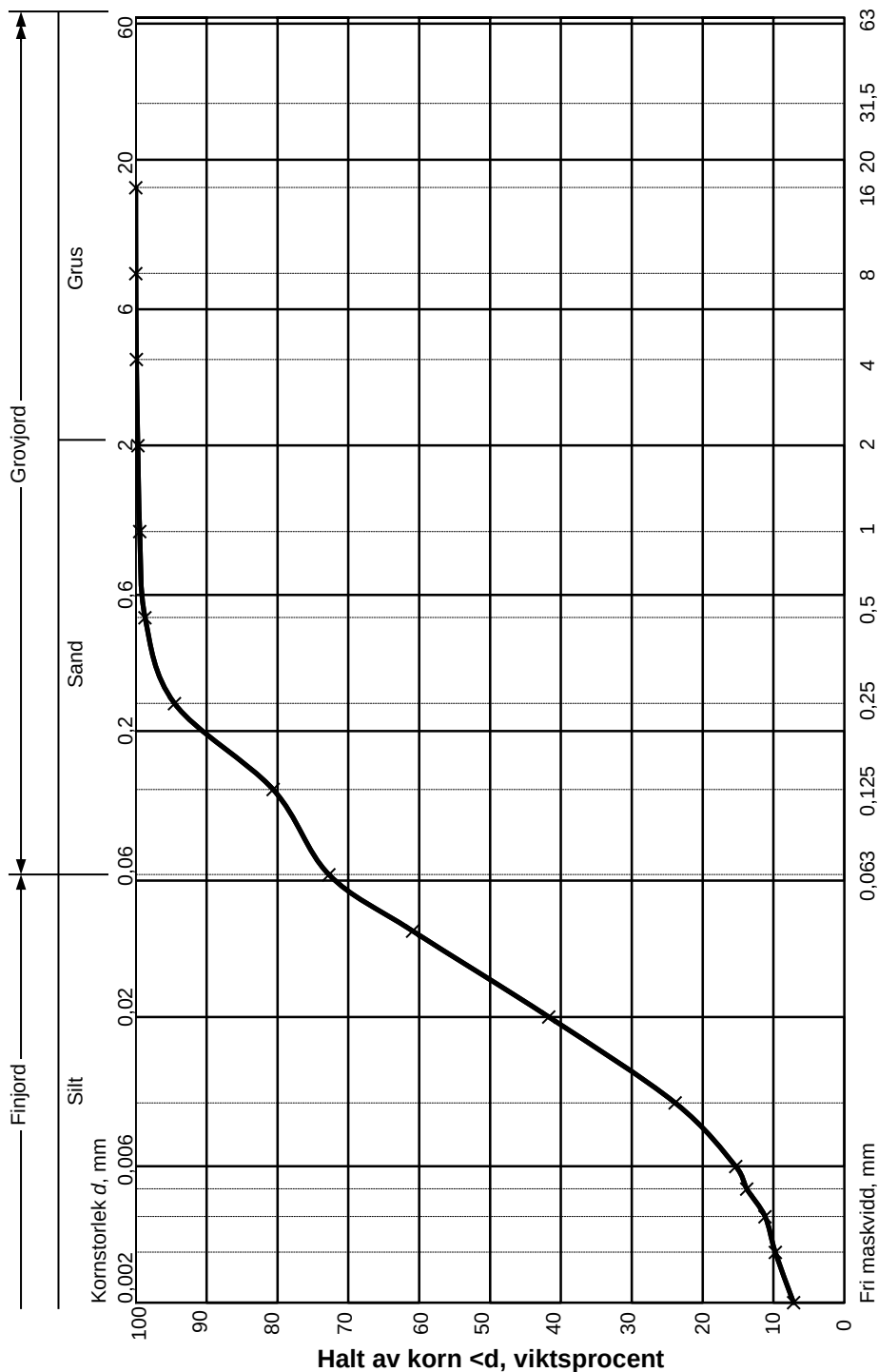
Mätosäkerhet siktning (0,063-63 mm): $\pm 2,9$ %. Mätosäkerhet sedimentationsanalys (0,002-0,06 mm): $\pm 0,6$ %.

Programversion 1.2



KORNFÖRDELNING FRAKTIONSINDELNING 1981

Uppdrag: Erosion Norsälven Beställare: Gunnel Göransson, SGI			Diagram	6(15)
			Dnr	1.1-1305-0367
Ankomstdatum	Provtagningsredskap	Laboratorieundersökning	Datum	140130
131218	-	Datum 140113-0114 Utförd av OA	Teknisk ledare	



PROV NR	2.1.B		BH/SEKT	-	DJUP	-	PROVET ÄR TVÄTTSIKTAT		
SIKTNING SS 027123 UTGÅVA 2*									
TOTAL PROV-MÄNGD g			SIKTAD PROV-MÄNGD g		STÖRSTA KORN-STORLEK mm	HALT AV MTR L % > 20 mm	PROVMÄNGD g	FÖRBEHANDLING	LERHALT % AV MTR L < 0,06 mm
			< 63 mm	< 20 mm					
1988				507		0,0	57		10
BENÄMNING AV MTR L < 20 mm			MATERIALTYP ENL. AMA 10	TJÄLFÄRLIGHETS KLASS ENL. AMA 10		GRADERINGSTAL C _u =d ₆₀ /d ₁₀	ANMÄRKNING		
sa le Si)vx(							Innehåller organsikt material. Korndensitet antagen till 2,70 t/m3.		

*Standarden upphävd 2005-06-07.

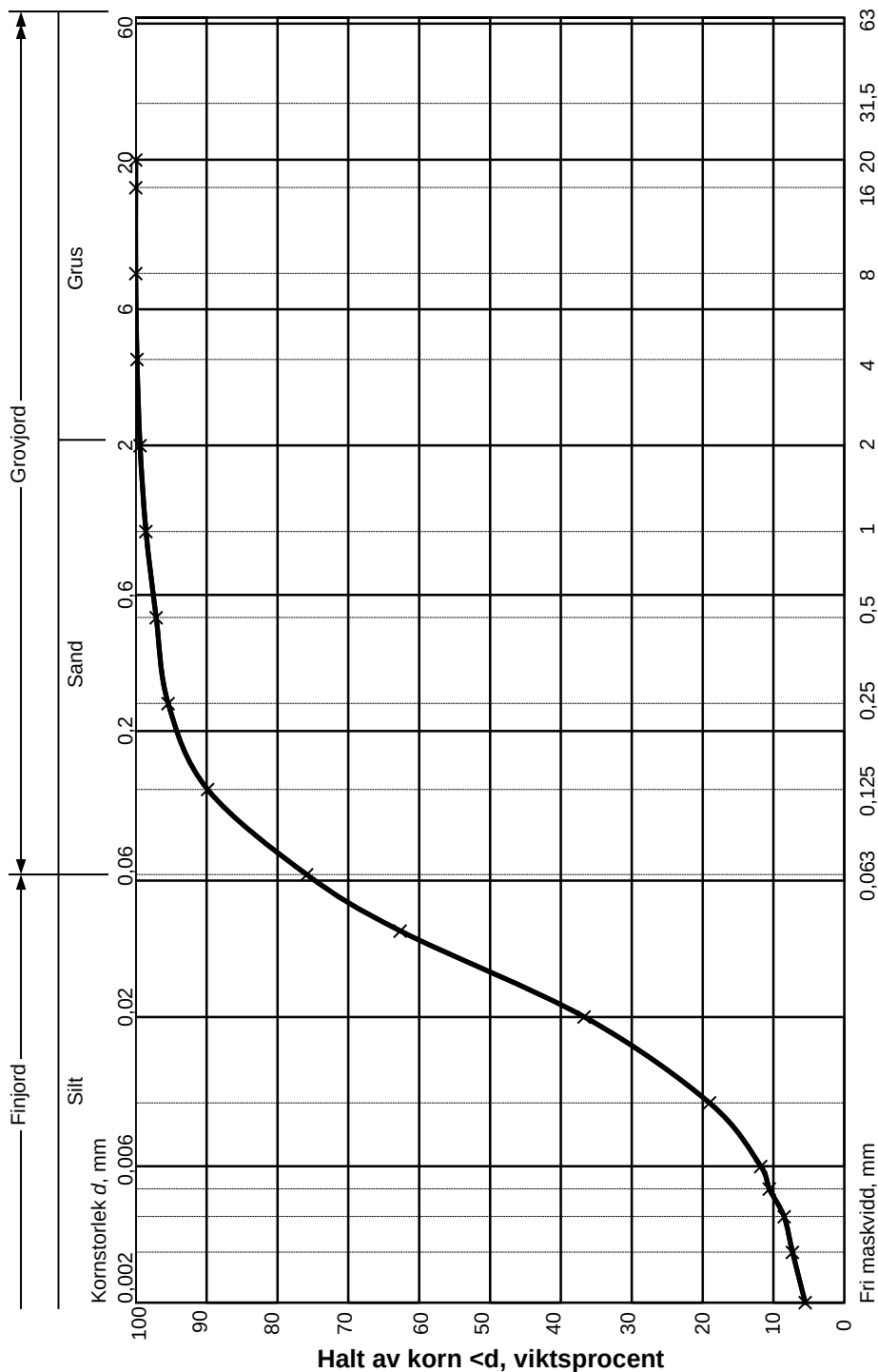
Mätosäkerhet siktning (0,063-63 mm): ± 2,9 %. Mätosäkerhet sedimentationsanalys (0,002-0,06 mm): ± 0,6 %.

Programversion 1.2



KORNFÖRDELNING FRAKTIONSINDELNING 1981

Projektnamn: Erosion Norsälven			Diagram	7(15)
Beställare: Gunnel Göransson, SGI			Dnr	1.1-1305-0367
Ankomstdatum	Provtagningsredskap	Laboratorieundersökning	Datum	
131218	-	Datum Utförd av 140113--0114 OA		
			Teknisk ledare	



PROV NR	BH/SEKT	DJUP	PROVET ÄR TVÄTTSIKTAT
2.1.C	-	-	

SIKTNING SS 027123 UTGÅVA 2*					SEDIMENTATIONSFÖRSÖK	
TOTAL PROV-MÄNGD g	SIKTAD PROV-MÄNGD g		STÖRSTA KORN-STORLEK mm	HALT AV MTRL % > 20 mm	PROVMÄNGD g	LERHALT % AV MTRL < 0,06 mm
	< 63 mm	< 20 mm				
1661,1		586,4		0,0	54	7,2

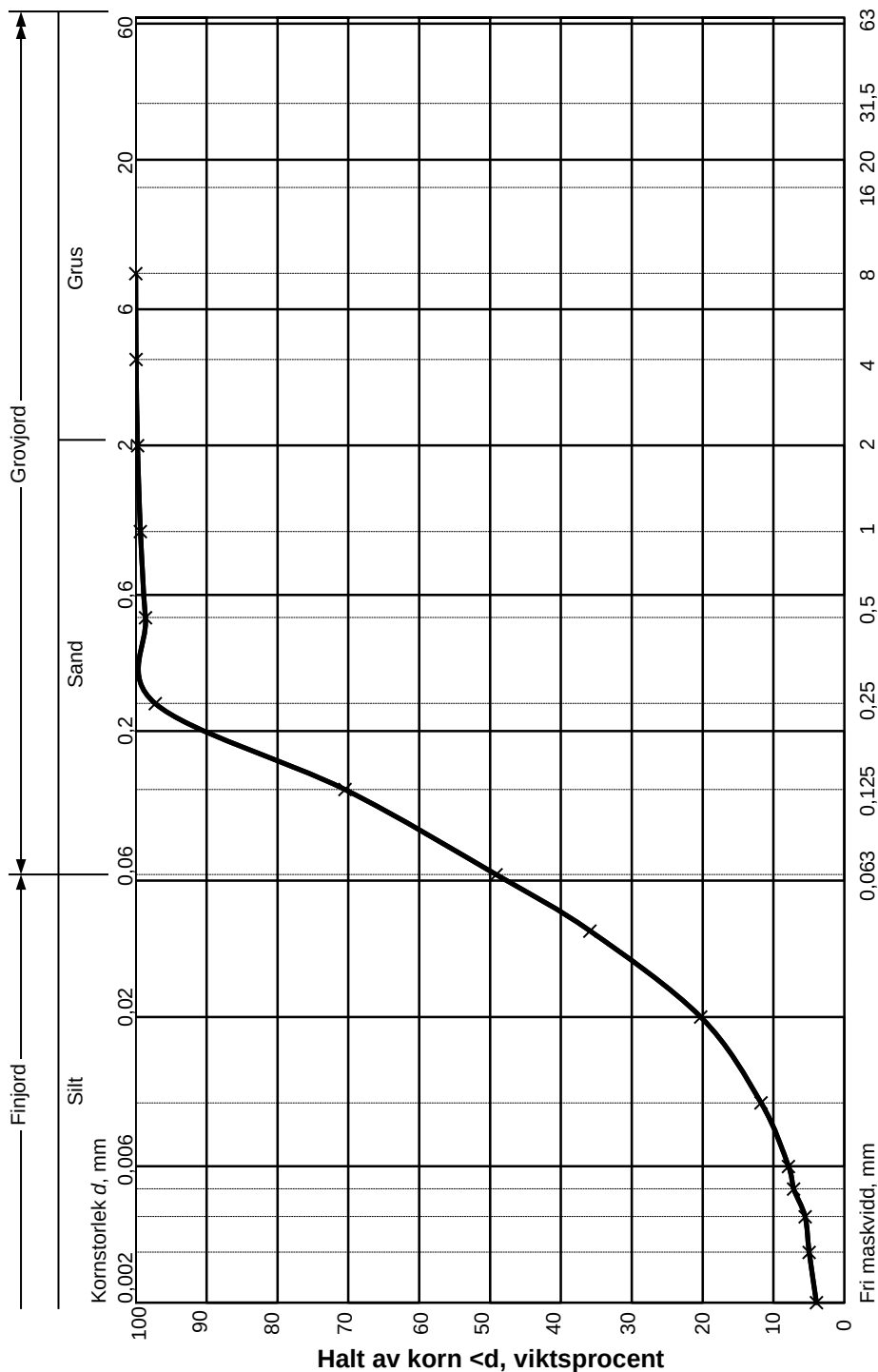
BENÄMNING AV MTRL < 20 mm	MATERIALTYP ENL. AMA 10	TJÄLFÄRLIGHETS KLASS ENL. AMA 10	GRADERINGSTAL $C_u = d_{60}/d_{10}$	ANMÄRKNING	
sa Si vx(				Innehåller organiskt material. Korndensitet antagen till 2,70 t/m ³ .	

*Standarden upphävd 2005-06-07.
Mätosäkerhet siktning (0,063-63 mm): ± 2,9 %. Mätosäkerhet sedimentationsanalys (0,002-0,06 mm): ± 0,6 %.
Programversion 1.2



KORNFÖRDELNING FRAKTIONSINDELNING 1981

Uppdrag: Erosion Norsälven Beställare: Gunnel Göransson, SGI			Diagram	8(15)
			Dnr	1.1-1305-0367
Ankomstdatum	Provtagningsredskap	Laboratorieundersökning	Datum	140130
131218	-	Datum 140115--0116 Utförd av OA	Teknisk ledare	



PROV NR		2.2.A		BH/SEKT		-		DJUP		-		PROVET ÄR TVÄTTSIKTAT			
SIKTNING SS 027123 UTGÅVA 2*															
SEDIMENTATIONSFÖRSÖK															
TOTAL PROV-MÄNGD g		SIKTAD PROV-MÄNGD g		< 20 mm		STÖRSTA KORN-STORLEK mm		HALT AV MTRL % > 20 mm		PROVMÄNGD g		FÖRBEHANDLING		LERHALT % AV MTRL < 0,06 mm	
1813,5		501,2						0,0		56				8,0	
BENÄMNING AV MTRL < 20 mm		MATERIALTYP ENL. AMA 10		TJÄLFÄRLIGHETS KLASS ENL. AMA 10		GRADERINGSTAL $C_u=d_{60}/d_{10}$		ANMÄRKNING							
sa Si vx								Innehåller organiskt material. Korndensitet antagen till 2,70 t/m3.							

*Standarden upphävd 2005-06-07.

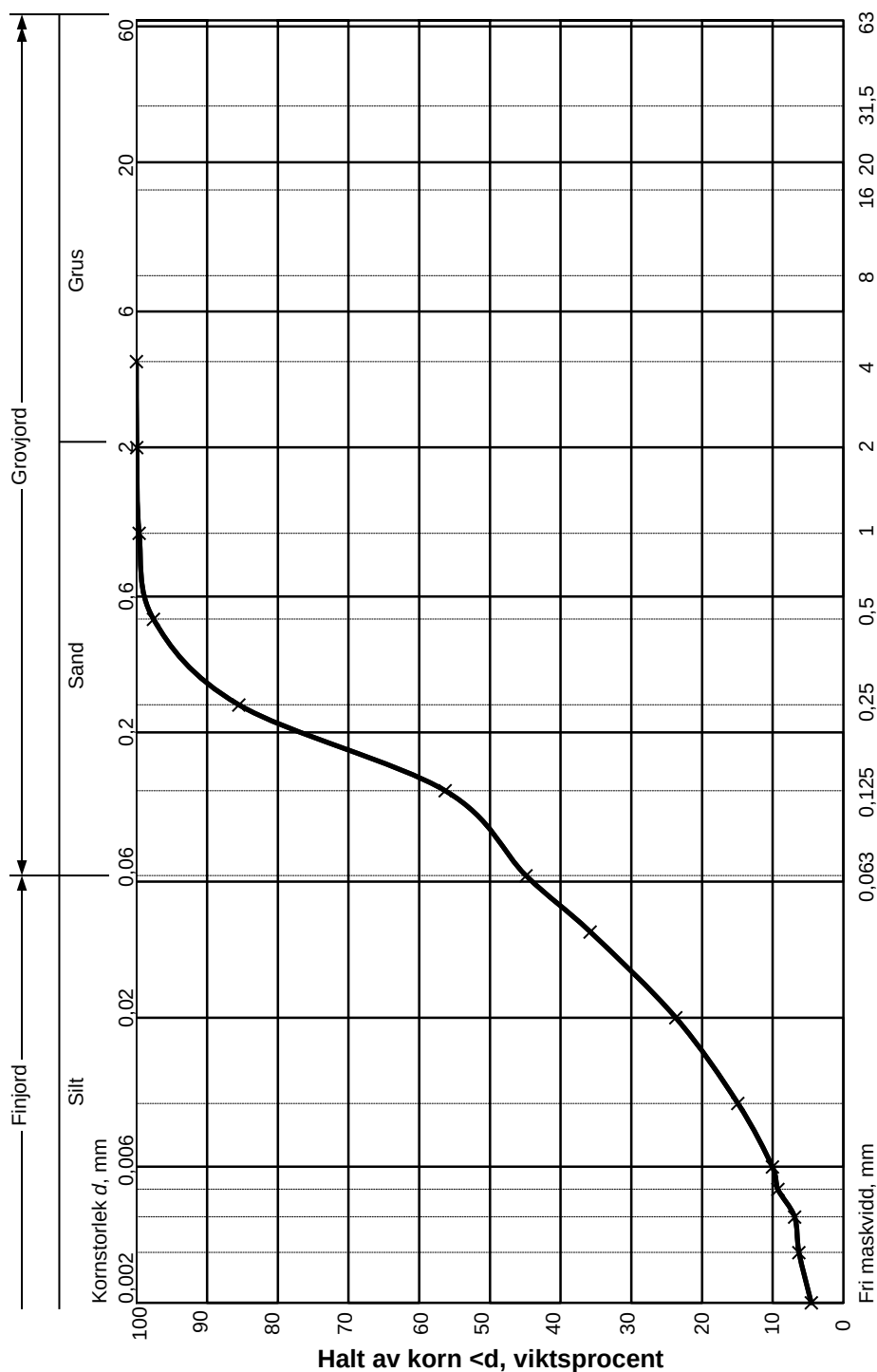
Mätosäkerhet siktning (0,063-63 mm): ± 2,9 %. Mätosäkerhet sedimentationsanalys (0,002-0,06 mm): ± 0,6 %.

Programversion 1.2



KORNFÖRDELNING FRAKTIONSINDELNING 1981

Uppdrag: Erosion Norsälven			Diagram	9(15)
Beställare: Gunnel Göransson, SGI			Dnr	1.1-1305-0367
Ankomstdatum	Provtagningsredskap	Laboratorieundersökning	Datum	140130
131218	-	Datum 140115--0116 Utförd av OA	Teknisk ledare	



PROV NR	2.2.B	BH/SEKT	-	DJUP	-	PROVET ÄR TVÄTTSIKTAT	
SIKTNING SS 027123 UTGÅVA 2*							SEDIMENTATIONSFÖRSÖK
TOTAL PROV-MÄNGD g	SIKTAD PROV-MÄNGD g	SIKTAD KORN-STORLEK mm	HALT AV MTRL % > 20 mm	PROV-MÄNGD g	FÖRBEHÅL-LING	LERHALT % AV MTRL < 0,06 mm	
2470	524,5		0,0	52		10	
BENÄMNING AV MTRL < 20 mm	MATERIALTYP ENL. AMA 10	TJÄLFÄRLIGHETS KLASS ENL. AMA 10	GRADERINGSTAL $C_u = d_{60}/d_{10}$	ANMÄRKNING			
sa le Si (vx)				Innehåller organiskt material. Korndensitet antagen till 2,70 t/m ³ .			

*Standarden upphävd 2005-06-07.

Mätosäkerhet siktning (0,063-63 mm): ± 2,9 %. Mätosäkerhet sedimentationsanalys (0,002-0,06 mm): ± 0,6 %.

Programversion 1.2

Bilaga 3

**PM Jämförelse mellan gamla
och nya sektioner**

Avsändare
Linda Blied

Mottagare
SGI, Gunnel Göransson

Uppdragsnr
15088

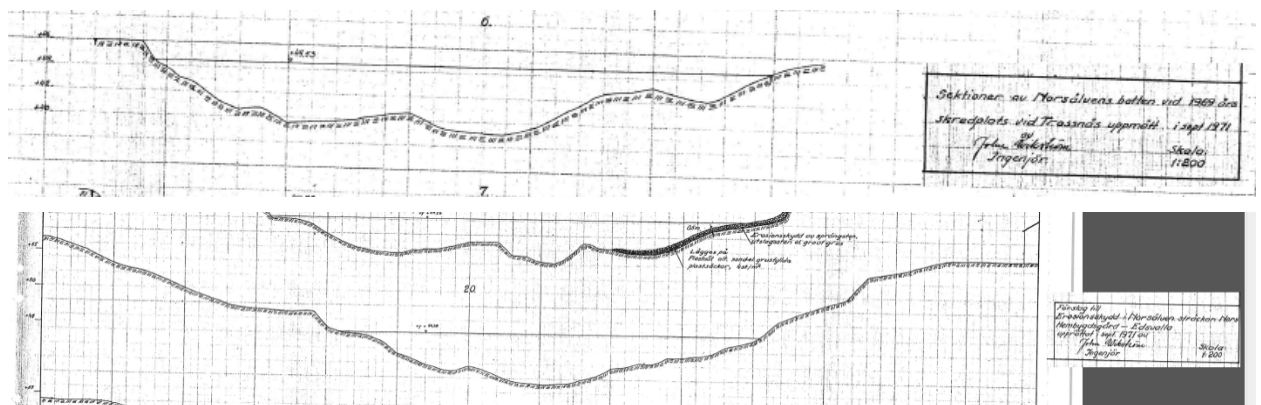
Jämförelse mellan gamla och nya sektioner

Detta PM syftar till att dokumentera arbetsmetodik och resultat vid jämförelse mellan äldre lodade sektioner samt nyuppmätt batymetri i Norsälven.

Befintliga äldre lodningar

Information om djupdata finns i några tidigare utredningar. Utifrån dessa gjordes ett urval på tre sektioner och en yta för att testa om ovan nämnda metod är meningsfull.

- *Okänd konsult (1971)*: sammanlagt 20 lodade sektioner (numrerade 5-24) mellan Edsvalla och Trossnäs, där ett stort skred gått 1969. **Sektion 6** (vid Trossnässkredet) och **sektion 20** (nedströms Olsäter) valdes för vidare analys. Sektionerna nedan är betraktade i nedströms riktning.

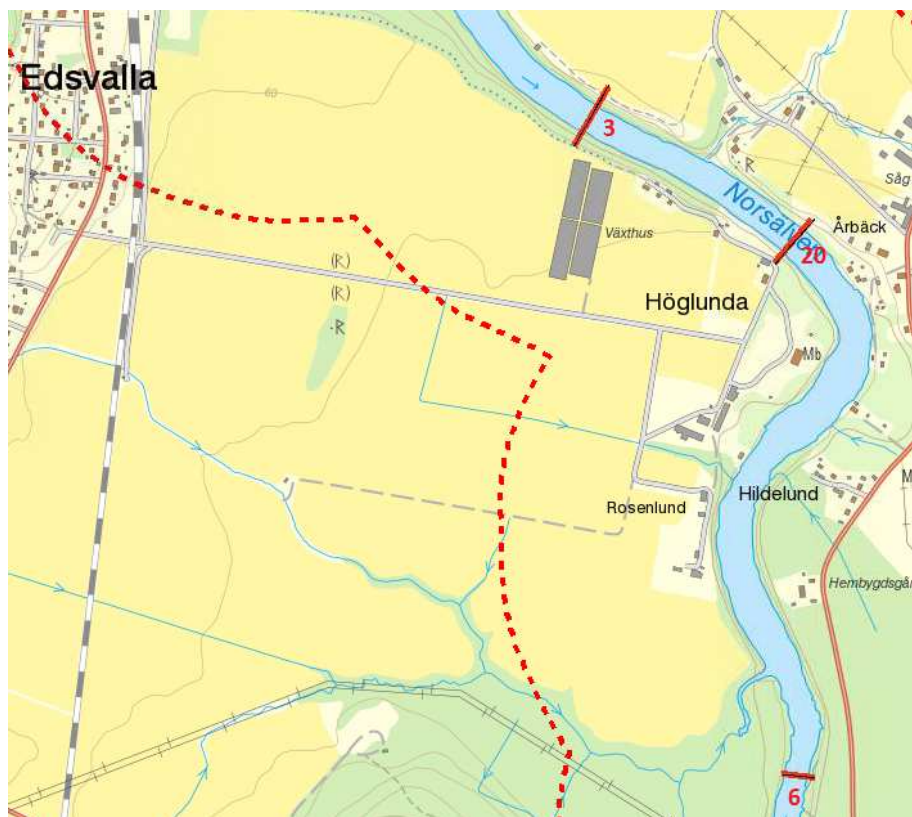


- *Tyréns (1981)*: sammanlagt 7 lodade sektioner mellan Edsvalla och utloppet i Väneren. De redovisade lodningarna ska vara utförda 1952. **Sektion 3** (mellan Olsäter och Årbäck) valdes för vidare analys.



- *SWECO (2003)*: 2 lodade sektioner utanför Höglunda gård, ca 3 km nedströms Edsvalla.
- *SWECO (2003)*: en lodad sektion utanför södra delen av Edsvalla. Lodningen utförd 2001.
- *SWECO (2003)*: sammanhängande batymetri (mätt med ekolod) för ett område utanför Prästgården samt direkt nedströms Edsvalla. **Hela området** valdes för vidare analys.

De aktuella sektionernas planlägen visas nedan:



Sektioner

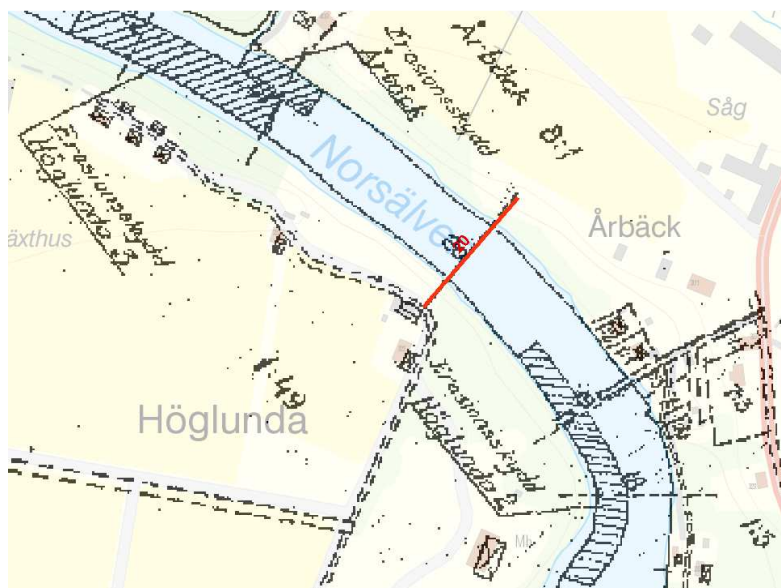
Korrigerig i plan

De äldre sektionerna finns endast redovisade på papperskopior och därför behövde dessa georefereras mot översiktskartan. Detta utfördes i ArcMap 10.1. På grund av avsaknad av detaljer i ritningarna kvarstod vissa förskjutningar efter refereringen.

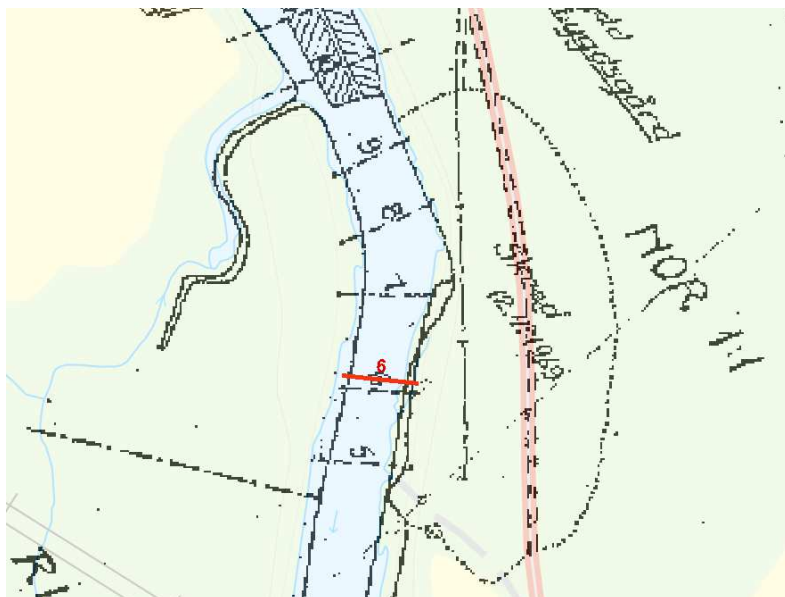
Sektion 3/



Sektion 20/



Sektion 6/



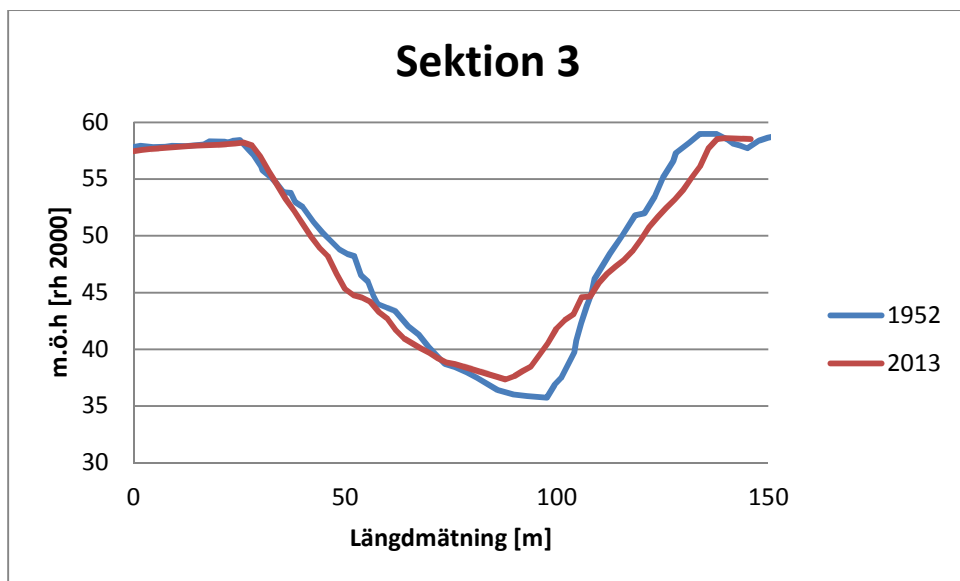
Upprättande av profiler

De gamla sektionerna digitaliserades i AutoCAD och de nya genererades i ArcMap med 3D Analyst. De gamla sektionerna har antagits vara ritade med höjdsystemet RH00 och ska därför adderas med 0,483 m enligt <http://karlstad.se/kommun-och-politik/kartor-och-geografisk-information/nytt-hojdsystem---rh2000/>.

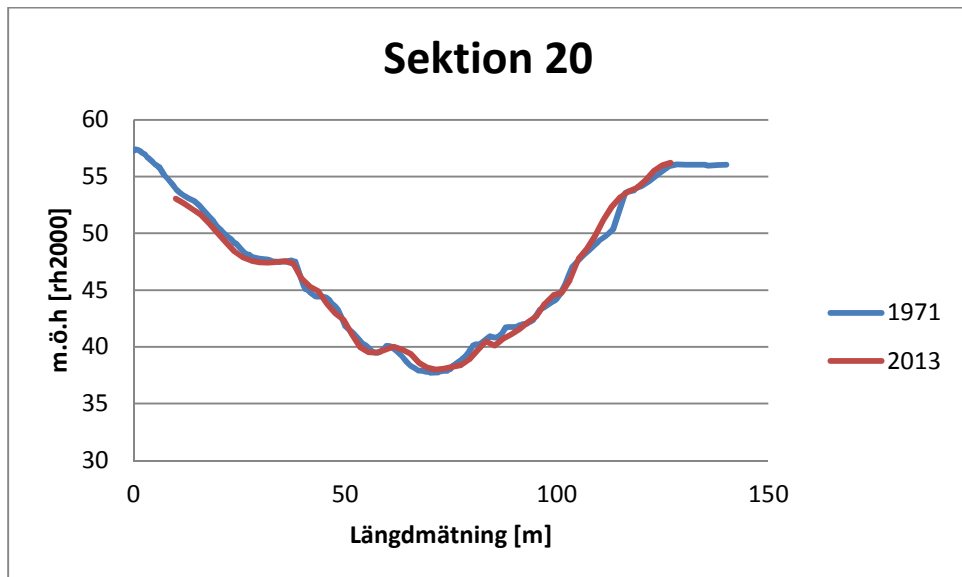
Resultat

Nedanstående sektioner är att betrakta mot nedströms riktning, dvs. vänster i profilen är Norsälvens östra strand. För att motverka felet från georefereringen har manuella korrigeringar utförts i längdsled.

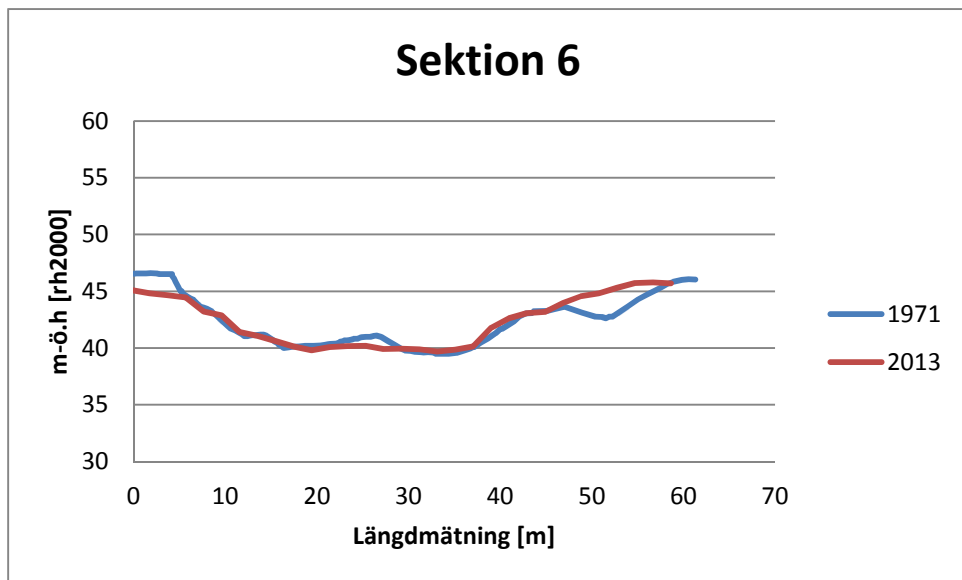
Sektion 3 - tecken på att det under de senaste sextio åren har skett en transport av material från den västra slänten ner i älvfåran.



Sektion 20 – inga förändringar under de fyrtio år som har passerat mellan mätningarna.



Sektion 6 – förändringar har skett framförallt i strandlinjen (vattenytan ligger här kring nivån +45): på östra sidan (där skredet inträffade 1969) har strandhaket försvunnit och på den västra sidan har material tillkommit.





PM

Datum
2014-02-13

Diariernr
1.1-1305-0367

Ekolodade ytor

För SWECOs ekolodade ytor finns rådata ej tillgängligt utan materialet är i form av höjdkurvor i dwg-format. Detta transformerades därför i ArcMap via verktyget "CAD to Geodatabase".

Bilaga 4

PM Erosionsberäkningar i GIS/Matlab



PM

Datum
2014-07-04

Diariernr
1.1-1305-0367

Avsändare
Jim Hedfors

Mottagare
SGI, Gunnel Göransson

Uppdragsnr
15088

Styrdokument:

Erosionsberäkning i GIS/Matlab baserad på bottenskjuvspänning och empiriska samband för bottengeologi.

Detta dokument är en kompletterande teknisk beskrivning till *06_Instruktion för beräkning i GIS* (P:\Skredriskartering 2013-2015\Delområden\Norsälven\15088_Erosion NÄ_gungor\MODELLER\06_Instruktion för beräkning i GIS.docx).

Dokumentets syfte: Syftet med dokumentet är att redovisa hur de spatiella beräkningarna har utförts samt illustrera exempel på del- och slutresultat.

Uppgift: Beräkna erosion, E (m) enligt:

$$E = k_d (\tau_0 - \tau_c)^\alpha \Delta t \quad (1)$$

där: k_d = eroderbarhetskoefficient ($\text{m}^3\text{N s}^{-1}$)
 τ_0 = genomsnittlig skjuvspänning (Pa)
 τ_c = skritisk skjuvspänning (Pa)
 α = anses i allmänhet vara lika med 1
 Δt = tidsintervall (s)

$$\text{och: } k_d = 1 \times 10^{-7} \tau_c^{-0.5} \quad (2)$$

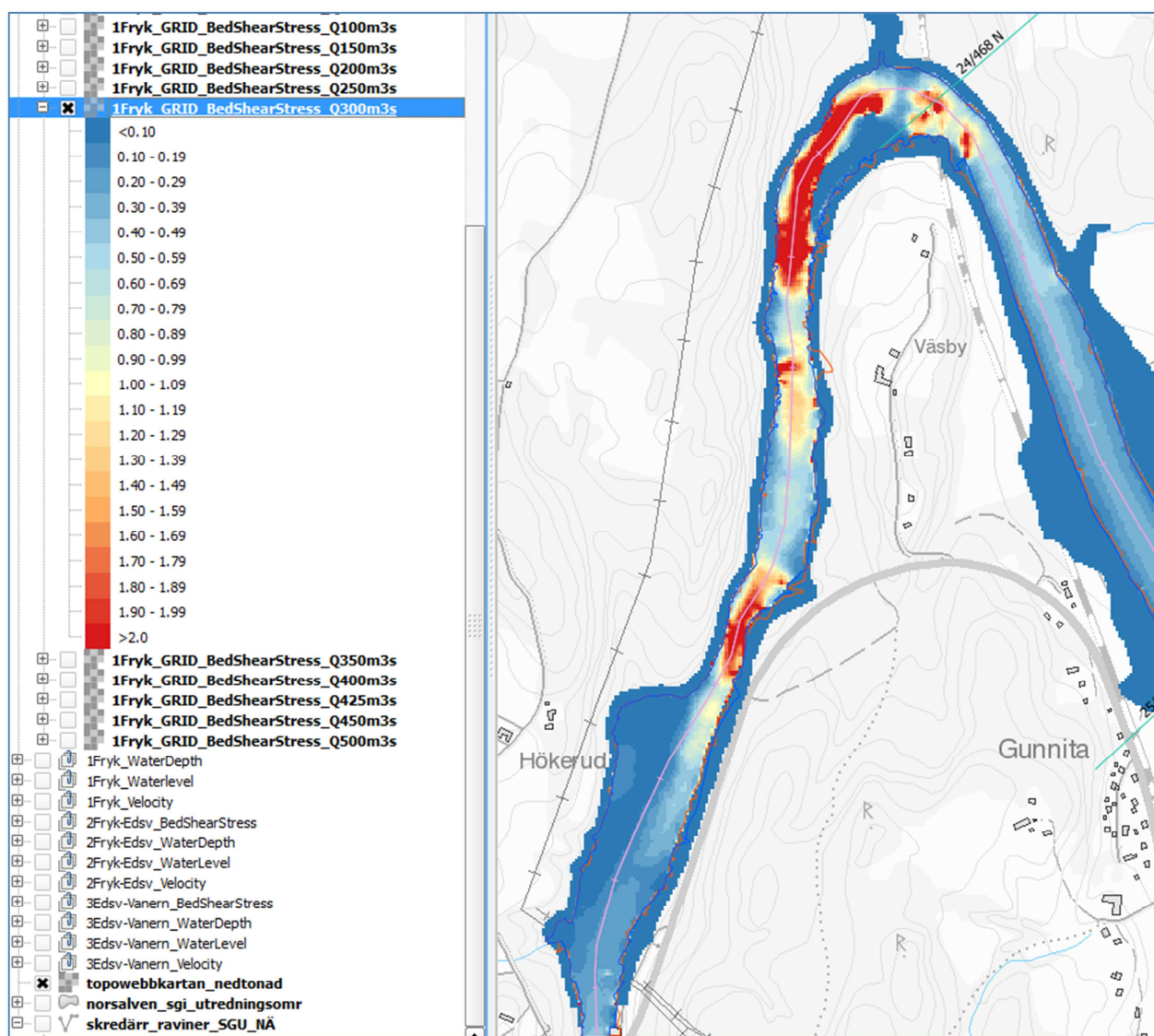
Nyttjad mjukvara: ArcGIS, QGIS, Mathworks Matlab, Notepad++.

Dataunderlag: Underlaget består av olika tif-format (uint8, signed och unsigned samt 32-bitars RGB) med olika upplösning (cellstorlek) samt ett litet antal vektordatalager (shape-filer). Tabell 1 beskriver underlagens parametrar, filnamn och sökväg till lagringsplats.

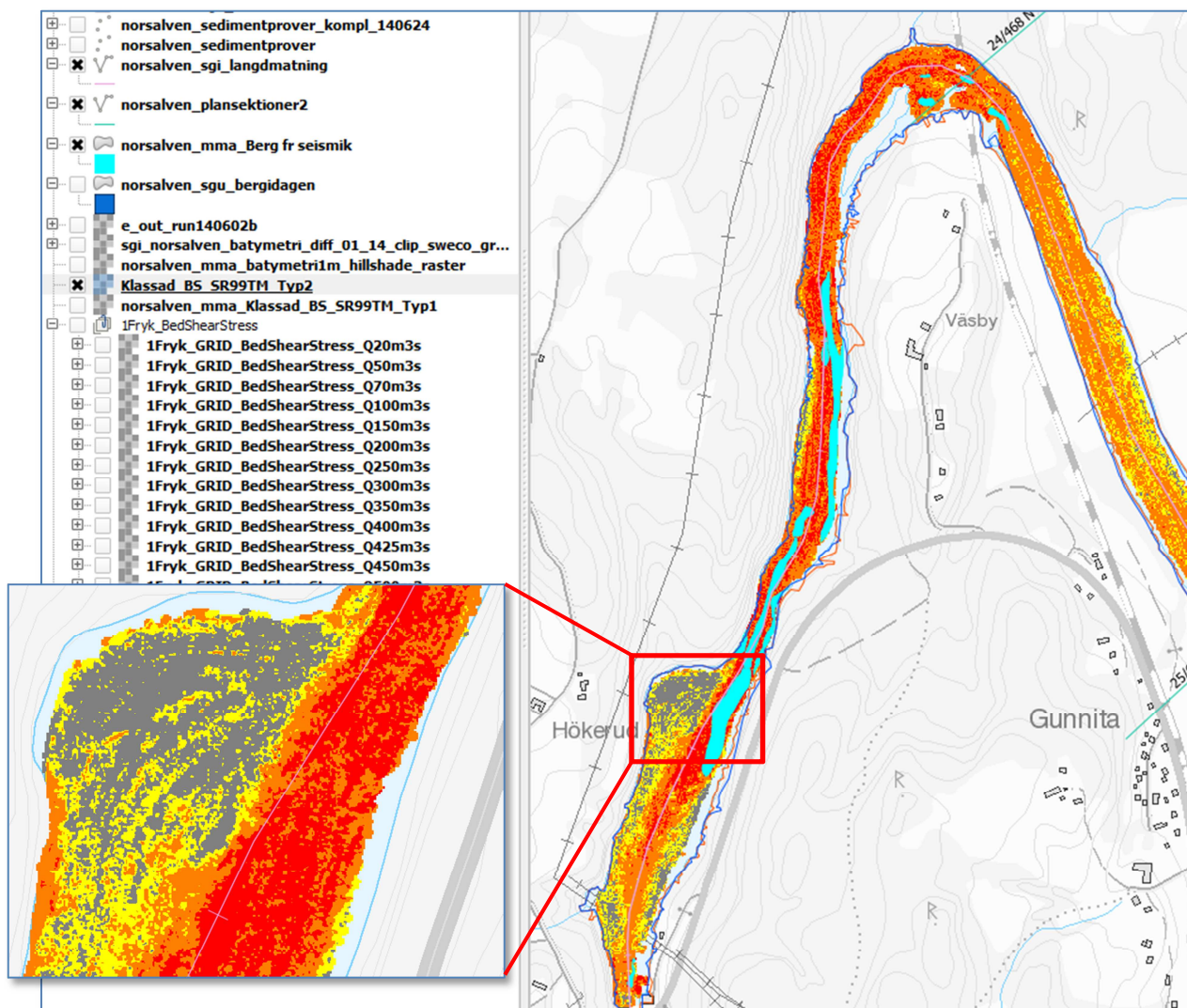
Tabell 1. Dataunderlag och sökvägar.

Leverantör	Beskrivning	Parameter och GIS-skikt	Sökväg
SMHI	Hydrodynamisk modell, 5x5m, raster	Bottenskjuvspänning för $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$, τ_0 <i>1Fryk_GRID_BedShearStress_Q300m3s.tif</i> <i>2Fryk-Edsv_GRID_BedShearStress_Q300m3s.tif</i> <i>3Edsv-Vanern_GRID_BedShearStress_Q300m3s.tif</i>	P:\Skredriskartering 2013-2015\Delområden\Norsälven\GISdata_ext\05_smhi
Norconsult	Backscatter -> bottengeologi, tolkade kritiska skjuvspänningar för olika bottentyper, 0.5x0.5m, raster	Kritisk skjuvspänning, τ_c <i>Klassad_BS_SR99TM_Typ2.tif</i>	P:\Skredriskartering 2013-2015\Delområden\Norsälven\GISdata_ext\08_kon
MMA	Berg från seismik, vektor	Bergmask för avgränsning av resultatgrid <i>norsalven_mma_Berg fr seismik.shp</i>	P:\Skredriskartering 2013-2015\Delområden\Norsälven\GISdata_ext\08_kon
LM	Norsälven, vatten, fastighetskartan, vektor	Vattenmask för avgränsning av resultatgrid, <i>norsalven_lm_vatten.shp</i>	P:\Skredriskartering 2013-2015\Delområden\Norsälven\GISdata_ext\01_lm

För SMHI's hydrodynamiska modell (Figur 1) valdes botten-skjuvspänning (*bed shear stress*) för flödet $Q=300 \text{ m}^3/\text{s}$. Dessa data är uppdelade i 3 delområden Fryken, Fryken-Edsvalla och Edsvalla-Vänern och har en cellstorlek på $5 \times 5 \text{ m}$ (ca 3 milj celler). Data från backscatter-mätningar (Figur 2) finns i upplösningen $0.5 \times 0.5 \text{ m}$ och täcker hela Norsälvens studieområde i en enda fil (ca 65 milj celler). Aktuell vektordata (vatten, berg fr. seismik) används för maskning i slutskedet. Alla data använder referenssystem SWEREF 99TM.



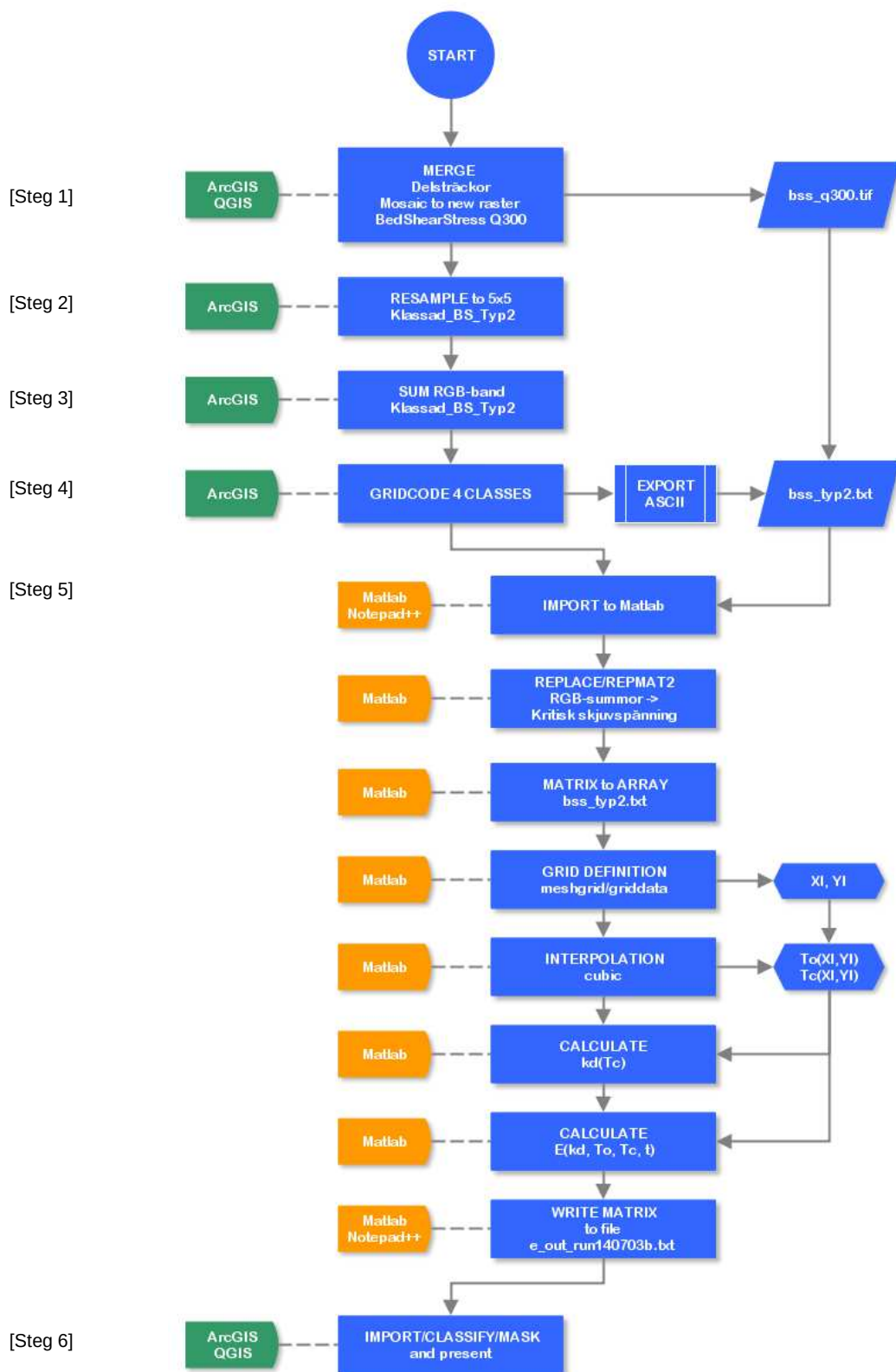
Figur 1. Utsnitt av botten-skjuvspänning för delområdet Fryken (färgkarta blå-gul-röd, intervall <0.10 till $>2.00 \text{ Pa}$, 1Fryk_GRID_BedShearStress_Q300m3s.tif).



Figur 2: Utsnitt av tolkad backscatter data (*Klassad_BS_SR99TM_Typ2.tif*) i 4 klasser, grå (siltig lera, siLe), gul (sandig silt, saSi), orange (siltig sand, siSa) och röd (grus, sten, berg). Ovanpå ligger vektordata som representerar berg (cyan, *norsalven_mma_Berg fr seismik.shp*). Infälld detaljbild visar på detaljeringsgrad och synliga strukturer i ekot (sandig silt/siltig lera).

Flödesschema för beredande av data och beräkningar

Erosionsberäkningen innehåller ett antal steg för att förbereda data, anpassa GRID (rutnätssystem) och utföra själva beräkningen enligt Ekvation 1. Figur 3 ger en översiktlig bild av de olika momenten, filer, variabler och verktyg som beskrivs under rubrikerna **Steg 1** t.o.m. **Steg 6**.



Figur 3. Förenklat flödesschema för de ingående momenten (blå) och de verktyg (grön/orange) som använts i de olika beräkningsstegen.

Steg 1: ArcGIS

Förbered SMHI's skjuvspänningsmodellering för hela älven genom att slå ihop de endskilda delområdena
 Verktyg: ► Data management ► Raster ► Raster Dataset ► Mosaic to New Raster:

Output file:	<i>bss_q300.tif</i>
Spatial reference:	SWEREF99TM
Number of Bands:	1
Pixel Type:	32_BIT_FLOAT
Mosaic colormap mode:	REJECT

Filen *bss_q300.tif* är färdig för direktimport till Matlab (obs Excel fungerar ej att titta/kontrollera i, för stora data – använd Notepad++).

Steg 2: ArcGIS

Resampla backscatter data (Klassad_BS_SR99TM_Typ2.tif) till 5x5m.

Verktyg: ► Data management ► Raster ► Raster Processing ► Resample:

Output file:	<i>bss_typ2_5x5.tif</i>
Output cell size:	5
Resampling technique:	MAJORITY

Steg 3: ArcGIS

Pixelvärdena i backscatterdatan representerar inga "riktiga" värden utan är av typen RGB med 3 band. För att klassa dessa summeras banden till ett nytt raster med 4 "riktiga" klasser. Summeringen måste genomföras i två steg eftersom vi arbetar med 3 Band (temporära filer skapas). Tabell 2 beskriver de färger som valts för respektive bottengeologi och de motsvarande RGB- värdena samt summan och värde på kritisk skjuvspänning, τ_c .

Tabell 2. Klasstilldelning från 3 band RGB till unika klasser för kritisk skjuvspänning

Klass (dB-range)	Tolkad BS Jordartsbest.	Färgkod i GIS	R	G	B	Summa	Kritisk Skjuvspänning (Pa)
0-54	Siltig lera (siLe)	GRÅ	128	128	128	384	0.26
54-65	Sandig silt (saSi)	GUL	255	255	0	510	0.21
65-87	Siltig sand (siSa)	ORANGE	255	128	0	383	0.14
87-120	Grus, sten, berg	RÖD	255	0	0	255	5.00
		NODATA	255	255	255	765	NaN

Verktyg: ► Spatial analyst tools ► Math ► Plus

Steg 4: ArcGIS

Klassning av summan av RGB-koderna ger 5 kategorier (384, 510, 383, 255 och 765). Exportera rasterfil till ASCII, *bss_typ2.txt*, för import till Matlab.

Verktyg: ► Conversion Tools ► From Raster ► Raster to ASCII

Steg 5: Matlab

Importera och utför beräkningarna med scriptet *calc_erosion.m* i Matlab (kod och kommentarer, Bilaga 1). Exekveringen tar ca 70 s och genererar en textfil *_E_.txt* med storleken ~16 Mb.

Steg 6: ArcGIS

Konvertera ASCII-filen *_E_.txt* till raster i ArcGIS:

Verktyg: ► Conversion tools ► to Raster ► ASCII to Raster:

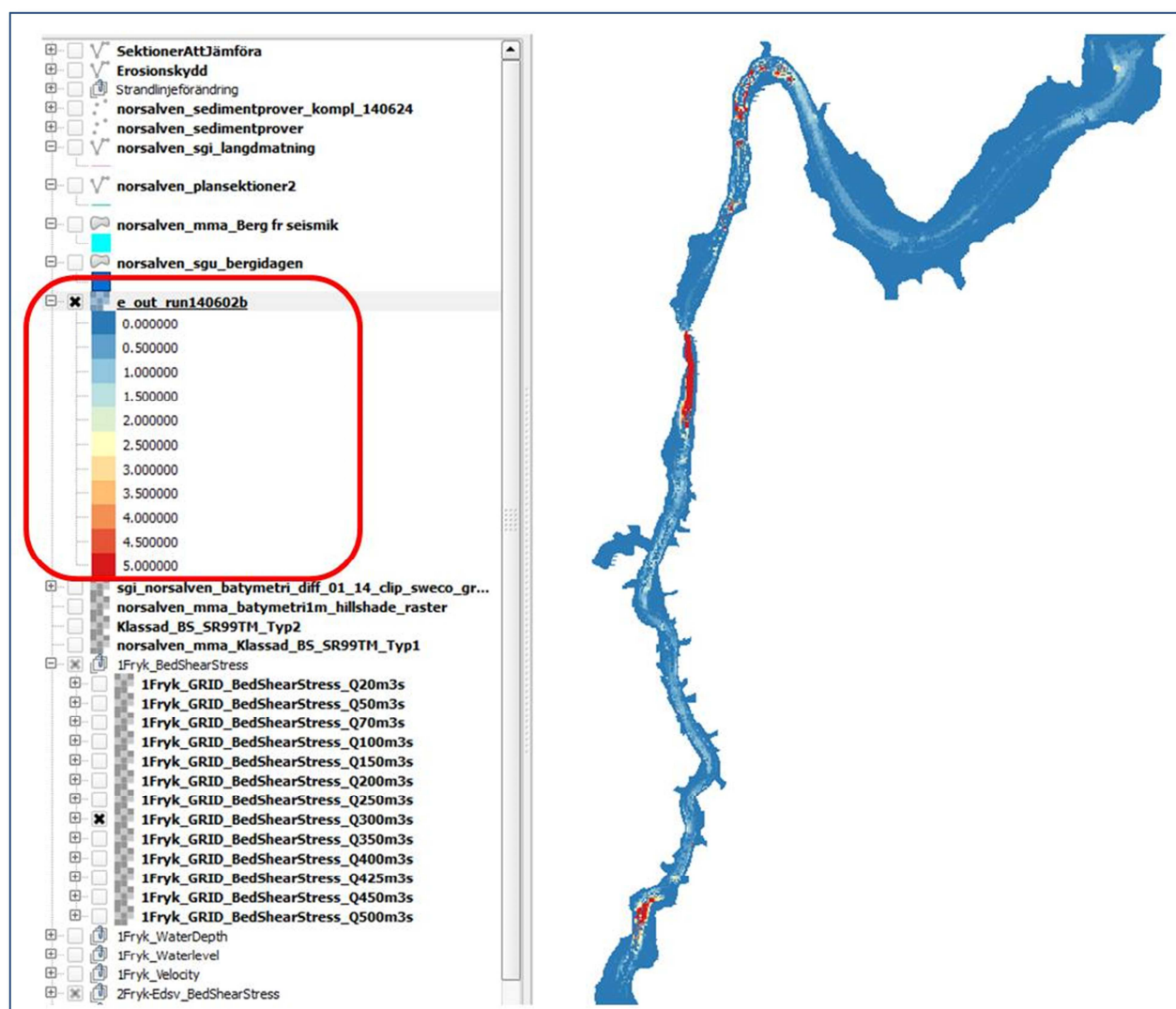
Output file:	<i>e_out.tif</i>
Output data type:	FLOAT

Klipp *e_out.tif* med vatten, *norsalven_lm_vatten.shp*, och maska bottenerosionen med *norsalven_mma_Berg fr seismik.shp*.

Verktyg: ► Data management ► Raster ► Raster Processing ► clip:

Output file: *e_out_run140703b.tif*
Output extent: *norsalven_lm_vatten.shp*
Use input features for clipping geometry: Yes

Symbolsätt genom att klassa önskade intervall. Erosionen presenteras (för tillfället) i QGIS (15088_Arbetsyta *Erosion_gungor.qgs*) med intervallet 0-5 m (färgkarta blå-gul-röd). Eventuella outliers kan filtreras genom en enkel efterprocessering (detta har inte gjorts). Exempel på resultat i Figur 4.



Figur 4. Resultatet av erosionsberäkningen presenterar (efter maskning) ca 50 000 punkter med följande statistik: max: 54.58 (bara ca 20 värden är >20, min: -2.89, medel: 0.27, standardavvikelse: 1.81.



PM

Datum

2014-07-04

Diariennr

1.1-1305-0367

Bilaga 1 – Matlab kod

```
%=====
% calc_erosion.m
% Matlab script to calculate erosion, E:
%   E=kd(To-Tc)dt
% where
%   kd=10^-7*Tc^-0.5 and dT=12960000s
% and To and Tc are spatially distributed data:
%   To: Bed shear stress (SMHI, Hydrodyn modell)
%   Tc: Critical bed shear stress (Norconsult, backscatter data, interpreted)
% This scrip uses repmat2.m and writes the result to file _E_.txt
%
% Author: Jim Hedfors, SGI, KA-anslaget 2014
%=====

[IN,MAP]=imread('bs_q300.tif','tif'); % Import BedShearStress data
IN_clean=repmat2(IN,'<',0,-1); % Replace zeros with -1
T0=flipud(IN_clean); % Flip Matrix to fit coordinate sys
cols=1579; % Matrix definition header, cols
rows=4086; % Matrix definition header, rows
xll=396400; % Matrix def. header, X lower left
yll=6581900; % Matrix def. header, Y lower left
cs=5; % Matrix definition header, Cellsize
% -- Create GRID in workspace -----
n=0;
for i=1:rows
    Y(i,1:cols)=yll+n*cs;
    n=n+1;
end
n=0;
for i=1:cols
    X(1:rows,i)=xll+n*cs;
    n=n+1;
end
% -- Create array of x/y -----
n=0;k=0;
xxx=xll:cs:xll+((cols-1)*cs);
yyy=yll:cs:yll+((rows-1)*cs);
for i=1:length(yyy)
    for j=1:length(xxx)
        n=n+1;
        XX(n)=xxx(j);
        YY(n)=yyy(i);
        T00(n)=T0(i,j);
    end
end
% -- remove -1, keep >0 -----
[a,b]=find(T00>-1);
T02=T00(b);
XX2=XX(b);
YY2=YY(b);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```



PM

Datum

2014-07-04

Diariennr

1.1-1305-0367

```
load BS_Typ2_5x5_data; % Import Backscatter data
Tc=flipud(BS_Typ2_5x5); % Flip Matrix to fit coordinate sys
Tc= repmat2(Tc, 'i', 765, NaN); % Set RGB-sum to critical shear stress values
Tc= repmat2(Tc, 'i', 384, 0.26);
Tc= repmat2(Tc, 'i', 510, 0.21);
Tc= repmat2(Tc, 'i', 383, 0.14);
Tc= repmat2(Tc, 'i', 255, 5);
% -- Form X,Y coordinates according to header definition -----
ncols=1556;
nrows=4178;
xllcorner=396756;
yllcorner=6581889;
cellsize=5;
n=0;k=0;
x=xllcorner:cellsize:xllcorner+((ncols-1)*cellsize);
y=yllcorner:cellsize:yllcorner+((nrows-1)*cellsize);
for i=1:length(y)
    for j=1:length(x)
        n=n+1;
        xx(n)=x(j);
        yy(n)=y(i);
        TC(n)=Tc(i,j);
    end
end

% -- Remove 765, keep RGB -----
[a,b]=find(TC<765);
TC2=TC(b);
X2=xx(b);
Y2=yy(b);
% -- Create meshgrid and interpolate both datasets to fit the box -----
[XI,YI]=meshgrid(396400:10:396400+1579*5,6581900:10:6581900+4086*5);
TC2=griddata(X2,Y2,TC2,XI,YI);
To2=griddata(XX2,YY2,double(T02),XI,YI);

% -- Perform the computations according to equation (2) and (1) -----
kd=(10^(-7)).*Tc2.^(-0.5); % Equation (2)
E=kd.*(To2-TC2).*12960000; % Equation (1)
EE= repmat2(E, 'is', NaN, -9999); % Clean up NODATA values
E_out=flipud(EE); % Flip Matrix for output to GIS

% -- Write results to file -----
fid=fopen('_E_.txt','w');
fprintf(fid,'%14s %8.0f \n','ncols',size(E_out,2));
fprintf(fid,'%14s %8.0f \n','nrows',size(E_out,1));
fprintf(fid,'%14s %8.0f \n','xllcorner',396400);
fprintf(fid,'%14s %8.0f \n','yllcorner',6581900);
fprintf(fid,'%14s %8.0f \n','cellsize',10);
fprintf(fid,'%14s %8.0f \n','NODATA_value',-9999);
for i=1:size(E_out,1)
    fprintf(fid,'%5.3f \t',E_out(i,:));
    fprintf(fid,'\n');
end
fclose(fid);
% -- EOF -----
```



PM

Datum
2014-07-04

Diariennr
1.1-1305-0367

```
% -----  
% function repmat2.m for conditional matrix manipulation  
% Author: Jim Hedfors, SGI 2014  
% -----  
function out=repmat2(in,condition,old,new)  
out=in;  
switch condition  
case '='  
    clear b1 b2 ll  
    [b1,b2]=find(in==old);  
    if ~isempty(b1)  
        ll=length(b1);  
        for hh=1:ll  
            out(b1(hh),b2(hh))=new;  
        end  
    end  
case '>'  
    clear b1 b2 ll  
    [b1,b2]=find(in>old);  
    if ~isempty(b1)  
        ll=length(b1);  
        for hh=1:ll  
            out(b1(hh),b2(hh))=new;  
        end  
    end  
case '<'  
    clear b1 b2 ll  
    [b1,b2]=find(in<old);  
    if ~isempty(b1)  
        ll=length(b1);  
        for hh=1:ll  
            out(b1(hh),b2(hh))=new;  
        end  
    end  
case 'is'  
    clear b1 b2 ll  
    [b1,b2]=find(isnan(in));  
    if ~isempty(b1)  
        ll=length(b1);  
        for hh=1:ll  
            out(b1(hh),b2(hh))=new;  
        end  
    end  
end  
end  
% -- EOF -----
```

Bilaga 5

PM Diakronisk analys av Norsälvens stränder



PM

Datum

Mars 2014

Diariernr

1.1-1305-0367

Avsändare

Godefroid Ndayikengurukiye

Mottagare

SGI, Gunnel Göransson

Uppdragsnr

15088

Diakronisk analys längs Norsälven stränder – Studier av ortofoton från åren 1965 och 2013

Syfte:

För att kunna studera stranderosion längs ett vattendrag behöver man veta var erosion förekommit under de senaste åren. Denna information erhålls igenom att jämföra strandlinjen vid minst två olika år och ange områden där strandlinjen har förändrats. På så sätt går det att se förändringar i strandlinjen och välja ut speciella områden för att fortsätta beräkningar.

Metodiken:

Lantmäteriet har börjat skanna alla pappersbilder till digitala kopior och ortofoton. För Norsälven har SGI fått ta del av 12 ortofoton från år 1965 och 3 ortofoton från år 1966 för att täcka hela undersökningsområdet. Bilderna samlades till en enkel ortomosaik. Med lodbilder (färgbilder och infraröda bilder) från 2008-2013 har Lantmäteriet gjort ett ortofoto som nu kan visas som en WMS-tjänst. Fotomosaiken, Ortofototjänsten och Lantmäteriets översiktskarta, har använts som arbetsunderlag.

1. Första steget i analysen var att lagra över alla underlag och analysera dem visuellt med hjälp av "Swipe-funktionen" i ArcGIS och upptäcka var stora skillnader i strandlinjen förekommer. En jämförelse med Lantmäteriets översiktskarta har också gjorts och denna visade att kartan verkar generaliserad ibland (oklart varför, möjligen på grund av skalan).



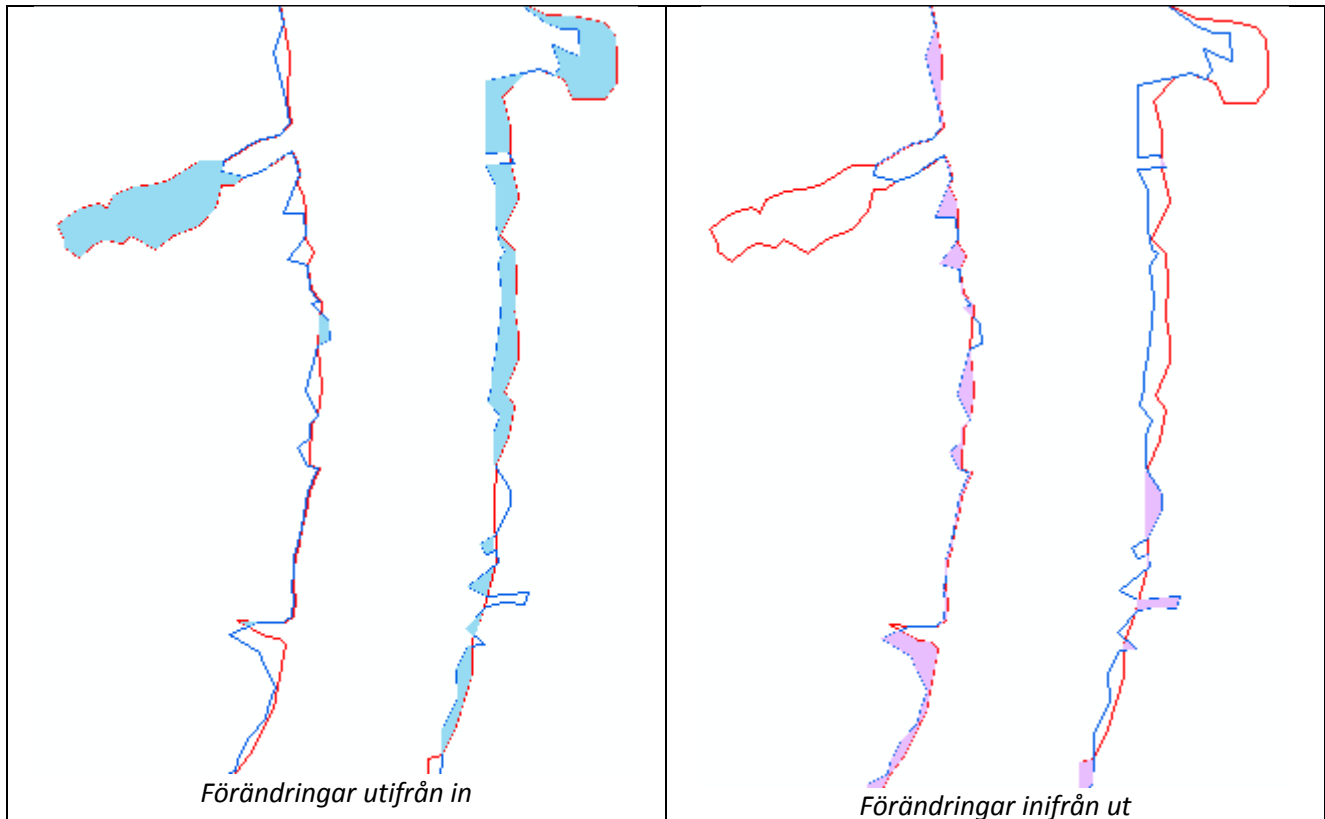
2. Andra steget i analyser var att extrahera strandlinjen från 1965 genom att skärmdigitalisera hela vattendraget som en polygon. En stor skala på 1:1 000 på gamla bilder tillåter en hög noggrannhet. Resultatet blir en strandlinje vid år 1965 i form av en polygon över hela vattendraget.



3. Tredje steget i analysen var att extrahera strandlinjen på nya bilder. Med färgbilder går det att zooma in till mer än 1:1 000. Med de infraröda färgbilderna går det att särskilja vegetationen med vatten och mark. Vegetationen blir rödfärgad och vatten blir mörk. Här igen blev resultatet en ny polygon som strandlinje vid år 2013 över hela vattendraget.



4. En jämförelse mellan de två vattenytorna visade att i vissa områden hade strandlinjen förskjutits upp till ett par tiotal meter i ena eller andra inriktning. En GIS-operation som gör en dubbel differens mellan de olika strandlinjerna ger två multipolygoner, en per förskjutning.



5. De två sista GIS-operationerna i analyser var att separera alla små polygoner så att varje förändring kan analyseras var för sig. Därefter beräknas arealen på varje enskild polygon.

Shape *	OBJECTID *	Areal_kvm
Polygon	375	46947,27
Polygon	290	12727,42
Polygon	230	7569,44
Polygon	289	7108,115
Polygon	531	4911,316
Polygon	293	4477,85
Polygon	584	4465,972
Polygon	1	3895,128

Resultat :

Alla arbetsunderlag är sparade i mappen "Diakroni".

- Arbetsfil (MXD)
- Ortofoto 2013 (Lyrfil från LMs WMS)
- Denna textfilen



PM

Datum

Mars 2014

Diarienumr

1.1-1305-0367

- En GDB databas som innehåller de följande lager (de även står lösa):
- Strandlinjer 1965/6 och 2013 (2st shapefiler)
- Förändringar i strandlinjer (2st shapefiler)
- Ortomosaikbilden 1965/6 (1st tiled TIF)



Statens geotekniska institut

Postadress: 581 93 Linköping

Tel: 013-20 18 00

E-post: sgi@swedgeo.se

www.swedgeo.se
