

# Erosion och sedimentation i jordbruksdiken modellerade med HEC-RAS

Erosion and sedimentation in agricultural  
ditches modelled using HEC-RAS

---

Josef Nordlund



# Referat

Erosion och sedimentation i jordbruksdiken modellerade med HEC-RAS

*Josef Nordlund*

Läckage av näringsämnet fosfor från åkermark har på senare år blivit mer uppmärksammat av forskare och ses som en bidragande orsak till övergödningen av Östersjön. En stor del av den fosfor som transporteras gör det som partikelbunden fosfor. Fosfor är då främst bunden till lerpartiklar. Materialtransporten som sker i jordbruksdiken är därför en viktig komponent vad gäller läckage av fosfor. Syftet med det här arbetet var att undersöka vilka modellparametrar som påverkar erosion av lerpartiklar samt om modellverktyget HEC-RAS är användbart för modellering av erosion och sedimentation i jordbruksdiken. Det har uppnåtts genom att utifrån testområdet Hestadbäcken, konstruera ett vattendrag i HEC-RAS. Inmätning av geometri och jordprovtagningar har utförts för att kunna efterlikna vattendragets egenskaper. Därefter har simuleringar gjorts och jämförts med befintliga data för materialtransport inom avrinningsområdet.

De data som funnits för kalibrering och upprättande av randvillkor har varken varit tillräckligt omfattande eller exakta för att kunna säkerställa modellens trovärdighet. Bristen på sediment- och erosionsdata har gjort att huvudsakligen suspenderat material har betraktats som ett mått på hur mycket material som är i rörelse i bäcken. Resultaten visar att modellkörningarna ger en avvikelse från kalibreringsdata vid stora transporter av suspenderat material. Om det beror på brister i modellverktyget kan inte säkerställas då kalibreringsdata inte är tillräckligt säkra. Störst inverkan på resultatet har Mannings tal (skrovlighetskoefficient,  $n$ ). Det är också den parameter som är svårast att bestämma i ett naturligt vattendrag. Med reservation för bristande data för utvärdering av modellen verkar körningarna ge en realistisk bild av variationer av suspenderat material i Hestadbäcken. Detta gör att man kan uppskatta variationer av partikelbunden fosfor i det avrinnande vattnet utifrån modellkörningarna då partikelbunden fosfor varierar på samma sätt som suspenderat material. Den framtida användningen av HEC-RAS erosionsmodul för finkorniga sediment kommer antagligen att begränsas till områden där man har provtagning av mycket hög kvalitet och/eller specifikt undersökt de kohesiva parametrarna i modellen, vilket kräver försök som endast kan utföras av ett fåtal laboratorier.

Nyckelord: Näringsläckage, erosion, fosfor, HEC-RAS,

# Abstract

Erosion and sedimentation in agricultural ditches modelled using HEC-RAS

*Josef Nordlund*

Seepage of phosphorus from cultivated fields has been the focus of much attention from researchers in recent years and is seen as a contributing factor to the eutrophication of the Baltic Sea. Much of the transported phosphorus arrives as particle-bound phosphorus, attached to the small particles of clay. Sediment transports in agricultural ditches are therefore an important component in the process of phosphorus seepage. The purpose of the study was to examine the model parameters that influence erosion of clay particles and to determine if the modeling tool HEC-RAS is useful for modeling of erosion and sedimentation in agricultural ditches. The work was carried out by constructing a ditch in HEC-RAS in order to simulate the test area Hestadbäcken. Measurements of the ditch's geometry and soil sampling were conducted to simulate the ditch features. The simulation results were compared with existing data for sediment transports within the runoff area.

The data that existed for calibration and establishment of boundary conditions was not sufficiently extensive or precise to validate the model's credibility. Due to lack of sediment and erosion data, suspended material was mainly used as a measure of the amount of sediment moving in the ditch. It turned out that the modeling results give a deviation from the calibration data for large transports of suspended materials. It cannot be determined if this is a shortcoming of the modeling tool since the calibration data is not sufficiently reliable. The parameter that has the greatest impact on the result is Mannings roughness coefficient,  $n$ . It is also the parameter that is most difficult to determine in a natural ditch. With reservations for the lack of data for the evaluation of the modeling results, the model seems to provide a realistic picture of variation of suspended material in Hestadbäcken. This makes it possible to estimate the variations of particle-bound phosphorus in the runoff water from modeling results because of the fact that the particle-bound phosphorus varies in the same way as suspended material. The future use of HEC-RAS erosion modulus of fine-grained sediment will probably be limited to areas where you have samples of very high quality and / or specifically examined the cohesive parameters of the model, which requires experiments that can be performed only by a few laboratories.

Keyword: Nutrient leaching, erosion, phosphorus, HEC-RAS

## **Förord**

Examensarbetet har initierats av Per Lindmark och Carl-Johan Rangsjö på Jordbruksverkets Vattenenhet i Linköping.

Per Lindmark har varit handledare samt varit med och utfört inmätningar och sedimentprovtagningar i Hestadbäcken.

Ämnesgranskare har varit Lars-Christer Lundin och examinator Allan Rodhe.

Tack till Johan Malgeryd på Jordbruksverket, Länsstyrelsen i Linköping genom Anuschka Heeb, Johan Strömquist på SMHI samt Barbro Ulén, Faruk Djodic och Katarina Kyllmar på SLU för hjälp med data från Rytta-backen samt övrig information. Ett stort tack även till Hubert Gelin, Hestad Gård, för information om Hestadbäckens historia.

Josef Nordlund  
Uppsala, mars 2011

Copyright © Josef Nordlund och Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala universitet.

UPTEC W11006, ISSN 1401-5765

Tryckt hos Institutionen för geovetenskaper, Geotryckeriet, Uppsala universitet, Uppsala 2011

## Populärvetenskaplig sammanfattning

De flesta forskare är idag överens om att fosfor är det näringsämne som är tillväxtbegränsande i Bottenviken samt i de inre delarna av kust och skärgård. Med det menas att fosfor är det ämne som vid onormal tillförsel har störst påverkan på tillväxten av växter och djur i Östersjön. En onormal tillförsel av det begränsande näringsämnet kan leda till att ekosystemet kommer ur balans. Reningsverkens avloppsvatten har länge varit den källa som stått för den största delen mänskligt fosforutsläpp i Östersjön. På senare år har reningsverken dock utvecklats och den källa som forskare istället uppmärksammas mer är fosforläckagen från jordbruksmark. Fosfor ingår i handelsgödsel och stallgödsel som lantbrukarna tillför sina jordbruksmarker för att få en ökad produktion av grödor.

År 2006 startades projektet Greppa fosfor för att ta fram ett arbetssätt för att på ett effektivt sätt minimera förlusterna av fosfor från jordbruksmark. Befintlig kunskap om fosforförluster har sedan dess kartlagts och ny forskning har påbörjats för att arbeta fram metoder för att minska förlusterna. Det har kunnat konstateras att en stor del av den fosfor som lämnar jordbruksmark gör det som partikelbunden fosfor, vilket innebär att fosfor då är bunden till lerpartiklar. Om man kan kartlägga transporten av lerpartiklar i jordbruksdiken kan man få en uppfattning om hur fosfor transporteras i diket. Ett av de försöksområden som Greppa fosfor använder sig av vid studier av fosforförluster är Hestadbäcken i Östergötland. Området består till största delen av åkermark och jordarten utgörs till stor del av lera. Inom försöksområdet har en rad provtagningar utförts av bl.a. Jordbruksverket, SLU<sup>1</sup>, SMHI<sup>2</sup> och Linköpings universitet.

Jordmaterialtransport är en naturlig förändringsprocess i landskapet som är ständigt pågående. Förändringarna kan antingen ske genom erosion, då jordmaterial lösgörs och transporteras eller genom sedimentation då jordmaterialet deponeras. I diken och andra vattendrag orsakas erosion främst av strömmande vatten och is. Strömmande vatten påverkar botten och slänter så att materialet lösgörs, transporteras och avlagras längre ned i vattendraget. Förutom att det kan påverka stabiliteten i slänter kan det i jordbruksdiken alltså leda till förluster av näringsämnen, som fosfor.

Syftet med detta examensarbete har varit att studera vilka modellparametrar som påverkar erosion av lerpartiklar samt att undersöka om modellverktyget HEC-RAS<sup>3</sup> är användbart för att modellera erosion och sedimentation i jordbruksdiken. HEC-RAS är en dynamisk modell som är utvecklad av den amerikanska armén.

För att testa ett modellverktygs funktion krävs data för upprättande av en modell, samt kalibreringsdata att jämföras resultat mot. Tillvägagångssättet har varit att skapa en modell för att efterlikna Greppa fosfors försöksområde Hestadbäcken. Sedan har jämförelser gjorts mellan modellresultat och verkliga skeden i Hestadbäcken. För att skapa modellen utfördes mätningar av bäckens geometri. Bäckens tvärsektioner och lutning bestämdes genom mätningar på plats och växtligheten noterades för att kunna göra uppskattningar av friktionsmotståndet i vattendraget. I modellverktyget måste även kornstorleksfördelning i bottenmaterialet anges. Denna bestämdes utifrån jordprover som togs i bäckens bottenmaterial.

---

<sup>1</sup> Sveriges Lantbruksuniversitet

<sup>2</sup> Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut

<sup>3</sup> Hydrologic Engineering Center's River Analysis System

Det visade sig under arbetets gång att det inte skulle finnas tillräckligt med data för att testa modellverktyget fullt ut. Förhoppningarna var att kunna studera modellens förmåga att simulera erosion och sedimentation på specifika platser i bäcken. Det visade sig att detta inte var möjligt då kalibreringsdata för en sådan modellering inte fanns tillgänglig. Istället lades fokus på att studera transport av suspenderat material i bäcken, vilket är en benämning för det material som är kringsvävande i vatten. Lerpartiklar transporteras i suspenderat material till skillnad från större partiklar som både kan vara i suspensionen eller rulla längs vattendragets botten. Det suspenderade materialet kan mätas genom att ta vattenprover och analysera dess innehåll. Detta ger ett mått på hur mycket finkornigt material som är i rörelse i vattendraget. Suspenderat material är uppmätt i Hestadbäcken och enligt provtagningar så varierar suspenderat material på samma sätt som partikelbunden fosfor vilket gör att det ger en bra bild av fosfortransporterna.

När modellen skapats utifrån inmätningarna återstod bestämning av ett antal parametrar som inte var möjliga att mäta. Dessa parametrar bestämdes utifrån beräkningar baserade på litteratur från tidigare liknande försök.

Resultaten visade att utifrån modellkörningarna varierade transporterat material på samma sätt som uppmätt suspenderat material i Hestadbäcken men de höga topparna uteblir i modellkörningarna. Förklaringar till detta kan dels vara brister vid upprättande av modellen men också brister vid provtagningar för kalibreringsdata.

De faktorer som har störst påverkan på materialtransporten i ett jordbruksdike är först och främst friktionsförlusterna där växtligheten har en stor påverkan. En annan faktor som har stor påverkan är bottenmaterialets egenskaper. I ett jordbruksdike är bottenmaterialets egenskaper komplicerade då lerpartiklar har kohesiva, sammanhållande krafter som är svåra att bestämma. Parametrarna för friktionsförluster och de kohesiva egenskaperna i modellen är svåra att bestämma samtidigt som de har stor inverkan på modellresultatet.

Med reservation för bristande data för utvärdering av modellen verkar körningarna ge en realistisk bild av variationer av suspenderat material i Hestadbäcken. Detta gör att man kan uppskatta variationer av partikelbunden fosfor i det avrinnande vattnet utifrån modellkörningarna då partikelbunden fosfor varierar på samma sätt som suspenderat material. Den framtida användningen av modellverktyget HEC-RAS för modellering av materialtransport i jordbruksdiken kommer antagligen att begränsas till områden där man har provtagning av mycket hög kvalitet.

# Innehållsförteckning

1 Inledning.....	1
2 Bakgrund .....	3
2.1 Problembeskrivning – materialtransport .....	3
2.2 Faktorer som påverkar materialtransport .....	3
2.2.1 Granulära jordar.....	4
2.2.2 Kohesiva jordar.....	4
2.3 Erosion av näringsämnen .....	4
3 Metoder och material .....	6
3.1 Områdesbeskrivning - Hestadbäcken.....	6
3.2 Vattenflöden och årstransporter i området. ....	6
3.3 Modellverktyget HEC-RAS .....	9
3.3.1 Uppbyggnad .....	9
3.4 Den hydrauliska modellen HEC-RAS HESTAD.....	10
3.4.1 Geometrisk data .....	10
3.4.2 Tvärsektiondata – inmätning.....	10
3.4.3 Flödesdata .....	11
3.4.4 Partikeldata .....	12
3.4.5 Sedimentation och erosionsdata.....	13
3.4.6 Metodik för bestämning av kritisk skärspänning och erosionshastighetskonstant .....	16
3.5 Provtagningar .....	17
3.6 Data för kalibrering .....	18
4 Resultat och observationer .....	19
4.1 Kalibrering .....	19
4.2 Känslighetsanalys.....	20
4.3 Förändring av geometrin .....	21
5 Diskussion .....	23
6 Slutsatser .....	27
Referenser.....	28
Appendix 1 .....	30



# 1 Inledning

För att växter skall kunna tillväxa och ett ekosystem skall kunna vara i balans behövs det rätt kombinationer av näringsämnen. Man brukar beskriva denna balans i ett havsekosystem med hjälp av kväve/fosfor-kvoten, då det är kväve och fosfor som är de viktigaste näringsämnena i havet. Kvoten uttrycker förhållandet mellan kväve- och fosforkoncentrationerna i ekosystemet. Då en tillförsel sker av något av dessa näringsämnen förskjuts förhållandet vilket gör att vissa arter som har näringsämnena som begränsande kan tillväxa medan andra arter blir utkonkurrerade. Det har debatterats om vilket näringsämne som bestämmer produktionen i Östersjön men de flesta forskarna anser idag att det är fosfor som är tillväxtbegränsande i Bottnenviken samt de inre delarna av kust och skärgården och kväve som är begränsande längre ut mot öppet hav (Länsstyrelsen i Stockholms län, 2005). Detta gör att en högre tillförsel av fosfor till Östersjön ökar tillväxten av växtplankton och alger i de kustnära områdena. Den ökade tillväxten gör att siktdjupet minskar och mindre ljus kan nå ner till botten. När sedan organismerna dör och faller ner till botten krävs mycket syre till nedbrytning vilket leder till att syrebrist kan uppstå vid dåligt vattenutbyte mellan hypolimnion och epilimnion (övre och undre skikten). Dessa processer leder sedan till att bottenlevande djur som inte kan förflytta sig dör. Sedimenten på botten kan avge ammonium och fosfor vid syrebrist, vilket kan stiga och bidra till ytterligare övergödning i hypolimnion (SMHI, 2009).

Människans aktiviteter är en bidragande orsak till ökad tillförsel av fosfor. Avloppsvatten och jordbruk är de två största bidragande orsakerna till denna tillförsel (Havet.nu, 2010). Utsläppen från reningsverk och industrier har berott på dålig rening av avloppsvatten medan jordbrukets påverkan till stor del har berott på att handelsgödsel och stallgödsel läckt ut till angränsande vattendrag. Reningsverken har dock utvecklats allt mer och forskare har på senare år börjat uppmärksamma fosforförlusterna från jordbruksmark allt mer.

Jordbruksverket bedriver tillsammans med Länsstyrelser, rådgivare och lantbrukare delprojektet Greppa fosfor. Projektet är en del i ett större projekt som heter Greppa näringen. Delprojektet startades 2006, då övergödningen och algbloomingar i Östersjön stått i fokus under några år. En tillsatt expertgrupp undersökte effekterna av kväve och fosfor och kom fram till rekommendationen att minska tillförseln av fosfor till Östersjön. En av åtgärderna som Naturvårdsverket, tillsammans med 15 andra myndigheter, föreslog var då att starta pilotprojektet Greppa fosfor för att testa åtgärder mot fosforförluster i praktiken. Delprojektets mål är att utveckla ett arbetssätt för att på effektivast sätt minska fosforförlusterna från jordbruket inom ett avrinningsområde (Malgeryd m.fl., 2010). Sedan projektet startade har det påbörjats en hel del ny forskning samt sammanställts befintligt material vad gäller fosfor och fosforförluster från jordbruksmark. SLU (Ulén m. fl., 2008) och Jordbruksverket (Malgeryd m.fl., 2008) har gett ut rapporter med en översiktlig presentation av tänkbara åtgärder mot fosforförlusterna. Förlusterna av fosfor är i genomsnitt 0,4 kg per hektar och år. Variationen är stor och ligger mellan 0,003 och 1,8 kg per hektar. Denna förlust beror på en borttransport av fosfor som kan ske i olika former. Det kan ske antingen i stora aggregat, organiska föreningar, fina lerpartiklar och kolloider eller i löst form som ortofosfater. Det är viktigt att veta i vilken form förlusterna av fosfor sker för att kunna välja rätt metoder för att undvika denna förlust.

Matjorden i svensk åkermark innehåller i genomsnitt 2000 kg fosfor per hektar. Om man jämför åkermarkens totala fosforinnehåll och de mängder som tillförs och bortförs från åkermark med skörden är förlusterna relativt små. De är dock tillräckliga för att orsaka problem i Östersjön samt många sjöar och vattendrag (Malgeryd m. fl., 2010).

En stor del av den fosfor som läcker ut från åkermark är bunden till små lerpartiklar, så kallad partikelbunden fosfor. Under intensiva regnperioder med höga vattenflöden kan dessa lerpartiklar lätt lösgöras från större partiklar och följa med vattenflödet ner i jordbruksdiken. Om de sedan följer med vattendraget kan partiklarna sedimentera längre ner i vattendragen eller i sjöar. Där kan fosfor bli växttillgänglig, vilket under vissa förutsättningar kan vara en bidragande orsak till övergödning.

Syftet med examensarbetet var att undersöka om modellverktyget HEC-RAS är användbart för modellering av materialtransport i ett jordbruksdike samt vilka modellparametrar som påverkar erosion av lerpartiklar. Hypotesen var att modellen kan ge möjlighet att uppskatta mängden partikelbundet fosfor som läcker ut från jordbruksdiken, vilket ger möjlighet att bedöma konsekvenser av eventuella förändringar av dikens utseende och hur dessa påverkar näringsläckaget. Som testavrinningsområde används ett av Greppa fosfor projektets testområden där omfattande provtagningar har utförts vilket innebär att det finns gott om data från detta avrinningsområde.

## 2 Bakgrund

### 2.1 Problembeskrivning – materialtransport

Jordmaterialtransport är en naturlig förändringsprocess i landskapet som är ständigt pågående. Förändringarna kan antingen ske genom erosion, då jordmaterial lösgörs och transporteras eller genom sedimentation då jordmaterialet deponeras. I diken och andra vattendrag orsakas erosion främst av strömmande vatten och is. Strömmande vatten påverkar botten och slänter så att materialet lösgörs, transporteras och avlagras längre ned i vattendraget. Förutom att det kan påverka stabiliteten i slänter kan det också leda till andra problem när det sker i jordbruksdiken. Det kan bidra till att näringsämnen, främst fosfor som i vissa former har förmågan att binda till jordpartiklar, läcker ut i vattendrag för att sedan sedimentera i andra delar av avrinningsområdet. Om näringsämnena där sedan blir biologiskt nedbrytbara kan det leda till övergödning i vattendrag och sjöar.

### 2.2 Faktorer som påverkar materialtransport

Det ytavrinnande vattnets förmåga att transportera jordpartiklar är beroende av ett antal faktorer. Den viktigaste är vattnets hastighet som i sin tur är beroende av flödets storlek. Flödet beror av tillrinningsområdets storlek och jordförhållanden. Även slutningens lutning och vegetation eller andra hinder påverkar vattnets hastighet (Ekologgruppen 2010).

Erosion uppstår när belastningen på en yta, från ett vätskeflöde, blir så stor att flödet tar med sig partiklar från ytan (Arulanandan och Heinzen, 1977). När jämvikt råder mellan uppslammad och avsatt mängd material på en viss sträcka är botten stabil ur erosionssynpunkt. Om det sker en nettoförlust av bottenmaterial är botten utsatt för erosion medan ett nettotillskott ger sedimentation. Begynnande erosion kallas det tillstånd som är gränsen mellan stabilitet och erosion. Den hastighet det strömmande vattnet har vid detta tillstånd kallas gränshastighet och den hastigheten ger upphov till den kritiska skärspänningen, vilket är den kraft som påverkar bottenmaterialet så att erosion startar (Handboken bygg, 1984).

Det finns olika grader av erosion beroende på vattenhastigheten. När erosionsprocessen börjar vid relativt låg vattenhastighet eroderar materialet först i form av partiklar som rullar och harsar längs botten. När sedan, vid något högre hastighet, turbulensen i vattnet förmår att lyfta upp och ta med sig eroderande partiklar, sker transport av suspenderat uppslammat material. Vid ännu högre hastigheter, då kraftig erosion sker, blir det svårt att särskilja den bottentransporterande fasen från den transport som sker i suspensionsform p.g.a. att materialhalten är så pass hög nära botten (Handboken bygg, 1984). Den sistnämnda graden av erosion brukar kallas masserosion.

Skärspänningen beror på fler faktorer än bara vattenhastigheten. Skärspänningen uttrycks i vattnets specifika vikt multiplicerat med hydrauliska radien och energilinjens lutning (Appendix 1). Mannings tal som ofta används som flödesmotstånd har stor inverkan på vattenståndet i ett naturligt dike. En ökning i Mannings tal kan ge stora förändringar i vattenhastighet. En sänkning i vattenhastighet ger ett större vattendjup och behöver därför inte betyda en minskad påverkan på bottenmaterialet då vattnets tyngd, samt hydrauliska radien ökar, vilket påverkar påfrestningen på bottenmaterialet.

### **2.2.1 Granulära jordar**

Kraftspelet som sker mellan det strömmande vattnet och den fasta bottenytan, då turbulent strömning sker och bottenmaterialet sätts i rörelse, är komplicerat. Krafterna beskrivs ofta med hjälp av medelskärspänningen som beräknas ur flödesdata. Det finns även en rad andra faktorer som påverkar bottenmaterialets stabilitet, som textur, densitet, packningsgrad samt bottenlutning (Handboken bygg, 1984). Det som i huvudsak motverkar erosion i jordar och håller kvar granulära jordpartiklarna är gravitationen. För erosion av jordpartiklar med mindre kornstorlek, som lera och silt, är det även andra faktorer som spelar in och gör processen mer komplicerat.

### **2.2.2 Kohesiva jordar**

I så kallade kohesionsjordar förekommer molekylära attraktionskrafter, i form av elektro-kemiska bindningar, mellan partiklarna. Dessa kohesionskrafter gör att partiklarna häftar samman med varandra och därmed motverkar erosion (Arulanandan och Heinzen, 1977).

Det finns ingen klar gräns mellan kohesivt och granulärt sediment. Generellt gäller att finare partiklar är mer kohesiva. Sediment mindre än 0,002 mm benämns som kohesiva medan sediment större än 0,06 mm benämns granulära. Silt som är mellan 0,002 mm och 0,06 mm är kohesivt beroende på dess lerinnehåll men även silt benämns ofta som kohesivt material då det ofta har kohesiva egenskaper. Då bottenmaterialet består av 10 % ler eller mer är det leran som styr erosionsförloppet (Huang m. fl., 2006). Silt och lerpartiklar transporteras i suspenderat material till skillnad från större partiklar som både kan vara i suspensionen eller rulla längs vattendragets botten (Axelsson, 2010). Det suspenderade materialet kan mätas genom att ta vattenprover och analysera dess innehåll. Detta ger ett mått på hur mycket finkornigt material som är i rörelse i vattendraget.

Det är väldigt komplicerat att avgöra hur starka de elektrokemiska krafterna är mellan kohesiva partiklar. Det beror på fler faktorer än bara materialets kornstorlek och lerinnehåll. Material som nyligen sedimenterat eroderas och återuppslammas av ganska svaga vattenströmmar. Om materialet istället får genomgå en kompaktionsprocess där vatten i utrymmen mellan partiklarna pressas ut så ökar de elektrokemiska bindningarna och samtidigt motståndskraften mot erosion. Därför är förutom kornstorleken även portalet (kvoten mellan porvolym och det fasta materialets volym) en betydelsefull parameter vid bedömning av motståndskraft mot erosion (Axelsson, 2010).

## **2.3 Erosion av näringsämnen**

Övergödningsproblemen i Östersjön har gjort att man på senare år har uppmärksammat fosforförlusterna från jordbruksmark allt mer. Den stora åtgärdssatsningen har sin grund i *Baltic Sea Action Plan* som innehåller avtal om åtgärder för Östersjön mellan länderna inom HELCOM<sup>4</sup>. Ett antal rapporter har skrivits som sammanfattar kunskapsläget i Sverige (Ekologgruppen, 2010).

I stort sett all löst fosfor kan direkt tas upp av växter medan den partikulärt bundna fosfor måste lösas upp innan den kan bli biologiskt tillgänglig. Den partikulära fosfor kan sedimentera i vattendrag och sjöar. Under vissa kemiska förhållanden eller genom resuspension kan denna fosfor långt senare bli tillgängligt för biologiskt upptag.

---

<sup>4</sup> Helsinki Commission. Ett samarbete mellan Danmark, Estland, Finland, Tyskland, Lettland, Litauen, Polen, Ryssland och Sverige för att skydda Östersjön

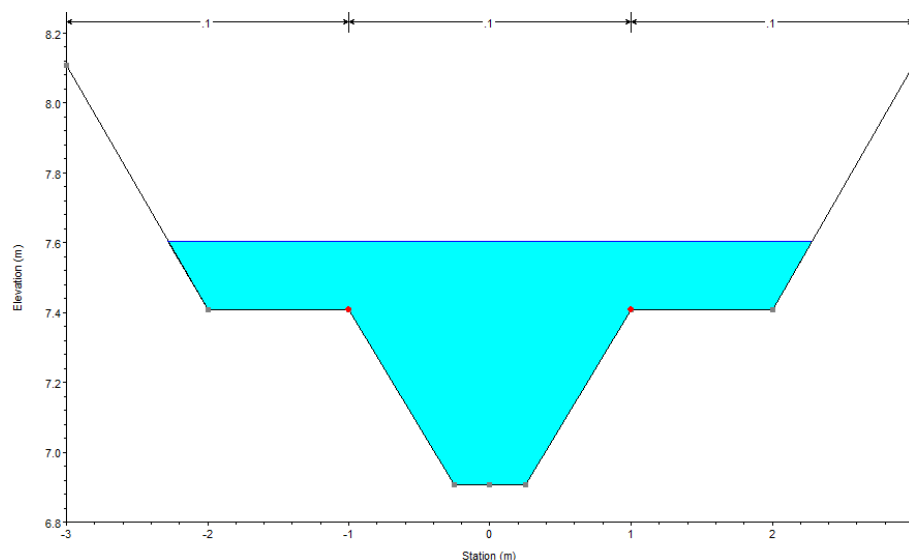
I jorden kan fosfor förekomma i tre olika former. Den största delen är den form som är kemiskt hårt bundet och därför otillgängligt för växterna. Fosfor kan förutom i denna form vara bunden i organisk form eller i liten utsträckning vara fäst på markpartiklar i jonform. Olika jordar har mycket varierande kapacitet att fästa och släppa ifrån sig fosfor. En mycket liten del förekommer även i löst form, ca 0,7 mg/l att jämföra med 6-8 mg/l som uppmätts som maxhalter i nygödslade jordar.

I vattnet kan fosfor förekomma som organiskt eller oorganiskt partikulärt bundet och som organiskt eller oorganiskt löst. Det finns också en mellanform som benämns fosfor bunden till mer eller mindre kolloidala partiklar. Dessa partiklar har väldigt långsam sedimentationshastighet. Vanligen påbörjas transporten av partikulärt bunden fosfor med hjälp av finkorniga lätta lerpartiklar och vissa organiska partiklar som kräver väldigt lite energi för att lösgöras och börja transporteras.

Fosfor kan transporteras till vattendrag via vinderosion, dräneringsvatten, ytavrinning, nederbörd, grundvatten och via punktkällor. Variationer av fosforhalten kan orsakas av interna processer i vattendraget. Det kan ske en ökning av halten genom bottenerosion, bankerosion och suspension medan minskning av halten kan ske genom sedimentation. Även andra biologiska och kemiska processer kan påverka fosforhalten både positivt och negativt. Då det på sommaren är lågvattenflöde sker en ansamling av fosfor i bottenbädden genom sedimentation, vilket gör att det senare på säsongen kan ske en ökning av fosforhalten på grund av resuspension av bottenmaterialet (Ulén, 2005).

### 2.3.1 Tvåstegsdike

Ett amerikanskt projekt har genomförts i Ohio under åren 2005-2007, där man har undersökt möjligheterna till att få bättre vattenkvalitet i jordbruksdiken genom så kallat tvåstegsdike (Miami conservancy district, 2010). Genom att skapa ett dike med avsatser kan lägre vattenhastigheter erhållas och sedimentation kommer att ske vid högre flöden jämfört med ett traditionellt v-format dike (figur 1). Projektresultat pekar på att en sådan konstruktion kan förbättra vattenkvaliteten genom att reducera transporten av sediment och näringsämnen som fosfor och kväve. Grästillsväxt på strandbankarna förväntas också öka dikets stabilitet och upptaget av näringsämnen. Viss minskning av kvävekoncentrationen i vattnet har kunnat utskiljas men projektet behöver mer tid innan man kan dra några faktiska slutsatser av försöket. Växtlighet och övrig anpassning till den nya dikesformen måste ske under ett antal år.



Figur 1 - Tvåstegsdike. Geometrin skapad i HEC-RAS

### 3 Metoder och material

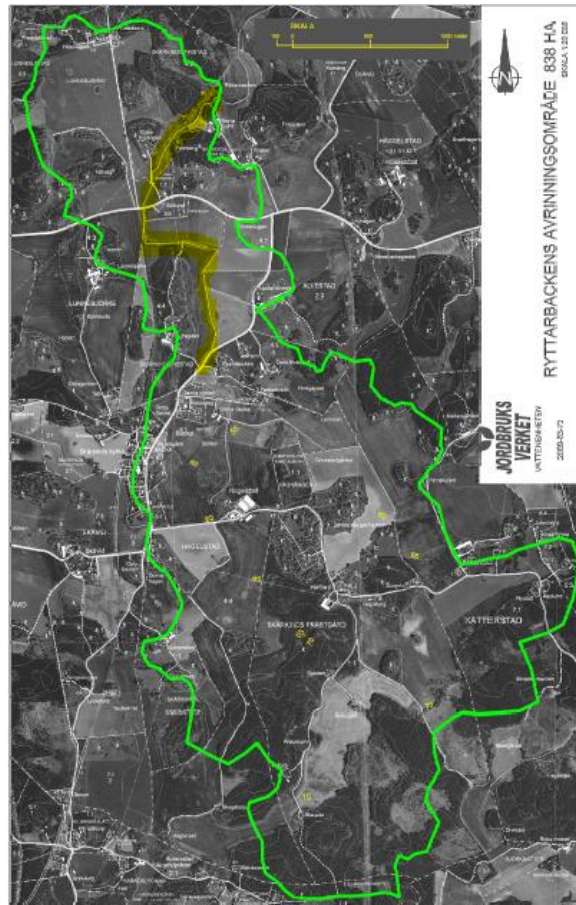
#### 3.1 Områdesbeskrivning - Hestadbäcken

Hestadbäckens avrinningsområde (figur 2) är 836 ha och utgörs till största delen av åkermark med inslag av skogsdungar.

Området är beläget i Östergötland och karakteriseras av ett svagt kuperat jordbrukslandskap. Jordarterna på åkermarken utgörs till största del av styv eller mycket styv lera. Lerhalten har i flera fall uppmätts till över 70 % (Malgeryd m. fl., 2010).

År 1933 genomfördes ett dikningsföretag i området då man dikade en stor del av Hestadbäcken och dess tillflöden. Dikningsföretaget var väldigt noggrant utfört och väl dokumenterat. De övre, södra delarna av Hestadbäcken har senare kulverterats medan den nedre norra delen fortfarande ligger öppen.

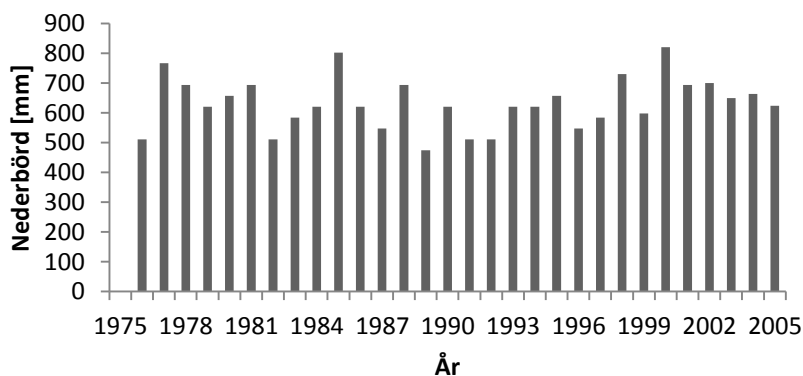
År 2001 utfördes utgrävning av bäcken samt pålning av de ur erosionssynpunkt mest utsatta dikesslänterna. Ingen dokumentation finns på detta; den information som finns har erhållits från samtal med de jordbrukare som var med vid utgrävningen. Pålningen finns till största delen bevarad i diket.



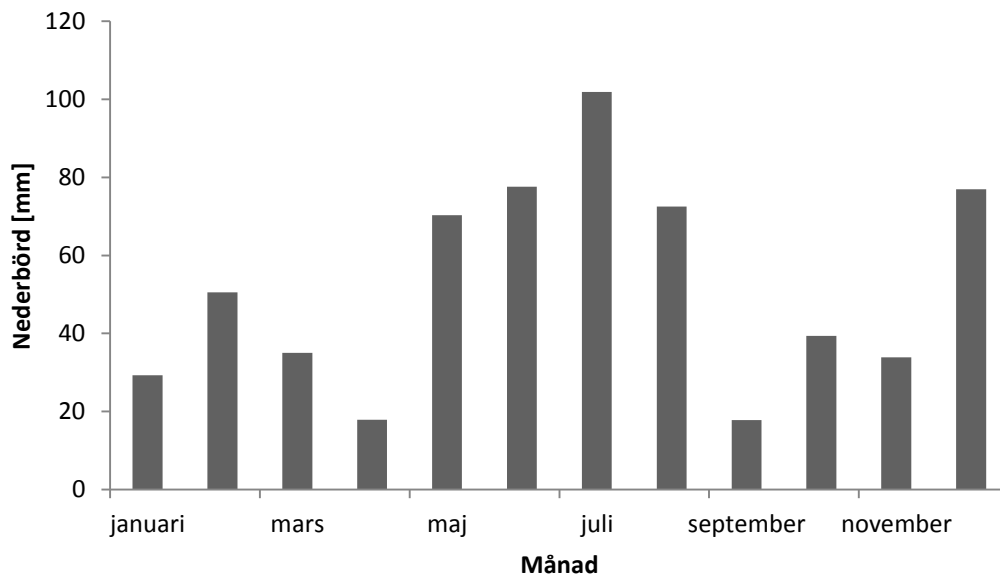
Figur 2 – Hestadbäckens avrinningsområde. Modellerad sträcka gulmarkerad.

#### 3.2 Vattenflöden och årstransporter i området.

SMHI har en regnmätare vid Ryttarbacken där nederbördsmängder (figur 3 och 4) från början av 1960-talet finns tillgängliga. Toppvärde för ett dygns nederbördsmängd under den tiden är 54,9 mm (960709).

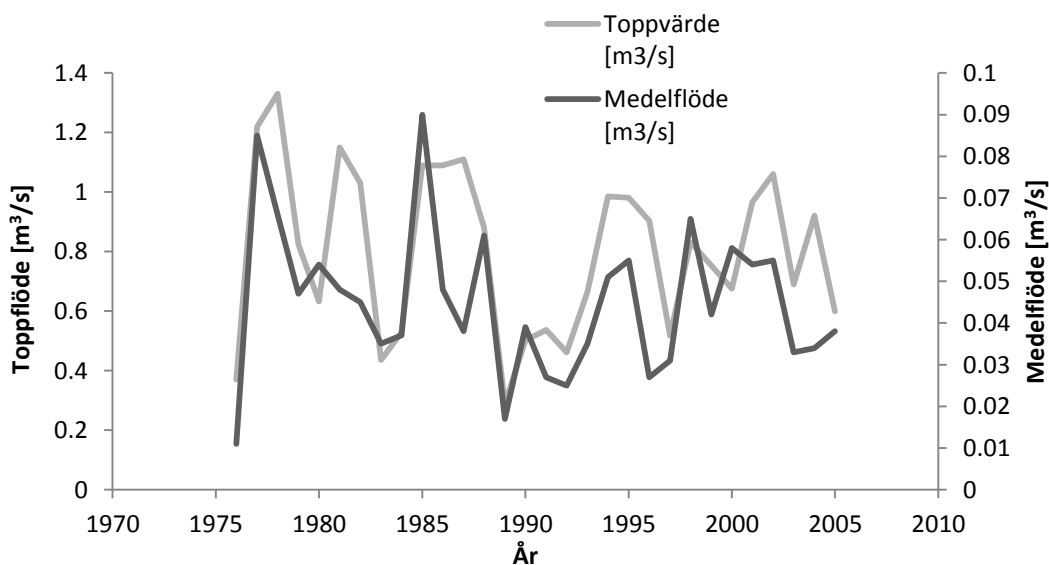


Figur 3 - Nederbörd vid Ryttarbacken under perioden 1975-2005 (mm/år).

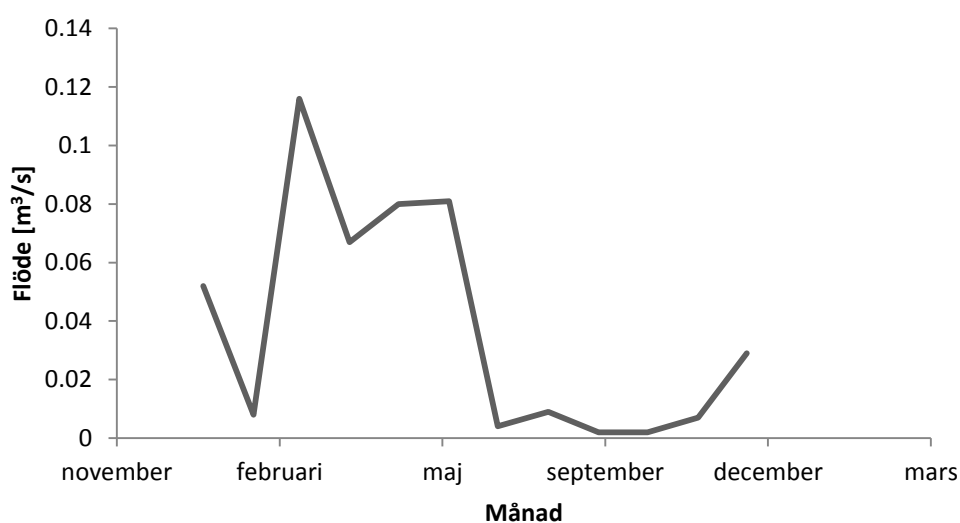


Figur 4 – Nederbörd vid Ryttarbacken under 2005 (mm/månad).

Det finns också en mätstation i diket som är belägen vid dikets lägsta punkt, Ryttarbacken. Mätstationen är uppsatt av SMHI och kontinuerliga mätningar av vattenföring (figur 5 och 6) har utförts sedan 1970-talet. Toppvärde för vattenföringen är 1,33 m<sup>3</sup>/s.



Figur 5 - Vattenföring för perioden 1975-2005. Årsmedelvärden (högra skalan) samt årens toppflöde (vänstra skalan).



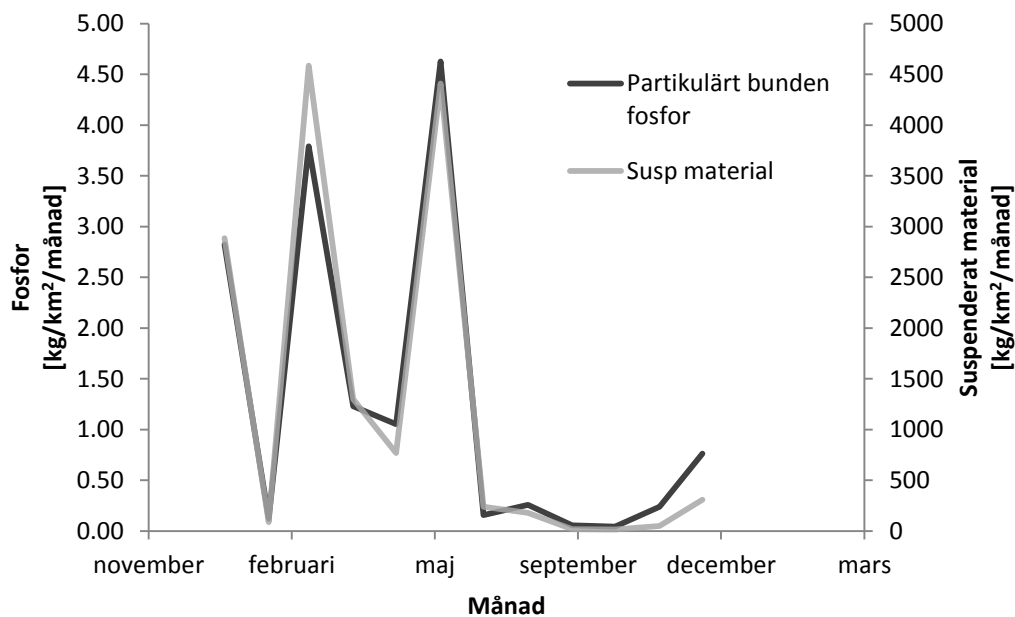
**Figur 6 - Vattenföring för 2005 (månadsmedelvärden).**

Det har även bedrivits andra mätningar av bl.a. näringsämnestransporter (tabell 1 och figur 7) och transporter av suspenderat material (figur 7) i avrinningsområdet utförda av SLU, Linköpings universitet och SMHI. Både totalfosfor och partikulärt bunden fosfor varierar på samma sätt som suspenderat material i Hestadbäcken (figur 7). Det gör att suspenderat material är en variabel som kan betraktas för att få en uppfattning av fosfortransporterna.

**Tabell 1 - Areal specifika transporter av vatten och fosfor per år (SLU, 2010c).**

Agrohydrologiskt år 1 juli-30 juni	Avrinning [liter/m <sup>2</sup> ]	Total Fosfor [kg/km <sup>2</sup> ]	%- Partikelbundet	%-Fosfor av totala mängden näringsämnen
1988/1989	139	36,04		7,25
1989/1990	83	18,91		3,22
1990/1991	201	45,2		5,16
1991/1992	90	20,46		3,77
1992/1993	112	19,96		2,43
1993/1994	198	44,84		5,04
1994/1995	280	58,09	39,13	3,95
2002/2003	127	23,03	47,81	2,27
2003/2004	149	25,9	36,99	2,01
2004/2005	208	43,59	46,59	3,48
2005/2006	158	38,78	42,63	3,81
2006/2007	277	77,04	60,80	4,81
2007/2008	125	26,57	49,38	4,40
2008/2009	156	34,58	39,59	5,40





Figur 7 - Areal specifika transporter år 2005. Partikelbunden fosfor samt suspenderat material (SLU, 2010b). Korrelationsfaktorn är 0,986.

### 3.3 Modellverktyget HEC-RAS

Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS) är en programvara utvecklad på Hydrologic Engineering Center som är en avdelning på Institute for Water Resources, U.S Army Corps of Engineers. Programmet består av fyra moduler för endimensionella analyser av vattendrag:

- Vattennivåberäkningar för stationära flöden
- Dynamiska flödesberäkningar
- Sedimenttransport och sedimentation
- Vattenkvalitetsanalyser

Den modul som är intressant för att modellera erosion och sedimentation är sedimenttransport och sedimentation. Modulen är skapad för att simulera trender av erosion och deposition under en längre tidsperiod. Detta kan vara användbart t.ex. för att simulera hur erosion och sedimentation påverkas efter en eventuell förändring av ett vattendrags utseende för att jämföra med vad som händer utan dessa förändringar.

#### 3.3.1 Uppbyggnad

HEC-RAS är uppbyggd av ett antal olika filer där data lagras. Den övergripande filen som öppnas då modellen skall köras kallas *projektfil*. I projektfilen finns *planfilen* som anropar de övriga filerna som skall ingå i modellen. I modulen för transportberäkningar för rörliga sediment ingår filer innehållande *geometrisk data*, *flödesdata* och *sedimentationsdata*. Efter varje körning sparas information i en så kallad *DSS-fil* genom vilken man kan presentera resultaten av körningen.

### 3.4 Den hydrauliska modellen HEC-RAS HESTAD

Modellen är konstruerad utifrån modellområdet Hestadbäcken. Det fanns inga aktuella inmätningar av Hestadbäckens lutning och tvärsektioner. Ett dikningsföretag som gjorts år 1933 finns dock men det var inget som kunde användas till mer än jämförelse och eventuellt vid kalibrering av modellen. Modellsträckningen bestämdes till sträckan mellan vägen in till Hestad gård i söder och mätstationen, Ryttdarbacken i norr. Nedan beskrivs de data som ingår i modulen och vilka parametrar och parametervärden som valts. Det förekommer dock fler parametrar än de som nämns nedan och för dessa gäller generellt att grundinställningarna valts. Detta grundar sig i vissa fall på att dessa inställningar stämmer bäst överens med verkligheten och i andra fall anses parametrarna inte ha någon inverkan på resultatet och därför har de inte lagts ned resurser på att specifikt bestämma dessa. Programmet uppbyggnad är beskriven i HEC-RAS user's manual och reference manual (2010a; b).

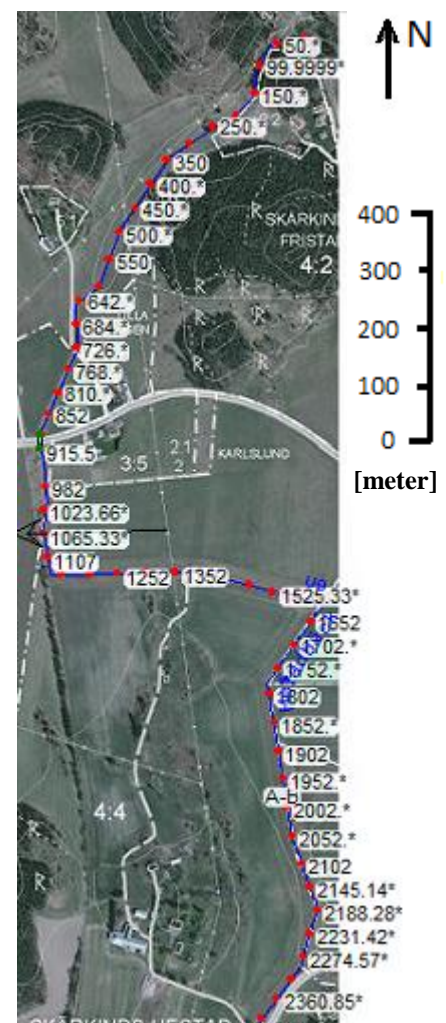
#### 3.4.1 Geometrisk data

Det inledande momentet i modelleringen var att konstruera bäckens geometriska data. Genom att infoga ett ortofoto från lantmäteriet över bäckens sträckning var det möjligt att rita in den exakta sträckningen av vattendraget i flödesriktningen från söder till norr (figur 8). De inkommande flödena längs bäckens sträckning uppskattades genom att dela in avrinningsområdet i delavrinningsområden och utifrån dessa beräkna flöden från söder till norr.

#### 3.4.2 Tvärsektionsdata - inmätning

Efter att sträckningen av bäcken var ritad angavs tvärsektioner i bäcken (figur 9). Dessa identifierades med ett nummer. Programmet fungerar så att högsta numret benämner sträckningens högst belägna punkt medan det lägsta numret benämner dess lägsta punkt. Varje tvärsektion utformas genom att ange koordinater i höjddled och sidled för punkter i tvärsnittet. Punkter kan sedan adderas och flyttas om tvärsnittet skall ändras.

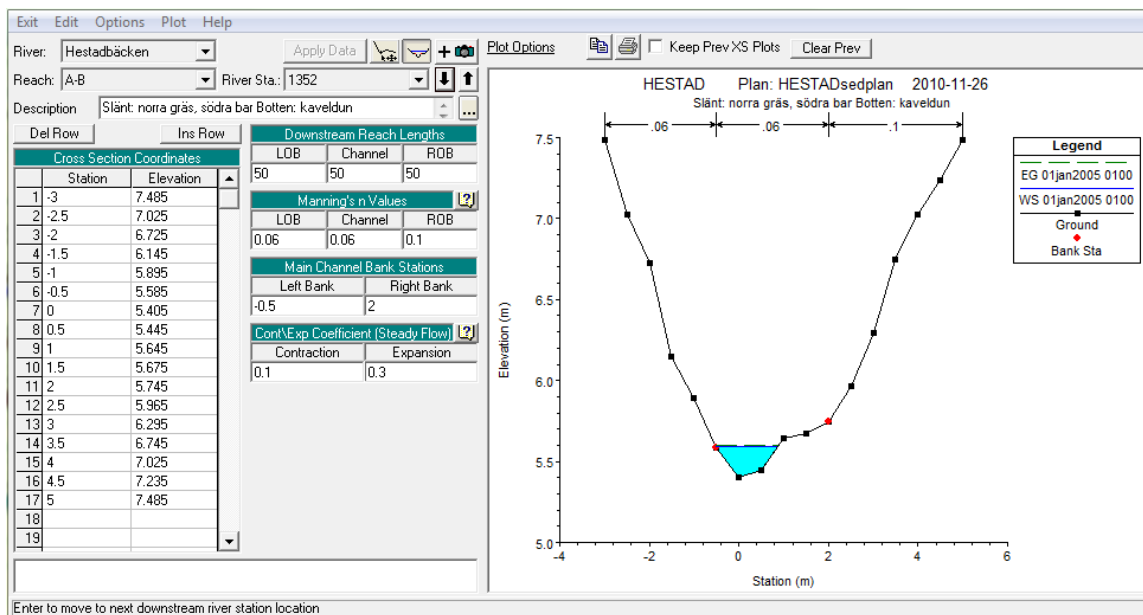
Uppmätning av bäckens tvärsektioner och lutning utfördes på platsen med hjälp av avvägningssinstrument. 14 stycken tvärsektioner mättes upp på utvalda platser längs modellsträckan. Platserna valdes utifrån var tvärsektionen såg ut att genomgå en signifikant förändring. Mellan de uppmätta sektionerna utfördes interpolering i HEC-RAS. Vid inmätning av sektionerna gjordes även uppskattningar av sedimenttjocklek i bottenmaterialet samt en iakttagelse av växtlighet. Sedimenttjockleken mättes dels för att få en uppfattning om var de mesta sedimentet finns, dels för att om möjligt kunna uppskatta hur mycket som sedimenterat. Iakttagelser av växtligheten låg till grund för att göra uppskattningar av Mannings tal. Tre tal anges för varje tvärsektion; ett för botten och ett för vardera dikeskanten. Mannings tal anges i modellen som Mannings skrovlighetskoefficient,  $n$  ( $=1/M$ ). Tabellvärden för olika bottenar och växtlighet finns i HEC-RAS user's manual (HEC-RAS, 2010a). Viktigt att veta är att  $n$  inte bara styrs av växtligheten i bäcken. Det är snarare ett mått på motståndet för flödet och det påverkas av flera variabler, se ekvationer för friktionsförluster (Appendix 1).



Figur 8 - Geometrisk data med tvärsektioner.

Avvägningar av ett antal punkter gjordes också för att kunna jämföra nivåer i diket mot 1933 års dikningsföretag. Det var inte möjligt att hitta de fixpunkter som användes år 1933 men ett antal uppskattningsvis fasta punkter vägdes in.

Då kalibrering av modellen var utförd testades den med ändrad geometri. En omformning av geometrin i tvärsnitten utfördes i HEC-RAS och två olika diken konstruerades. Ett traditionellt V-format dike samt ett tvåstegsdike (figur 1). Jämförelser gjordes mellan uttransporten nedströms i de olika diken. Därefter ändrades kornstorlekarna i diken enligt ett par olika jordtyper och ny jämförelse gjordes mellan de olika dikesformerna.



Figur 9 - Editor för inmatning av tvärsektionens egenskaper.

### 3.4.3 Flödesdata

Programmet utför endimensionella beräkningar av vattennivån för stationärt flöde. Vattennivåer beräknas för varje tvärsektion genom att lösa energiekvationen (Appendix 1) med den iterativa metoden *standard step method* (HEC-RAS, 2010a).

HEC-RAS modul för sedimentations- och erosionsmodellering använder sig av ett kvasi-dynamiskt flöde för att approximera ett dynamiskt flöde. Kvasi-dynamiskt flöde består av en serie av diskreta stationära flöden. Det stationära flödet är lättare att utveckla än det dynamiska och programkörningen är snabbare. Det är en förenkling som används av flera andra sedimenttransportmodeller.

En flödesserie måste anges som randvillkor för tvärsektionen längst uppströms, där den info-gas i editorn för kvasi-dynamiskt flöde. Det finns tre olika randvillkor som kan anges för den tvärsektion som är längst nedströms. Dessa är:

#### Stage Time Series

En tidsserie för vattennivån i diket.

#### Rating Curve

Vattennivå anges beroende på flödet i diket. HEC-RAS interpolerar sedan vattennivån för randvillkoret beroende på flödet i tvärsektionen.

### Normal Depth

Vattennivåns lutning anges av användaren. HEC-RAS beräknar vattennivån för varje flöde i tvärsnittet utifrån energilinjens lutning.

Det finns även möjlighet för användaren att lägga till randvillkor för valfria mellanliggande tvärsnitt. Det kan vara användbart t.ex. om det kommer in ett flöde från ett dike som inte ingår i modellen.

I modellen användes *Stage Time Series* som randvillkor, där serier över vattennivåer vid Rytta-backen erhållits från SMHI. De flödesserier som modellen testades med är för ett verkligt skede i Hestadbäcken. Inflödet från Hestad gård angavs för varje timme och totalt modellerades ett år. Flödesmätningarna har gjorts av SMHI och val av episod grundar sig på vilka flödesvariationer som kan vara intressanta att studera med tanke på sedimenttransport samt vilka data det finns för kalibrering av modellen.

Eftersom alla flödesdata är från sträckningens lägsta punkt räknades flödesserier för den högsta punkten, samt för ett par punkter mitt på sträckningen, fram utifrån avrinningsområdets storlek. Detta var nödvändigt för att få en så verklig bild av flödeskedet i bäcken som möjligt då kalibrering utfördes. Beräkningarna gjordes med hjälp av ekvationen för specifika avrinningen (Appendix 1), där hela avrinningsområdet antogs ha samma specifika avrinning.

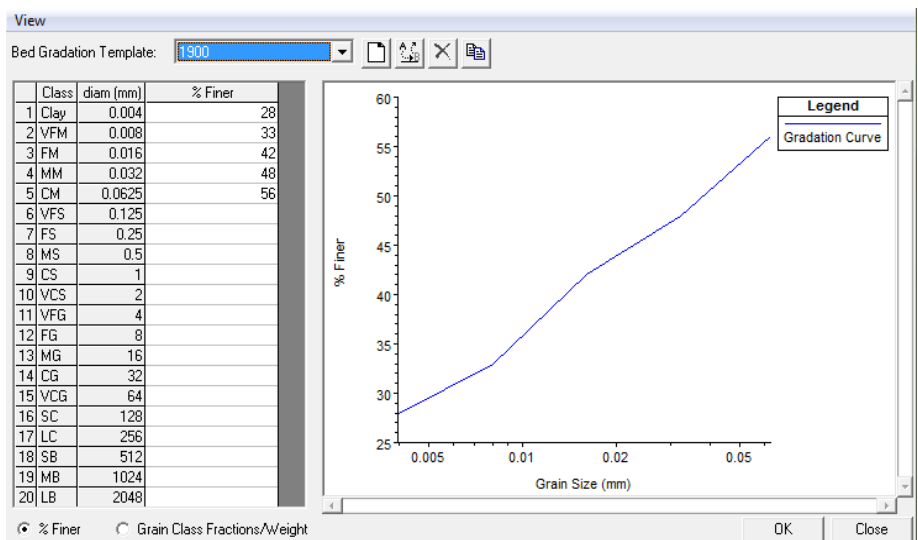
Flödesserier läggs till i editorn för kvasi-dynamiskt flöde genom att infoga *uniform lateral flow* i de punkter där man vill lägga till flödesserier. Dessa flödesseriers påkoppling kan man välja så att de blir jämt fördelade över ett antal tvärsnitt nedströms.

Vattentemperaturen ställs även in i samband med att flödesdata anges. Den kan precis som flödet varieras med angivet tidsteg under simuleringen. I modellen uppskattades temperaturen som ett årsmedelvärde och sattes till konstant sju grader Celsius.

Kalibrering av modellen gjordes först utifrån kända vattennivåer som erhöles vid intervju med lantbrukare samt noterades vid inmätning av bäcken. De kända vattennivåerna var vid modellsträckans övre punkt som är infarten till Hestad gård. Lantbrukaren hade där noterat det högsta vattenståndet de senaste åren (Gelin, 2010, muntlig källa).

### 3.4.4 Partikeldata

Beräkningarna av sedimenttransporthastigheter bygger på den angivna hydrauliken och parametrar för sedimentation utifrån varje kornstorleksklass. Transportekvationerna som beskrivs nedan är konstruerade för att användas för specifika kornstorleksklasser. Därför är de uppbyggda så att beräkningar först görs som om den specifika kornstorleksklassen ut-



Figur 10 - Editor för inmatning av kornstorleksdata.

gjorde 100 % av bottenmaterialet. Sedan multipliceras denna transportkapacitet med den andel av det totala sedimentet som den storleksklassen verkligen utgör. Slutligen summeras den totala transportkapaciteten för varje kornstorleksklass.

I HEC-RAS ges användare möjlighet att ange fördelning av kornstorleksklasser för varje tvärsektion. Fördelningen anges i hur många procent av bottenmaterialet som är mindre än respektive kornstorleksdiameter (Figur 10). Kornstorleken på sedimenten är i HEC-RAS indelad i 20 olika klasser. Det är material av storleken 0,002 – 2048 mm. En nackdel här att det ej går att variera kornstorleken på bottenmaterialet och kornstorleken för dikeskanterna i tvärsektionen. Kornstorleksfördelningen i HEC RAS-HESTAD bestämdes utifrån sedimentprovtagning. Dessa sedimentprovtagningar gav efter analys nödvändig indata för kornstorleksfördelning

### **3.4.5 Sedimentation och erosionsdata**

HEC-RAS sedimentationsmodul bygger på *Exner* ekvationen (Appendix 1). Vid varje tvärsektion sker beräkningarna utifrån så kallade kontrollvolym. Ekvationen säger att förändringen av sedimentvolym i en kontrollvolym är lika med skillnaden mellan inströmmande och utströmmande belastning. Beräkningarna ger en sedimenttransportkapacitet genom varje kontrollvolymen för varje tidssteg. Kapaciteten jämförs med de sediment som kommer in i kontrollvolymen. Om transportkapaciteten är större än införseln så kommer det bli ett sedimentunderskott som leder till erodering av bottenmaterialet. Om införseln är större än transportkapaciteten leder detta till sedimentation.

#### *3.4.5.1 Depositionsbegränsare*

Det som styr depositionen av de större partiklarna är framförallt fallhastigheten och det effektiva transportdjupet. Partiklarna som befinner sig i suspension kommer att förbli där så länge de uppåtriktade vertikala krafterna är större än krafterna från fallhastigheten. Det finns fyra olika metoder i HEC-RAS för att beräkna partiklarnas fallhastighet. Då det i Hestadbäckens bottenmaterial är de små partiklarna som dominerar valdes standardmetoden *Rubey* (Appendix 1) för fallhastigheten. Det är en relativt enkel ekvation som beror av partiklarnas diameter, gravitationen och kinematiska viskositeten. Ekvationen är uppbyggd utifrån Stokes lag.

Det effektiva transportdjupet beror på koncentrationen av partiklarna på respektive djup i flödeskanalen. Metoden för att beräkna detta delar in flödeskanalen i olika zoner och beräknar transporten för zonerna separat. Varje zon fungerar som ett effektivt transportdjup för specifika kornstorleksklasser.

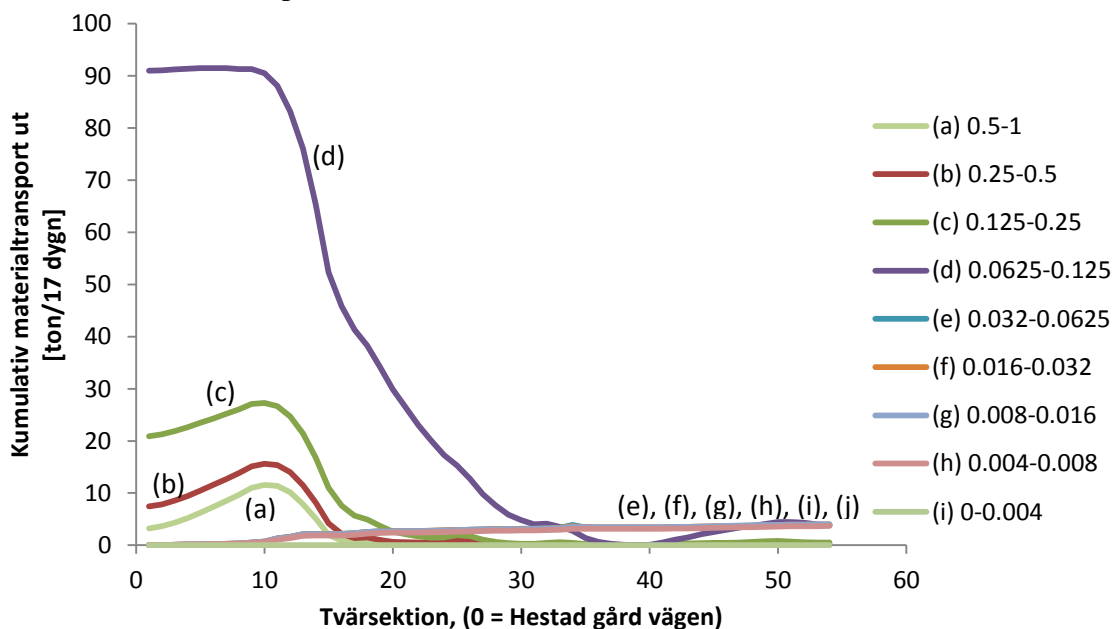
#### *3.4.5.2 Erosionsbegränsare*

De fysiska processerna som driver erosion är inte lika väl förstådda som de som styr deposition. Ekvationerna är mer empiriska och bygger på förhållandet mellan kontrollvolymens horisontella längd och vattnets djup. Även bottenmaterialets kornstorleksfördelning styr erosion. I många diken bildas ett övre lager av storkornigt material då erosion sker. Detta lager fungerar som ett slags skydd mot erosion eftersom dessa partiklar är svårare att förflytta än de mindre partiklarna som finns under detta skyddande lager. Det finns två metoder i HEC-RAS som simulerar sorteringen av partiklarna i bottenmaterialet. Båda metoderna delar in botten i ett ytligt aktivt lager som används vid beräkning av transportkapaciteten, samt ett underliggande inaktivt lager som inte tas med vid beräkningen av transportkapaciteten. Den metod som används i HEC-RAS HESTAD är *Exner 5*. Denna metod samverkar med inställningarna för lertransport på så vis att om det inaktiva lagret består av mer än 10 % ler så kopplas erosionshastigheten för lertransport in.

### 3.4.5.3 Transportekvationer

Det finns två transportekvationer i HEC-RAS som lämpar sig för små kornstorlekar (ner till silt). De övriga tillgängliga metoderna beräknar de större fraktionernas transport för att sedan extrapolera värden för de mindre fraktionerna, vilket kan ge vissa fel. De ekvationer som kan användas för beräkningar vid de mindre fraktionerna är Laursen-Copeland och Krone/Parthenaides. Dock är det endast Krone/Parthenaides som fungerar för kohesiva lerfraktioner, vilket är vad det handlar om i Hestadbäcken. I båda dessa ekvationer är indata den kritiska skärspänningen. Krone/Parthenaides ger användaren möjlighet att ge inputvärden även på konstanter för partikelerosionshastighet, kritisk skärspänning för masserosion samt på masserosionshastighet. Då man väljer att koppla på Krone/Parthenaides ekvationer för materialtransport kommer dessa att samverka med Laursen-Copeland. För de större partiklarna används Laursen-Copeland. Då mindre partiklar ingår i materialtransporten använder programmet sig av Krone/Parthenaides. En nackdel med metoderna är att det ej går att variera dess parametrar längs dikets sträckning. Det är tänkbart att materialets textur och därför även den kritiska skärspänningen varierar längs ett dikes sträckning. Tillvägagångssättet blir att bestämma ett medelvärde för kritiska skärspänningen och konstanterna för erosionshastighet.

De båda transportekvationerna för erosion av finkornigt material testades genom att köra modellen med sorterade jordar inställda. Körningarna utfördes med endast en kornstorleksklass åt gången och gav resultat på materialtransporten för tvärsektionerna (figur 11). Det kunde tydligt konstateras att det är när partiklarna är mindre än 0,0625 mm som Krone/Parthenaides ekvationer (Appendix 1) används av programmet. När endast större partiklar finns i diket används enbart Laursen-Copeland. Då de kohesiva ekvationerna inte används, utan bara Laursen-Copeland ekvationer och sediment med partikelstorlekar mindre än 0,0625 mm ställdes in så kunde inte programmet utföra beräkningarna på grund av för stora förändringar i bottenmaterialet som inte ansågs realistiska. Fokus lades sedan på att finna en kritisk skärspänning som karakteriserar de partiklar som finns i det berörda diket.



Figur 11 – Materialtransport vid olika kornstorlekar. Siffrorna i teckenförklaringen anger kornstorleksintervall i mm.

#### 3.4.5.4 Randvillkor för sedimenttransport

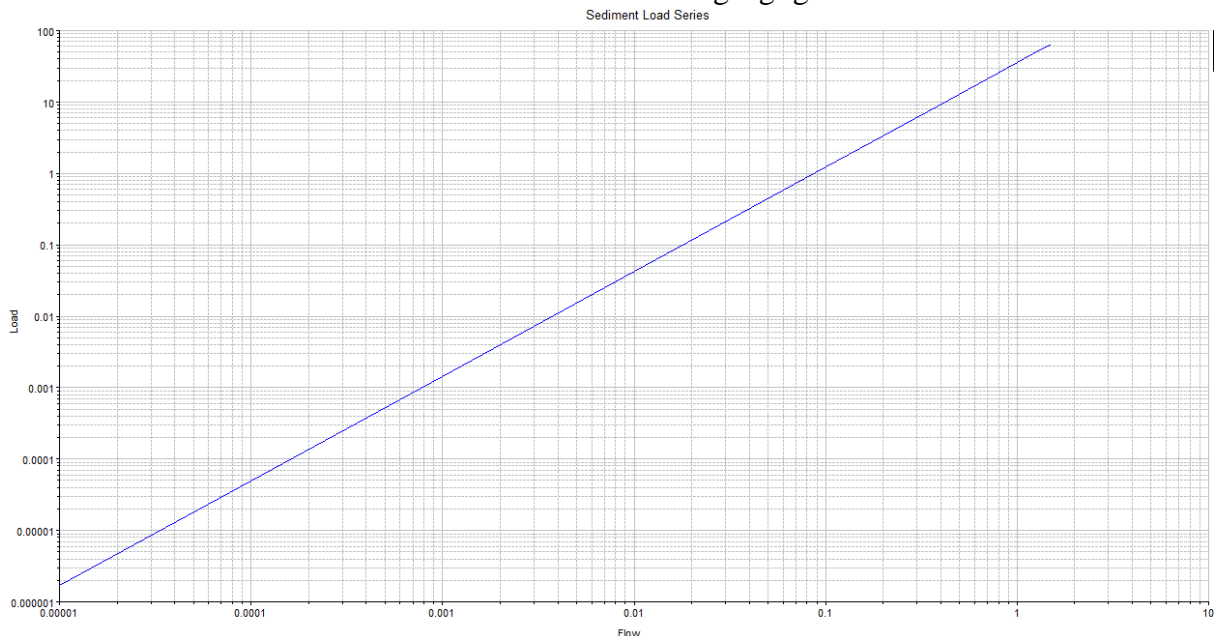
HEC-RAS ger användaren möjlighet att på tre olika sätt ange randvillkor för sedimentanalysen. Dessa tre är:

##### *Equilibrium load*

Randvillkoret bygger på transportkapaciteten och kan endast anges för externa uppströms tvärsektioner. HEC-RAS beräknar sedimenttransportkapaciteten för den specifika tvärsektionen vid varje tidssteg. Denna kapacitet används sedan som inflöde av sediment. Eftersom massflöde är satt lika med kapaciteten för varje kornstorlek sker ingen erosion eller sedimentation i detta tvärsnitt.

##### *Rating curve*

Här beräknas istället flödet av sediment utifrån vattenflödet. En *Rating curve* skapas innehållande massflödet jämfört med vattenflöde, vilket anges i en tabell. Även procent av respektive kornstorlek skall anges för respektive massflöde och vattenflöde. Detta är en indata som är svår att uppskatta. Det krävs att man antingen gör mätningar på platsen alternativt laborationsstudier på det material man har i diket. I HEC-RAS HESTAD anges *Rating curve* (figur 12) som randvillkor i den övre tvärsektionen. Värdena för inmatning beräknades genom anpassning av data från flödesproportionella provtagningar utförda av SMHI (figur 14). Randvillkoret har sina brister men med de data som finns tillgängliga bedöms det som det bästa.



**Figur 12 - Rating curve. Sedimenttransportens variation med flödet som randvillkor i uppströms tvärsektion.**

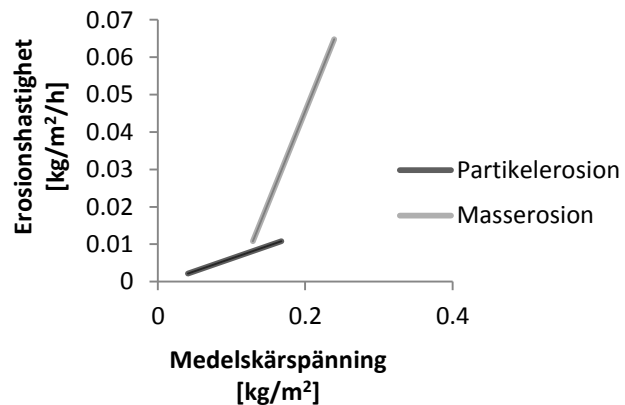
##### *Sediment load series*

Som randvillkor kan även massflöde av sediment för specifika tidpunkter anges. Tidsserier kan anges för flera tvärsnitt i bäcken vilket kan motsvara massor som kommer in från omkringliggande åkermark. Även här krävs angivelse med procent av respektive kornstorlek. I modellen testades detta randvillkor genom att *Sediment load series* angavs uppströms och på ett par platser längs bäckens sträckning där troliga inlopp av sediment uppskattades. Värden på mängden sediment vid dessa platser beräknades utifrån arealspecifika månadstransporter (SLU, 2010b). Uppskattningar gjordes av storleken på delavrinningsområdet vid varje inlopp till bäcken. Kornstorleksfördelningen på inkommande sediment sattes lika med den kornstorleksfördelning som var i bäcken på platsen.

Kalibreringar mot uppmätt suspenderat material utfördes med de två olika randvillkoren, *Rating curve* och *Sediment load series*. Vid kalibrering upptäcktes att randvillkor *Sediment load series* ej gav bättre resultat än randvillkoret för *Rating curve*. Då de uppskattningar som gjorts vid bestämning av *Sediment load series* anses osäkrare används inte randvillkoret.

### 3.4.6 Metodik för bestämning av kritisk skärspänning och erosionshastighetskonstant

I HEC-RAS användarhandbok (HEC-RAS, 2010b) finns ett diagram som visar hur erosionshastighet varierar med skärspänningen (figur 13). Utifrån detta diagram kan den kritiska skärspänningen för både partikelerosion och masserosion uppskattas. Ett flertal studier har gjorts där man försökt koppla samman skrymdensiteten med erosion av kohesiva jordar. En sådan koppling skulle vara användbar då skrymdensiteten är något som är enkelt att mäta. De flesta studier pekar på att skrymdensiteten inte kan fungera som en ensam parameter för bestämning av kritisk skärspänning. En iakttagelse som Roberts m. fl. (1988) gjorde var att erosionshastigheten för sediment större än 0,125 mm är helt oberoende av skrymdensiteten vilket gör denna parameter specifik för kohesiva jordar (Huang m. fl., 2006). Hwang och Mehta (1989) har utifrån försök tagit fram uttryck för att bestämma just kritiska skärspänningen och konstant för erosionshastighet utifrån jordens skrymdensitet. Man har dock bortsett från några viktiga parametrar så som sedimentstruktur, innehåll av salter och andra fysikaliska och kemiska egenskaper. Dessa ekvationer är framtagna från empiriska data och är inte heller generella för alla platser och bottenmaterial. Med hjälp av dessa ekvationer tillsammans med Parthenaides diagram (figur 13) kan en relativt bra uppskattning göras av den kritiska skärspänningen.



Figur 13 – Parthenaides diagram visar hur erosionshastigheten varierar med skärspänningen för partikel- resp. masserosion. Enheterna på axlarna är konverterade till SI-enheter. (HEC-RAS, 2010b)

Skrymdensiteterna användes för att beräkna kritiska skärspänningen och erosionshastighetskonstant (tabell 2) enligt ekvationer framtagna av Hwang och Mehta (1989) (Appendix 1).

Skrymdensitet medelvärde beräknades (värden från tabell 3)

$$\frac{1,86+1,53+1,53}{3} = 1,64 \text{ [t/m}^3\text{]}$$



**Tabell 2 - Kohesiva parametrar beräknade utifrån ekvationer framtagna av Hwang och Metha (1989)**

	Kritisk skärspänning [kg/m <sup>2</sup> ]	Erosionshastighet [kg/m <sup>2</sup> /h]
<b>Partikelerosion</b>	0,0857	0,0206
<b>Masserosion</b>	0,627	2,24

För parametern som anger erosionshastighet för masserosion har ingen ekvation tagits fram av Hwang och Metha (1989). I försöken har endast ett värde angivits för denna parameter. Vid kalibrering väljs därför att justera parametern som anger erosionshastighet för masserosion för att uppnå korrelation med kalibreringsdata.

De uträknade värdena (tabell 2) stämmer inte överens med Parthenaides diagram (figur 13). Vid kalibrering testades båda de uträknade värdena och de värden som fås utifrån Parthenaides diagram. Det visade sig att de värden som är beräknade utifrån skrymdensiteten är de som stämmer bäst.

### 3.5 Provtagningar

Sedimentprover i bäckens bottenmaterial togs på tre representativa platser från söder till norr samt i dikeskanten. Valet av platser gjordes utifrån uppskattningar av variationer i bottenmaterialets sedimentsammansättning. Proverna analyserades av SGI<sup>5</sup> och gav data över materialets textur, som var nödvändigt för att kunna ange partikeldata i modellen. Dessa data matades sedan in i modellen och interpolerades för de platser där inte sedimentprover tagits. Även skrymdensiteten analyserades och användes vid bestämning av kritisk skärspänning (tabell 3). Glödgningsförlusten tyder på en hög halt av organiskt material. Organiskt material fäster vid lerpartiklar och har en signifikant inverkan på bindningarna mellan lerpartiklarna (Huang m.fl., 2006). Inverkan av organiskt material ger därför ytterligare än osäkerhet vid bestämningen av den kritiska skärspänningen.

**Tabell 3- Sammanställning av sedimentegenskaper efter analys av sedimentprover**

	Skrymdensitet [t/m <sup>3</sup> ]	Vattenkvot [%]	Glödgningsförlust[%]
<b>Södra delen, bottenmaterial</b>	1,86	28	2,5
<b>Mellersta delen, bottenmaterial (dikeskant)</b>	1,53 (1,74)	78 (44)	5,2 (4,5)
<b>Norra delen, bottenmaterial (dikeskant)</b>	1,53 (1,69)	76 (52)	4,9 (7,1)

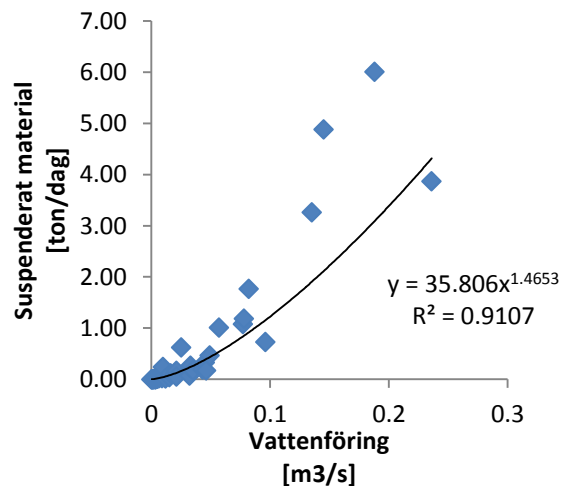
De flödesproportionella provtagningarna, utförda av SMHI, har används för att konstruera ett randvillkor för *Rating curve* med hjälp av anpassning i *Excel* (figur 14). Provtagningarna är 39 stycken till antalet och är utförda vid oregelbundna tidpunkter av SMHI. Randvillkoret anges för den övre tvärsektionen i modellen och modellresultat för massflödet vid Rytta-backen jämförs med den suspenderade mängden material som beräknats utifrån de arealspeci-

<sup>5</sup> Statens Geotekniska Institut

fika månadstransporterna (SLU, 2010b). Mängden suspenderat material förväntas variera på samma sätt som transporten för fosfor (figur 7) vilket betyder att detta även visar hur modellen hanterar transport av fosfor i bäcken.

### 3.6 Data för kalibrering

SLU har sammanställt data över arealspecifika ämnestransporter. De är framtagna utifrån analyser av vattenprover, tagna varannan vecka vid Ryttaarbacken. Värdena är interpolerade för att få fram dygnstransporter och därefter summerade till månads- och årstransporter (SLU, 2010b). I ett avrinningsområde som Hestadbäckens krävs i regel tätare provtagning vid höga flöden för att kunna uppskatta ämnestransporterna. Det har visats vid mätningar att för t.ex. fosfor så sker mer än 50 % av den årliga transporten, i ett litet sjölöst område, under en flödesperiod av 5 dygn (Johansson och Brandt, 2005).



Figur 14– Transport av suspenderat material som funktion av vattenföringen. Anpassning utifrån flödesproportionell provtagning utförd av SMHI.

## 4 Resultat och observationer

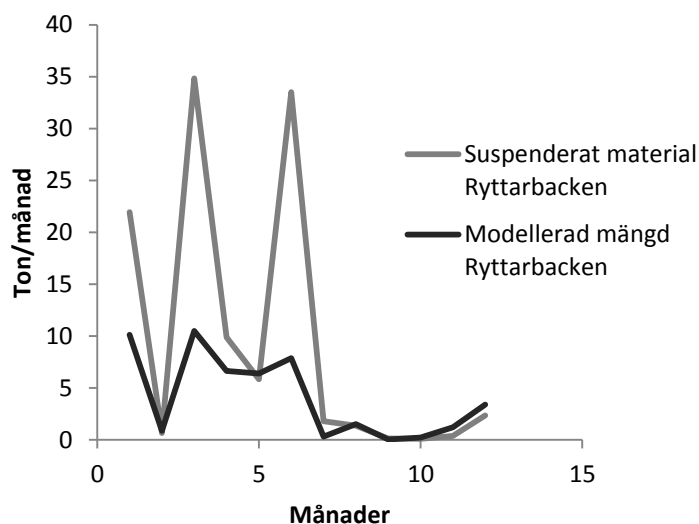
### 4.1 Kalibrering

Modellen kördes stationärt med det högsta uppmätta flödet från de senaste 30 åren. Nivån som uppkom i den övre tvärsektionen stämde relativt bra överens med den nivå som lantbrukaren noterat med en felmarginal på 10-15 % (Gelin, 2010, muntlig källa). Sedan kördes modellen stationärt med ett lågflöde från hösten 2009 som uppskattades vara likvärdigt med det flöde som var i bäcken vid inmätning av tvärsektioner hösten 2010. De vattennivåerna som programmet då beräknade stämde väl överens med iakttagen vattennivå vid inmätning. Detta är ingen exakt kalibrering men anses tillräcklig för att kunna fortsätta kalibrering av sedimentationsegenskaperna.

Jämförelser gjordes mellan modellens utflöde av sediment vid Ryttaarbacken och de av SLU uträknade transporterna utifrån provtagningar vid Ryttaarbacken. Kalibrering utfördes genom att justera erosionshastigheten för masserosion för att uppnå korrelation mellan modellkörning och kalibreringsdata. Då resultatet uppnås var parametern som anger erosionshastighet för masserosion justerad till ett värde tio gånger högre än utgångsvärdet (tabell 2). Resultatet (figur 15) visar att variationerna verkar stämma överens men de höga topparna uteblir i modellresultatet.

Vid modellkörning med kohesiva inställningar enligt Parthenaides (figur 13) fås resultat med betydligt mindre mängd material, därför antas de uträknade kohesiva parametrarna (tabell 2) fortsatt vara de som stämmer bäst.

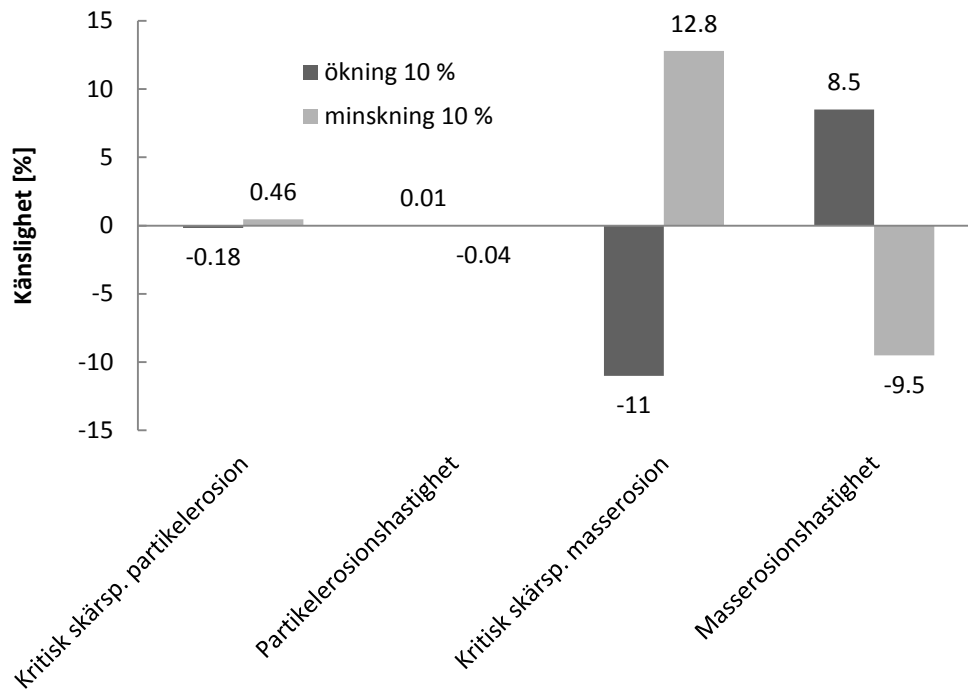
Resultatet var inte bättre med *Sediment load series* som randvillkor jämfört med *Rating curve*. Med tanke på osäkerheten i uppskattningen av *Sediment load series* bedömdes *Rating curve* vara det randvillkor som skulle användas.



Figur 15 - Jämförelse mellan kalibreringsdata och modellkörningen då *Rating curve* används som randvillkor.

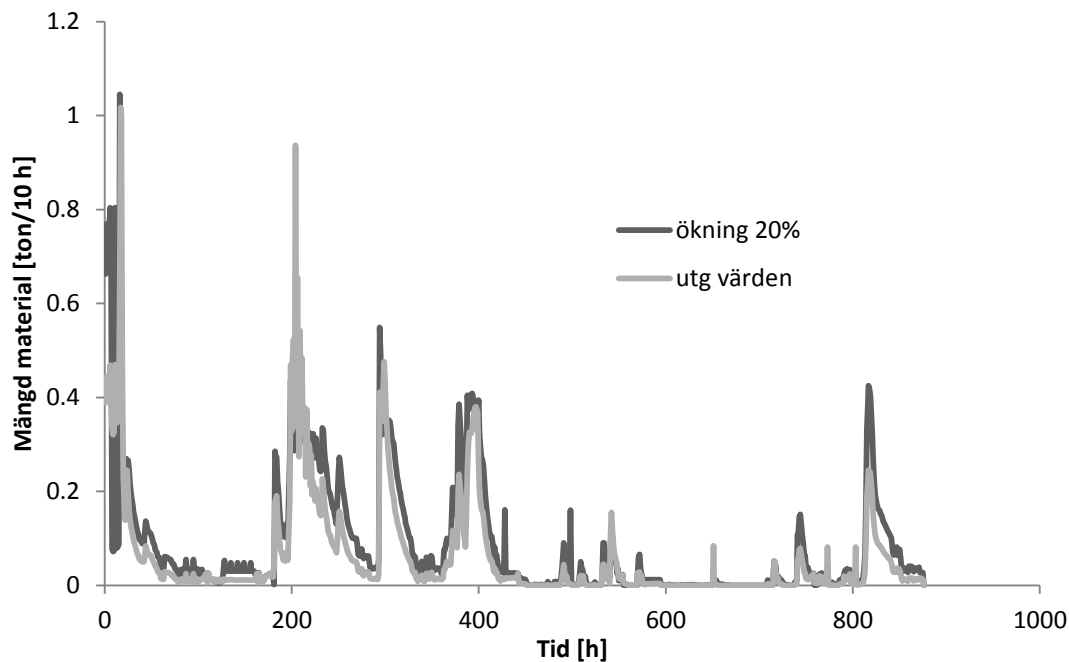
## 4.2 Känslighetsanalys

De kohesiva parametrarna testades för att kunna konstatera vilka som har störst inverkan på mängden transporterat material vid nedersta tvärsektionen. Genom att utgå från de uträknade parametrarna (se avsnitt 3.4.6), samt kalibrerat värde på erosionshastigheten för masserosion, och ändra en parameter åt gången  $\pm 10\%$  medan de andra parametrarna hålls konstanta fås känsligheten för utflödet av material vid bäckens nedre tvärsektion (figur 16). De parametrar för vilka resultatet är mest känsligt är den kritiska skärspänningen för masserosion samt parametern som bestämmer masserosionshastigheten.



Figur 16 - Känslighet kohesiva parametrar. Påverkan på den totala mängden material vid Ryttaarbacken under 2005 då värdet på parametrarna ökas respektive minskas med 10 %.

En känslighetsanalys av Mannings skovlighetskoefficient utfördes genom att ändra samtliga utgångsvärden på  $n$  med  $\pm 20\%$  för att sedan betrakta förändringen i uttransporten av material i den nedre tvärsektionen. Det visade sig att en minskning av  $n$  med 20 % gav en total minskning i uttransport med knappt 40 % medan en ökning av  $n$  gav en ökning av uttransport med drygt 40 %. De högre värdena på  $n$  ger överlag en högre uttransport bortsett från några skeden under året (figur 17).

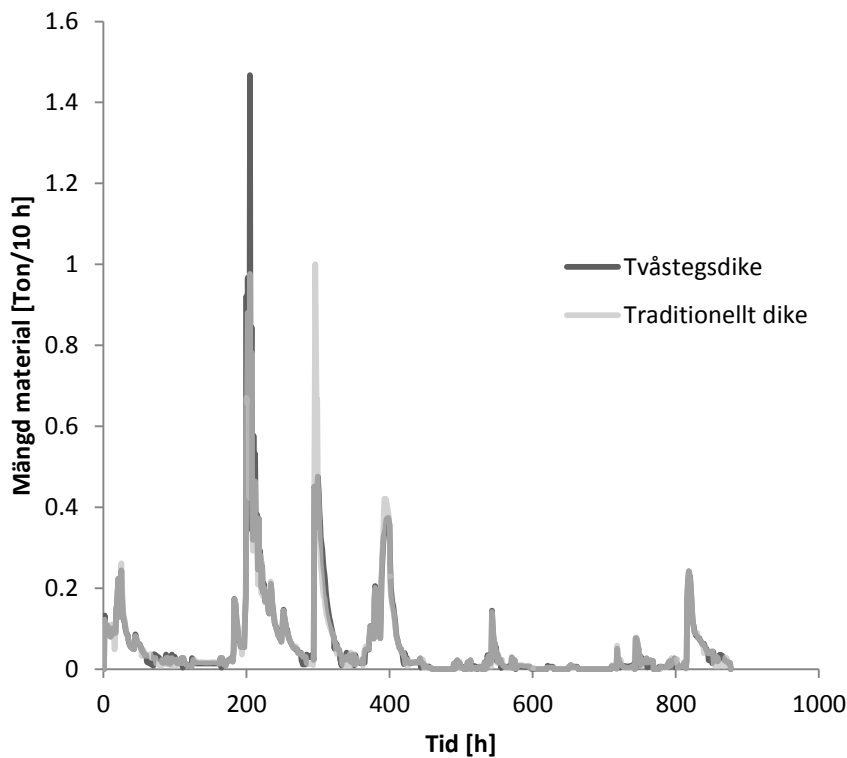


Figur 17 – Jämförelse av beräknad uttransport av material vid Ryttaarbacken under 2005 för utgångsvärde samt ökning av n.

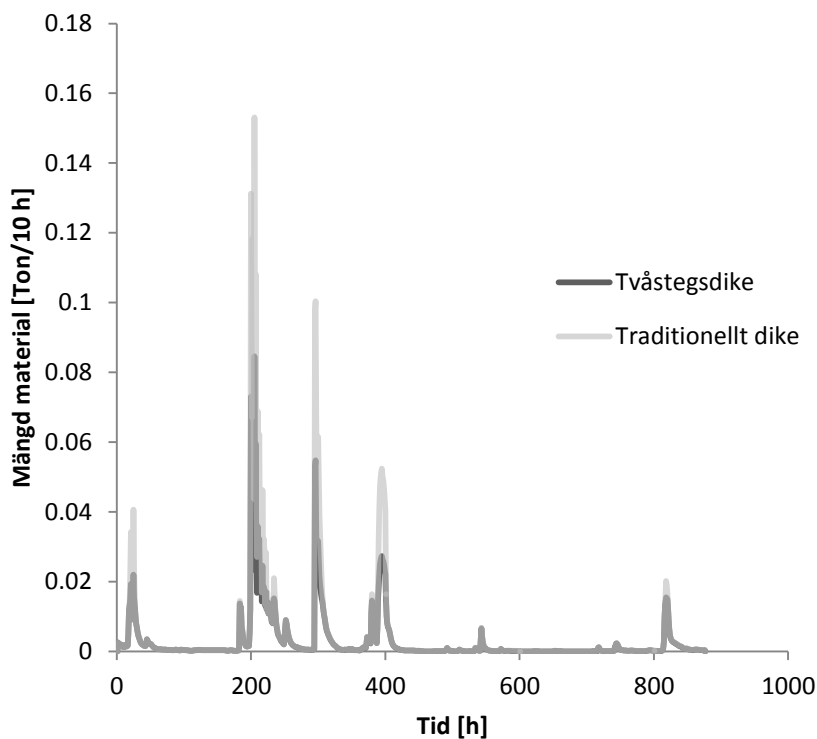
#### 4.3 Förändring av geometrin

Jämförelsen av uttransport mellan ett traditionellt V-format dike och ett tvåstegsdike visade ingen signifikant skillnad mellan de olika dikesformerna för de förhållandena som råder i Hestadbäcken (figur 18).

Kornstorleksfördelningen ändrades till några olika grövre bottenmaterial. För en jord med fint grus märktes stora skillnader mellan modellresultaten. Tvåstegsdiket gav en minskning av uttransport med 31 % (figur 19). Kurvan stämde väl överens med de teorier som beskrivs i artikeln (Miami conservancy district, 2010) som ligger till grund för utformningen av tvåstegsgeometrin. Vid högre flöden sker en mindre materialtransport på grund av att dikeskanternas geometri sänker vattenhastigheterna. Teorierna fungerar dock inte för mindre kornstorlekar enligt modellresultaten. Då en siltjord modellerades blev det istället en ökning av uttransporten med ca 4 %.



Figur 18 – Massflöde av material vid Ryttaarbacken under 2005 för två olika dikeskonstruktioner. Dels för ett traditionellt dike och dels för ett tvåstegsdike (se avsnitt 2.3.1).



Figur 19 - Massflöde av material vid Ryttaarbacken under 2005 för två olika dikeskonstruktioner. Dels för ett traditionellt dike dels för ett tvåstegsdike (se avsnitt 2.3.1). Här är kornstorlekarna inställda för en fin grusjord i stället för den verkliga lerjorden.

## 5 Diskussion

Höga toppar av transporterat material uteblir i modellresultaten jämfört med kalibreringsdata. Det kan bero på att man missat de höga flödena vid de flödesproportionella provtagningarna och därför fås en felaktig *Rating curve*. En punkt från mätvärdena togs bort innan anpassning till kurva då den avvek tydligt från de övriga punkterna. En närmare analys av denna punkt utfördes genom att titta på provtagningsdata. Punkten gav en väldigt liten mängd suspenderat material vid ett högt flöde. Tidpunkten för provtagningen angavs till 21 februari 1992. En studie av nederbörden vid denna punkt visade att i stort sett ingen nederbörd hade skett på flera dagar. Det tyder på att det onormalt höga flödet förmodligen har sin förklaring i snösmältningen. När snösmältning sker kan det göra att stora flöden uppstår utan att stora mängder jordmaterial dras med på grund av att marken fortfarande är frusen. Provtagningen ansågs därför inte representativ för anpassningen av en *Rating curve*. Fler värden avviker på samma sätt, bl.a. punkten för det högsta flödet (figur 14) som är från en provtagning i januari 1991. I samband med denna provtagning var dock nederbördsmängderna påtagliga vilket gör att man ej med säkerhet kan påvisa samma fenomen.

Med tanke på, som tidigare nämnts, att 50 % av fosfortransporten sker på mindre än 2 % av tiden i ett litet avrinningsområde som Hestadbäcken är det viktigt att göra provtagningar då dessa stora transporter sker. Det kräver bra prognoser och är tidskrävande men väldigt viktigt för att kunna få ett grepp om vilka transporter som sker ut ur diket. För att kunna testa en modell av den här typen krävs fler och bättre kalibreringsdata. De kalibreringsdata som används är baserade på vattenprover som är tagna varannan vecka och däremellan interpolerade. De gör att dessa data blir väldigt generella och egentligen inte är tillräckligt exakta för att göra kalibreringar emot. På grund av att det inte finns några andra data att kalibrera mot användes de under vetskap om dessa brister.

Det finns möjlighet att förutom justering av erosionshastigheten för masserosion även vrida på övriga parametrar för att få modellresultatet att stämma bättre överens med de arealspecifika ämnestransporterna. Det kan göras genom att justera Mannings skrovlighetskoefficient i bäckens tvärsektioner. Det går även att öka konstanten för erosionshastighet för partikelerosion alternativt sänka inställningarna för kritisk skärspänning för att få en högre uttransport av suspenderat material vid modellkörning. Detta gör dock att parametrarna för de kohesiva egenskaperna inte hamnar inom de intervall som litteraturen (HEC-RAS, 2010a; Huang m. fl., 2006) anger. Det är en kalibrering som är svår att göra utan att veta vilken av de olika parametrarna som skall justeras. Det går att uppnå korrelation mellan kalibreringsdata och modellkörningarna men det behöver inte betyda att parametrarna är rätt inställda.

### Kohesiva parametrar

Bottenmaterialets kohesiva egenskaper är komplicerade och svårbestämda. Att bestämma de kohesiva parametrarna utifrån skrymdensiteten är osäkert. Ekvationerna som finns för bestämning är framtagna från empiriska data och är inget som gäller generellt för alla platser och bottenmaterial. Det fick erfaras vid kalibrering då parametern som anger erosionshastighet för masserosion fick justeras till ett betydligt högre värde än det som angavs i artikeln (Hwang och Metha, 1989). En förklaringen kan vara att lerans kohesiva egenskaper påverkas av mycket mer än bara dess skrymdensitet; bl.a. innehåll av organiskt material, mikrobiell aktivitet m.m. För att få fram en realistisk kritisk skärspänning för en specifik plats bör man utföra mätningar av dessa parametrar på plats. Det är dock komplicerade mätningar som kräver avancerad utrustning. Det går också att göra dessa mätningar i laboratorium genom att ta med sediment från provplatsen och titta på hur de sätts i rörelse vid olika flöden. Detta skulle kunna ge en större säkerhet vid bestämning av parametrarna. För det krävs dock utrustning

och tid som detta projekt inte gav möjlighet till. Känslighetsanalysen visar att de två parametrarna för masserosion är de som påverkar modellresultatet klart mest.

#### Mannings skrovlighetskoefficient

Mannings skrovlighetskoefficient har stor inverkan på flödet i naturliga sektioner. En liten feluppskattning av  $n$  kan leda till betydande förändring av sedimenttransporten. Den ojämna växtligheten i Hestadbäcken gör det extra svårt att göra bra uppskattningar. Det är tre värden på  $n$  som bör anges för varje tvärsnitt. Varje sektion har en viss påverkan på materialtransporten beroende på dikets lutning och tvärsektionens övriga utseende. Vid känslighetsanalysen konstaterades att en ökning av  $n$  ger en ökning i materialtransport. Det har sin förklaring i att ökat motstånd i diket ger minskad vattenhastighet och ett ökat vattenstånd samt en större våt tvärsnittsarea och därmed en ökad skärspänning. Andra teorier menar på att när strömhastigheten avtar så avtar också transportkapaciteten (Axelsson, 2010). Teorierna utgår dock främst från grövre partiklar och gäller inte säkert för alla kohesiva jordar. Det är viktigt vid modellering av den här typen att veta vad angivelse av en viss parameter innebär. Mannings skrovlighetskoefficient anger ett värde på motståndet i bäcken och ett ökat  $n$  i modellen ger inte samma resultat som ökad växtlighet i diket. Det önskvärda är att vara så säker på övriga data att man sedan vid kalibrering kan justera  $n$  så att rätt sedimenttransport uppnås och därefter kunna kontrollera mot tabellvärden att angivna värden på  $n$  är sannolika. Justering av  $n$  utifrån modellkörningarna i HEC-HESTAD anses ej vara befogad då tillförlitligheten i kalibreringsdata inte är tillräckligt hög för att utföra en sådan tidskrävande kalibrering.

#### Geometrin som kalibreringsdata

Vid inmätning av tvärsektionerna gjordes ett antal mätningar på hur tjockt sedimentlagret var i diket. Vid mätningarna bestämdes dels vilken nivå sedimentets övre skikt låg på, dels sedimentets tjocklek. Förhoppningarna vid inmätningen var att utifrån nivåerna och enkla beräkningar kunna få ett genomsnitt av den årliga förändringen av bottenmaterialet sedan dikesföretaget år 1933 (då nivåer för bottenytan finns dokumenterade). Ett problem med detta som utgångspunkt vid kalibrering är dock att en utgrävning av bäcken gjordes år 2001 utan att dokumenteras samt att liknande utgrävningar förmodligen ägt rum ett antal gånger mellan 1933 och 2001. Hade dikets geometri varit dokumenterad efter utgrävning 2001 hade det kunna ge en bild av vad som hänt med bottenmaterialet de senast 10 åren. Även om det ändå skulle vara en osäkerhet i hur mycket material som kommer från ytavrinning, jämfört med det material som kommer från övre sektioner i bäcken via erosion, skulle uppskattningar kunna göras. Att jämföra specifika tvärsektioners utseende från 1933 respektive 2010 var en annan tänkt utgångspunkt. Det insågs dock att jämförelserna var svåra att använda till någon kalibrering då man inte vet hur utgrävningarna påverkat geometrin i respektive tvärsektion.

Modellen är utvecklad för att kunna modellera transport av sediment i ett dike/kanal. Programmet har sju olika transportekvationer som är anpassade för att modellera sedimenttransport i diken med jordpartiklar större än silt. För lerpartiklar finns det endast en transportekvation som kan samverka med någon av de sju övriga då lerfraktioner förekommer. Helt klart är att modellens utveckling hittills varit inriktad på de större fraktionerna.

Modellresultaten tyder ändå på att modellen skulle kunna fungera för att uppskatta sedimenttransporten från bäcken då ett bra randvillkor anges i form av flödesproportionell sedimenttransport. Det går ej att ge svar på om modellen fungerar för att titta på vad som händer på specifika platser i bäcken. Varken kalibreringsdata eller de randvillkor som används till modellen är tillräckligt tillförlitliga för att kunna kontrollera det. Svårigheten är att bestämma den



mängd jordmaterial som tillkommer till bäcken från åkermarken via ytavrinning på olika platser längs bäckens sträckning.

*Sediment load series* är det randvillkor som bör anges för att ta hänsyn till ytavrinningen. Det konstaterades dock att de data som fanns att tillgå inte var tillräckliga för att ta fram randvillkoren för HEC-RAS HESTAD. Det är svårt att på ett bra sätt uppskatta inflödenas positioner samt att räkna ut hur stora mängder som strömmar in i bäcken vid olika tillfällen. Det krävs fler analyser på olika ställen längs bäckens sträckning.

#### Tvästegsdiken

Trots osäkerhet vid kalibrering studerades förändringar av materialtransport i bäcken vid ändrad geometri med hjälp av modellen. De teorier som de amerikanska forskarna (Miami conservancy district, 2010) har gällande sedimentation av näringsämnen i jordbruksdiken kunde ej styrkas genom modellkörningar av HEC-HESTAD. Teorierna stämmer vid körningar då grövre kornstorlekar är inställda i modellen. Att förväntat resultat inte uppnåddes med de kohesiva kornstorlekarna kan förstås ha sin grund i att HEC-HESTAD inte är tillförlitliga. Det kan också bero på att det är väldigt svårt att förutse vad som händer i bottenmaterialet vid förekomst av lerjordar. För att uppnå sedimentation genom reducerade vattenhastigheter krävs förutom en bra utformad geometri även växtlighet på dikeskanternas avsatser. I artikeln beskriver forskarna att det blev en försening vid konstruktionen av kanalen då regnmängderna inte var de normala vilket gjorde att den tänkta tillväxten uteblev. De tyder alltså på att växtligheten är av stor betydelse. Det gör det svårt att modellera denna sedimentation av samma anledning som nämnts tidigare, det vill säga problemet med att bestämma den parameter som är bestämmande för växtlighet och Mannings skrovlighetskoefficient,  $n$ . Det går därför inte att utifrån modellkörningar förkasta forskarnas teorier om att tvästegsdiken ger en bättre vattenkvalité i jordbruksdiken.

#### Fosforproblematiken

Fosforreserverna håller på att ta slut och enligt vissa forskare kommer reserverna att vara förbrukade inom de närmaste 50 åren. Samtidigt är fosfor nödvändig för att grödorna vi behöver för att överleva skall kunna tillväxa. Det är därför viktigt att inom en snar framtid kunna ta till vara på den fosfor som läcker ut från åkermarken innan den försvinner ut i Östersjön. Att anlägga sedimentationsdammar i de nedre delarna av Östersjöns närliggande avrinningsområden kan vara en möjlighet. För det krävs en stor areal för anläggning som är svår att få till. Ett bra alternativ skulle vara att ta fram metoder för att utforma dikena kring åkermarkerna på ett sätt som gör att mängden näringsämnen som lämnar åkermarkernas avrinningsområden minimeras. För att komma fram till en sådan metod måste man antingen modellera fosforförlusterna eller jämföra mätningar från olika typer av diken och se vilken typ som ger minst förluster. Både dessa tillvägagångssätt beror av många parametrar. Det gör att fosforförluster från åkermark är ett svårlöst problem som det måste läggas mer resurser och forskning på. Mer kunskap om fosfors förmåga att transporteras från åkermark, samt lerjordarnas påverkan av det strömmande vattnet är en förutsättning.

#### Materialtransport i naturliga diken

Sedimentation i svenska jordbruksdiken är en väldigt långsam process som är svår att mäta. Framförallt i naturliga diken med växtlighet som bryts ner och blir till organiskt material och blandas upp i bottenmaterialet för att sedan tillväxa. Det är därför oerhört svårt att studera och ännu svårare att modellera specifika skeden av erosion och sedimentation i ett naturligt dike. Suspenderat material som analyserats i andra projekt i Hestadbäcken är egentligen inte det som eftersträvades med modellen men det är ett mått på när massor sätts i rörelse i vattendra-

get. Fosfor binder sig till små partiklar och det är dessa små partiklar som förekommer i suspension. Därför är det suspenderade materialet i vattendraget ett mått på om det är mycket eller lite partikelbundet fosfor i rörelse i vattendraget. Eftersom den partikelbundna fosfor utgör en stor del av den totala mängden fosfor (tabell 1) ger suspenderat material även en bild av den totala mängden fosfor. Om man kan få en modell av den här typen att fungera skulle det kunna leda till att man genom modellering kan få en bild av ett områdes fosforpåverkan på nedströms liggande vattendrag.

Hestadbäcken är en av Sveriges mest undersökta bäckar. Prover och mätningar har utförts här sedan 1970-talet. Bäckens är bl.a. testområde för SMHIs modell HYPE för storskalig modellering av näringsämnestransporter, som är under utveckling. Det som kan konstateras efter att studerat HEC-RAS modul för sedimenttransport och sedimentation är att de data som finns tillgänglig inte är tillräcklig för att säkert kunna fastställa modulens kapacitet och användningsområden. Det behövs mer specifika data över vad som händer med bäckens bottenmaterial och dikeskanternas material vid inverkan av olika flöden för att på ett tillfredställande sätt kunna kontrollera den här typen av modell.

## 6 Slutsatser

### Modellens användningsmöjligheter

Erosion i ett dike bestäms till stor del av bottenmateriallets egenskaper som i samband med det strömmande vattnets egenskaper ger upphov till den kritiska skärspänningen. I HEC-RAS anges jordmateriallets kohesiva egenskaper av fyra olika parametrar.

- De kohesiva parametrar som har störst påverkan på erosionen är de som styr masserosionen. I ett naturligt dike har även de parametrar som anges för friktionsförluster mycket stor inverkan på materialtransporten.
- Trots brist på kalibreringsdata och möjligheter att fullt ut bestämma nödvändiga parametrar tyder resultatet på att modellen har potential att fungera för att studera variation i materialtransport i ett jordbruksdike.
- Möjligheter till att med HEC-RAS kunna studera erosion och sedimentation på specifika platser i bäcken kan ej säkerhetsställas.

### Nödvändiga mätningar för att kunna köra modellen

Förutom inmätningen av bäckens geometri och identifikation av kornstorlekar krävs uppmätning av de kohesiva parametrarna för att modellen skall kunna köras.

- De fyra kohesiva parametrarna är väldigt svåra att uppskatta då de kan skilja sig mycket mellan olika typer av jordar. Därför anses det nödvändigt att mäta upp parametrarna i laboratorium.
- För att kunna skapa ett randvillkor krävs flödesproportionella provtagningar av suspenderat material, helst inkluderande årets högsta flöden.
- Randvillkor för intransport av sediment från omkringliggande åkermark är också önskvärda för att få en trovärdig kalibrering. Dessa randvillkor är svåra att uppskatta och kräver omfattande mätningar.
- Den parameter som är svårast att uppskatta är Mannings skrovlighetskoefficient,  $n$ . Då  $n$  har stor påverkan på resultatet och inte går att mäta direkt krävs att man har gott om data att kalibrera modellen mot.

## Referenser

- Arulanandan K. och Heinzen R. T. 1977. Factors influencing erosion in dispersive clays and methods of identification, Related Piping, and erosion in Geotechnical Projects, ASTM STP 623, J. L. Sherard and R. S. Decker Eds., American Society for Testing Materials, 1977, pp. 202-217.
- Axelsson V. 2010. Erosion och sedimenttransport.  
<http://home.swipnet.se/valter/Ris.html> (2010-09-29)
- Ekologgruppen. 2010 Riskområden för höga fosforförluster via ytavrinning och vattenerosion från åker. Länsstyrelsen Hallands och Skånes Län.
- Havet.nu. 2010. Övergödning.  
<http://www.havet.nu/?d=31> (2010-12-19)
- Handboken bygg. 1984. Geoteknik, G22 s538-541. LiberFörlag, Stockholm.
- HEC-RAS, 2010a. (US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center) River Analysis System, Hydraulic Reference Manual. Version 4.1, January 2010.
- HEC-RAS, 2010b. (US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center) River Analysis System, User's manual Version 4.1, January 2010.
- Huang J., Hilldale R. C., Greimann B. P. 2006. Cohesive Sediment Transport. Chapter 4, Erosion and Sedimentation Manual. Reclamationen Managing water in the west. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation.
- Hwang, K.N. och A.J. Mehta. 1989. Fine Sediment Erodibility in Lake Okeechobee, Coastal and Oceanographic Engineering Dept., Univ. of Florida, Report UFLICOEL-891019, Gainesville, Florida.
- Johansson, B. och Brandt, M. 2005. Beräkning av ämnestransport. Version 1:0. Naturvårdsverket
- Länsstyrelsen i Stockholms län. 2005. Hur mår sjöar och vattendrag? Rapport 2004:12
- Malgeryd J., Albertsson B., Folkesson Ö., de Marié L. 2008. 64 åtgärder inom jordbruket för god vattenstatus. Rapport 2008:31, Jordbruksverket.
- Malgerd J., Gustafsson J., Heeb A., Kyllmar K., Lans-Strömblad H., Nätterlund H., 2010 Åtgärder mot fosforförluster från jordbruksmark – möjligheter och hinder i praktiken. Delrapport 1 från projekt Greppa Fosfor, 2006–2009. Växtnäringsenheten, Jordbruksverket. SJV offset, Jönköping
- Miami conservancy district. 2010. Getting better water quality from an agricultural ditch.  
<http://newserver.miamiconservancy.org/water/documents/factsheet.pdf> (2010-12-05)
- Roberts, J. R. Jepsen, D. Gotthard, och W. Lick. 1998. "Effects of Particle Size and Bulk Density on Erosion of Quartz Particles," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 124, no. 12, pp. 1261-1267.

SLU, 2010a. Datavårdskap Jordbruksmark. Analysvärden. Databas SLU Jordbruksvatten version 2010:2. [www.slu.se/jordbruksvatten](http://www.slu.se/jordbruksvatten). SLU, Institutionen för mark och miljö.

SLU, 2010b. Datavårdskap Jordbruksmark. Areal specifika månadstransporter. Databas SLU Jordbruksvatten version 2010:2. [www.slu.se/jordbruksvatten](http://www.slu.se/jordbruksvatten). SLU, Institutionen för mark och miljö.

SLU, 2010c. Datavårdskap Jordbruksmark. Areal specifika årstransporter. Databas SLU Jordbruksvatten version 2010:2. [www.slu.se/jordbruksvatten](http://www.slu.se/jordbruksvatten). SLU, Institutionen för mark och miljö.

SLU, 2010d. Datavårdskap Jordbruksmark. Vattenföring. Databas SLU Jordbruksvatten version 2010:2. [www.slu.se/jordbruksvatten](http://www.slu.se/jordbruksvatten). SLU, Institutionen för mark och miljö.

SMHI, 2009. Övergödning av havet.

<http://www.smhi.se/kunskapsbanken/oceanografi/overgodning-av-havet-1.6006> (2010-12-19).

Ulén B. 2005. Forsforförluster från mark till vatten. Rapport 5507, Naturvårdsverket. CM Digitaltryck AB, Bromma

Ulén B., Aronsson H., Bergström L., 2008. Åtgärds katalog för minskade fosfor- och kväveförluster från jordbruk. Institutionen för mark och miljö, SLU Uppsala.

*Muntliga källor:*

Gelin, Hubert, Lantbrukare Hestad Gård, Skärkind.

## Appendix 1

De flesta ekvationer är hämtade från HEC-RAS (2010b). I annat fall anges referens.

**Skärspänning:**  $\tau = \gamma RS$

$\gamma$  = vattnets specifika vikt

$R$  = hydrauliska radien (A/P)

$S$  = energilinjens lutning

**Energiekvationen:**  $Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e$

$Z_1, Z_2$  = kanalens bottenhöjd

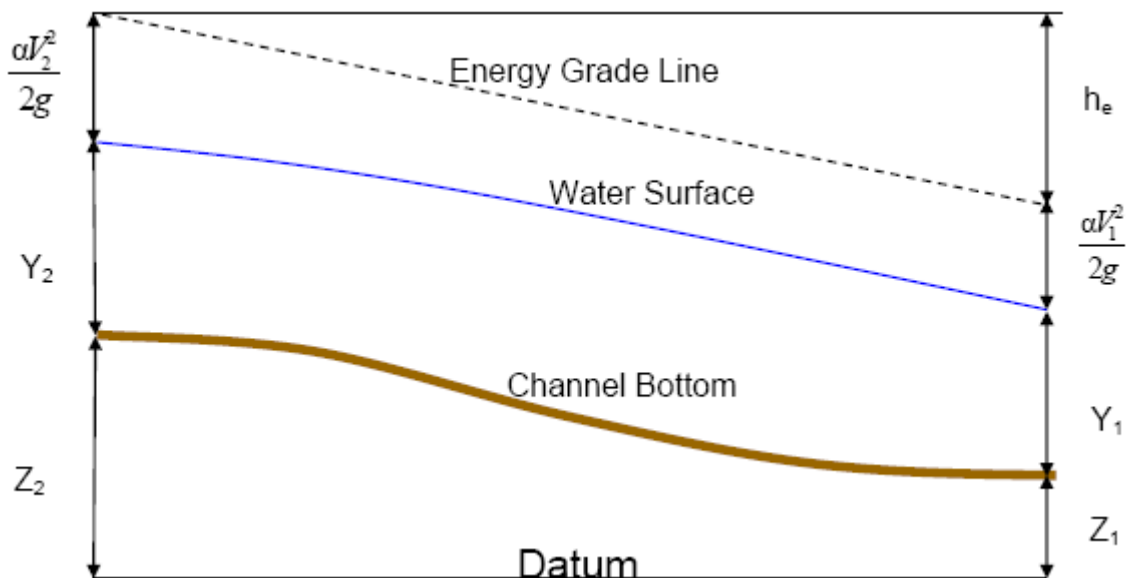
$Y_1, Y_2$  = Vattendjupet i tvärsnittet

$V_1, V_2$  = Medelhastigheter (totalt flöde/total flödesarea)

$a_1, a_2$  = viktningskoefficienter för hastighet

$g$  = gravitationsacceleration

$h_e$  = energiförlust (meter vattenpelare)



Ekvationen för energiförlust: 
$$h_e = L \bar{S}_f + C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right|$$

$L$  = viktad sträckning för flödet

$\bar{S}_f$  = friktionslutning mellan två tvärsnitt

$C$  = expansion eller kontraktionsförlustkoefficient

Ekvation för bestämning av  $L$ : 
$$L = \frac{L_{lob} \bar{Q}_{lob} + L_{ch} \bar{Q}_{ch} + L_{rob} \bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}}$$

$L_{lob}$ ,  $L_{ch}$ ,  $L_{rob}$  = tvärsnittets sträckning specificerat för flöde i vänstra flodbanken, huvud fåran och högra flodbanken.

$\bar{Q}_{lob}$ ,  $\bar{Q}_{ch}$ ,  $\bar{Q}_{rob}$  = Medelvärdet av flödet mellan tvärsnitten för vänstra flodbanken, huvudfåran och högra flodbanken.

**Specifik avrinning:** Specifik avrinning =  $Q$ /avrinningsområdets area

$Q$  = flöde

**Exner-ekvationen:**  $(1 - \lambda_p)B \frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{\partial Q_s}{\partial x}$

$B$  = bäckens bredd

$\eta$  = bäckens höjd

$\lambda_p$  = porositeten i det aktiva lagret

$t$  = tid

$x$  = avstånd

$Q_s$  = transporterad mängd sediment

**Rubey:**  $\omega = F_1 \sqrt{(s-1)gd_s}$

där:  $F_1 = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{gd^3(s-1)}} - \sqrt{\frac{36v^2}{gd^3(s-1)}}$

$\omega$  = partikelns fallhastighet

$v$  = kinematiska viskositeten

$s$  = partikelns specifika gravitationsacceleration

$d$  = partikeldiameter

$g$  = gravitationsaccelerationen

**Krone/Parthenaides (1962):**

Deposition:  $\left(\frac{dC}{dt}\right)_d = -\left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_c}\right) \frac{V_s C}{y}$

$C$  = sedimentkoncentration

$t$  = tid

$\tau_b$  = skärspänning

$\tau_c$  = kritisk skärspänning för deposition

$V_s$  = fallhastighet

$y$  = vattendjup

Erosion: 
$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_e = M \left(\frac{\tau_b}{\tau_c} - 1\right)$$

m = massan av materialet i vattenkanalen

t = tid

$\tau_b$  = skärspänning

$\tau_c$  = kritisk skärspänning för erosion

M = empirisk bestämt värde för erosionshastighet

### Hwang och Metha (1989):

Partikelerosion (ytererosion): 
$$\tau_{se}^c = a_{se} (\rho_{wb} - \rho_l)^{b_{se}} + c_{se}$$

$\tau_{se}^c$  = kritisk skärspänning för ytererosion [N/m<sup>2</sup>]

$\rho_{wb}$  = våt skrymdensitet [g/cm<sup>3</sup> = t/m<sup>3</sup>]

konstanterna  $a_{se}$ ,  $b_{se}$ ,  $c_{se}$  och  $\rho_l = 0,883; 0,2; 0,05$  och  $1,065$

Masserosion: 
$$\tau_{me}^c = a_{me} \rho_{wb} + b_{me}$$

$\tau_{me}^c$  = kritisk skärspänning för masserosion [N/m<sup>2</sup>]

konstanterna  $a_{se}$  och  $b_{me} = 9,808$  och  $-9,934$

Konstant för partikelerosion: 
$$\log_{10} M_{se} = 0.23 \exp\left(\frac{0.198}{\rho_{wb} - 1.0023}\right)$$

### Friktionsförluster

Allmän friktionsformel: 
$$h_f = f \frac{L}{4R_h} \frac{U^2}{2g}$$

Mannings formel: 
$$h_f = \frac{U^2 \times L}{M^2 \times A_v^2 \times R_h^{4/3}}, \quad M = \frac{1}{n}$$

Hydraulisk radie: 
$$R_h = \frac{A_v}{P}$$

f = funktioner av Reynolds tal, Re

$h_f$  = Strömningsförlust

U = vattenhastighet



M = Mannings tal

$A_v$  = våta tvärsnittsarean

$R_h$  = hydraulisk radie

L = längd

P = våta perimetern

n = Mannings skrovlighetskoefficient (anges som input i HEC-RAS)

Vid naturligt, konstant vattendjup och stationär likformig strömning räknas friktionsförluster-  
na med hjälp av halvempiriska formler. Allmänna friktionsformeln och Mannings formel är  
det två mest utnyttjade formlerna. Konstanten f är svår att uppskatta i naturliga sektioner.