

SJÖFARTSVERKET

Sjöfartsverkets rapportserie C
2008-1

Mälarsquat - inmätning och kontroll av fartygs
dynamiska rörelser och djupgående med stöd av RTK.

MÄLARSQUAT

INMÄTNING OCH KONTROLL AV FARTYGS DYNAMISKA RÖRELSER OCH DJUPGÅENDE MED STÖD AV RTK

SLUTRAPPORT



M/T BW Helen på väg in i Södertäljeslussen

MÄLARSQUAT

INMÄTNING OCH KONTROLL AV FARTYGS DYNAMISKA RÖRELSER OCH DJUPGÅENDE MED STÖD AV RTK

SLUTRAPPORT

Datum: 2008-04-01

Projektledare	Ulf Olsson
Projektplanering	Lars Jakobsson
Projektplanering	Johnnie Blom



SJÖFARTSVERKET

601 78 Norrköping
Tel: 011-19 10 00
Fax: 011-10 19 49

Innehållsförteckning

Sammanfattning	1
Inledning	3
Målsättning	4
Förberedelser	5
Beskrivning av fartyg, mätsystem och sensorer	5
Fartyget.....	5
Fartygsdata <i>BW Helen</i>	6
Mätsystem och sensorer.....	6
Installation och kalibrering	7
Installation av mätsystemet.....	7
Kalibrering av mätsystemet	8
Farledsbeskrivning Södertälje-Köping	9
Metodbeskrivning	11
Transformationer	11
Offsetberäkningar	11
Djup och höjder	12
Vattenstånd	13
Loggning av data	13
Beräkningar.....	13
Analyser.....	14
Squat-analys	14
Analys av dynamiskt djupgående för alla offsetpunkter.....	15
Analys av marginal (bottenklarning) mellan fartygsbotten och sjömått botten	15
Analys av trim	16
Analys av Roll	16
Datainsamling	17
Grundläggande om Squat	18
Squat - definition	18
Froude talet	19
Blockkoefficient	19
Farledsutformning.....	19
Fart.....	20
Squatformler	20
Resultat	20
Allmänt	20
Squatanalys	21
Analys av dynamiskt djupgående	22
Bottenklarning	25
Trim och Roll.....	25

Kombinerat dynamiskt djupgående	26
Noggrannhetsanalys.....	28
RTK positionen och tillgängligheten	28
Attitydmätning	28
Vattenstånd	28
Sjömättningsnoggrannhet	29
Felbudget	29
Utvärdering av mätmetoden	30
Möjligheter i framtiden	31
Slutsatser	32
Rekommenderad konfiguration av mätsystem.....	33
Visualisering av dynamiska rörelser	34
Medverkande utanför projekt och referensgrupp	35
Fältsamordning	35
LMV SWEPOS.....	35
Mälaragent AB.....	35

Sammanfattning

I början av 2007 utförde Sjöfartsverket en undersökning av ett fartygs dynamiska rörelser under sju resor mellan Södertälje och Köping i Mälaren. Det aktuella fartyget är en gastanker, BW Helen, som går regelbundet med ammoniak mellan Polen och Köping. Den nödvändiga tredimensionella precisionspositioneringen utfördes med Nätverks-RTK (NRTK) som ger en positions noggrannhet på centimeternivå. Projektets målsättning var att undersöka den dynamiska djupgåendeförändringen beroende av fart, trim, bottendjup och gir. En squat-tabell baserad på insamlade data för det aktuella fartyget skulle också om möjligt tas fram. Den använda metoden för fastställandet av de dynamiska rörelserna skulle även utvärderas med avseende på tillförlitlighet och tillgänglighet.

Undersökningen har gett trovärdiga och enhetliga resultat vilket visar att metoden som använts har fungerat på ett tillfredställande sätt. De problem som förekommit har främst berott på bristfällig tillgänglighet till NRTK som orsakats av dålig GSM-täckning i vissa områden. Tillgängligheten har generellt legat på ca 80% förutom en resa som endast hade 50%. Vissa problem förekom med de alternativa metoder som användes för mätning eller beräkning av de dynamiska rörelserna. Detta har dock inte påverkat resultatet utan bidragit till nyttiga erfarenheter.

Resultatet visar god överensstämmelse med de teoretiska squatformler som normalt används. Squat-värden på dryga metern förekom i de grunda områdena i farleden. Förutom squat förekom också andra dynamiska fenomen såsom djupgåendeförändring beroende av gir och fartförändring. Under gir rollar fartyget beroende av farten och därmed ökar djupgåendet. Rollvinklar på mellan 3-4 grader förekom under resorna vilket ökar djupgåendet med ca 0,4 meter. Maximalt rollvärde på 6 grader förekom under första lastresan. En medveten fartförändring orsakar en trimförändring och därmed också en djupgåendeförändring. En minskning av farten får förskeppet att trimma nedåt varvid djupgåendet förut ökar samt minskar akterut. Omvända förhållandet gäller vid en fartökning. Storleken på djupgåendeförändringen låg mellan 0,1 och 0,2 meter.

De olika förekommande dynamiska företeelserna, squat och djupgåendeförändringar beroende av gir och fartförändring, är oberoende av varandra och kan förekomma var och en för sig eller i kombination. Dessa summerades därför till ett kombinerat dynamiskt djupgående. De resulterande kurvorna indikerar en djupgåendeökning upp mot 1,5 meter i det högre fartregistret och kan anses beskriva den största djupgåendeökning som kan förekomma baserat på observerade data.

Fartygets framförande har påverkats av 12 kn fartbegränsning i de områden som varit istäckta och storleken på fartygets rörelser (dynamiska beteende) har därmed reducerats i dessa farledsavsnitt. Isläggnings omfattning har varierat för de olika resorna. Fartygets rörelser i de isbelagda områdena kan därför förväntas vara större utan fartbegränsning.

De områden där fartyget haft ett dynamiskt djupgående större än 7.6 meter har visualiserats speciellt med samtliga data i diagram samt översiktsbild. Dessa återfinns i bilaga 11 och kan användas för särskilda studier av grunda och kritiska avsnitt i farleden. Det är främst områdena strax före och efter Hjulstabron, Aggarö, Flaten, Klovstenen samt i området från Skylgrund och in till Köpingrännan.

En felbudget upprättades för beräkning av förväntad noggrannhet på de positionsberäkningar som utfördes. Förväntat maximalt vertikalt fel ligger på ca 0,2 meter inom 95% vid beräkning av dynamiskt djupgående. Motsvarande för beräkning av bottenklarning, som även omfattar djupdatanoggrannhet, ligger på ca 0,35 meter. Maximalt horisontellt fel ligger på ca 0,5 meter för båda beräkningarna. Kontroller av använda sensorer i positionssystemet visade att noggrannheten låg väl inom upprättad felbudget.

Rapporten är tekniskt utformad med en uttömmande metodbeskrivning och redogörelse för de faktiska dynamiska förhållanden som förekom i farleden under resorna. Målgruppen för rapporten är nautiker och personal sysselsatta med farledsdesign men skall även kunna användas som stöd vid framtida undersökningar för bestämning av ett fartygs dynamiska rörelser. Notera att bilagorna till den digitala versionen är samlade i ett separat dokument eftersom dessa är många till antalet och totalt sett en mycket stor fil. Separat innehållsförteckning finns i början av bilagan.

Inledning

Denna rapport redovisar inmätning av ett fartyg och fartygets dynamiska rörelser under ett begränsat antal resor mellan Södertälje och Köping i Mälaren. Det skall noteras att inte alla fartyg uppför sig på samma sätt som det aktuella fartyget. Parametrar som undervattens-kroppens hydrodynamiska utformning, blockkoefficient, djupgående, initialtrim och fart mm. påverkar de dynamiska egenskaperna hos ett fartyg. Likväl inverkar farledens utformning som bottendjup, bottenbeskaffenhet, bredd, fysiska farledsbegränsningar mm.

Mätningar, analyser och presentationer av fartygets rörelser har gjorts relativt tillgängliga djupdata samt relativt vattenytans referensnivå och relativt aktuell vattenyta. Resultatet måste värderas tillsammans med de redovisade noggrannheter som diskuteras under avsnittet noggrannhetsanalys.

Ingen hänsyn har tagits till fartygets eventuella skrovdeformationer såsom ”hogging”, ”sagging”, etc. Analyserna förutsätter således att fartygsskrovet är helt stabilt och utan interna rörelser.

Ulf Dyberg, Farledsavdelningen, inkom i september 2006 med en begäran att en genomförandeplan skulle utformas för undersökning av ett fartygs dynamiska rörelser och djupgåendeförändringar. Undersökningen skulle ske under ett fartygs ordinarie rutt i Mälaren med förväntan att den nödvändiga tredimensionella positioneringen skulle utföras med Nätverks-RTK (NRTK, avancerad satellitbaserad positionering).

Den satellitbaserade positionstekniken NRTK möjliggör ytterst noggrann dynamisk tredimensionell positionering för fartyg under gång över stora områden. I andra sammanhang har konstaterats att 95% av de horisontella positionerna varit behäftade med fel mindre än 3 cm och motsvarande höjdfel mindre än 5 cm. I detta fall påverkas dock mätresultaten även av fel i andra sensorer, av extrapoleringar, av skrovdeformationer, fel i vattenstånd och av fel i djupdata (sjömätningunderlag). Det är av stort intresse att kunna bestämma ett fartygs orientering och dynamiska djupgåendeförändring i realtid. Tillsammans med en noggrann avbildning av bottenprofilen ger detta en relevant bild över de förväntade och uppkomna dynamiska rörelserna hos ett fartyg.

Squat är förödande för ett fartyg, dels genom en djupgåendeökning som är beroende av farten i förhållande till djup under köl, dels genom att motståndet genom vattnet ökar kraftigt och därigenom ökar bränsleförbrukningen och bränslekostnaderna. *Squat* börjar påverka ett fartygs dynamiska egenskaper vid ett djup under köl som motsvarar mellan fem och sju gånger fartygets aktuella djupgående och dess inverkan ökar sedan exponentiellt med minskat djup under kölen. De formler för beräkning av *squat* som är framtagna kan endast användas generellt eftersom dessa bygger på olika standardfartygs undervattensskropp. De befintliga handelsfartygens undervattensskroppar varierar varför formlernas resultat kan avvika avsevärt mot verkligheten. Det är få publicerade resultat som verkligen visar ett fartygs dynamiska

förändringar i alla dimensioner såsom ökat djupgående, trimförändring (pitch) samt djupgåendeförändring under gir (roll).

Höjdinformationen som skapas med den relativt nya RTK-tekniken har gjort det teoretiskt möjligt att bestämma ett fartygs dynamiska djupgående och rörelser med tillräcklig noggrannhet i alla dimensioner. Det är av stort intresse att också kunna visa att detta gäller även i praktiska tillämpningar.

Bengt Holmstrand, Fältsamordning, utsåg 2006-10-06 en planeringsgrupp som skulle göra en förstudie samt ta fram ett förslag till en plan för undersökningen. En sådan plan redovisades 2006-11-30 på Sjöfartsverkets huvudkontor i Norrköping. Under samma möte beslutades att undersökningsprojektet skulle startas.

Målsättning

Målsättningen med denna studie är att undersöka ett fartyg dynamiska djupgåendeförändringar under gång vid olika farter och bottendjup, på rak kurs och i samband med gir. Särskilt skall effekten i förhållandevis grunda områden studeras. Studien kan också ge viktig information som stöd till navigering i farleden Södertälje-Västerås-Köping. Studien bör också ge värdefull information om Nätverks-RTK, avseende noggrannhet och tillgänglighet, i Mälaren.

Den primära målsättningen är att ta reda på:

- Fartygets djupgåendeökning i varierande farter och på olika djup.
- Fartygets djupgåendeökning som orsakas av slagsida under gir i varierande farter och på olika djup.
- Fartygets djupgåendeförändring i för och akter (trim), i varierande farter och på olika djup.
- Marginal mellan fartygsskrov och farledsbotten (baserat på befintligt djupunderlag).

Övrig information som är av intresse att undersöka:

- Analysera olika sensorers noggrannhet.
- Analysera noggrannheten i den interna transformationen av fartygets offsetpositioner.
- Ta reda på lämplig kalibreringsmetod av systemet i Södertälje och Köping (ankomst/avgång till/från sluss/kaj).
- Ge underlag för utveckling av system och programvara som kan användas av handelsfartyg för fastställande av dynamiskt djupgående i realtid.

Förberedelser

I december 2006 färdigställdes planen för projektet, ”Plan för undersökning av dynamisk djupgåendeförändring för fartyg under gång i Mälaren med hjälp av avancerad GPS (RTK)”, 2006-12-10.

Förberedelser för projektet utfördes under december 2006 och innefattade sammansättning av projektgrupp, referensgrupp och extern referensgrupp, val av fartyg, beräkning av referensnivåer, planering av vattenstånd och landbaserade fixpunkter (avsedda för inmätning av fartyget) samt planering av de praktiska detaljerna för installation av mätutrustningen ombord. Projekt och referensgruppernas sammansättning, se bilaga 1.

Vid val av fartyg användes kriterier som längd, bredd, djupgående, blockkoefficient och antal resor i Mälaren per månad. Slutligen valdes fartyget BW Helen (ex. Baltic Viking) som hade överlägset flest resor. Efter förfrågan och godkännande från rederiet BW Gas i Norge och fartyget ifråga, så planerades etablering av antenner och övrig utrustning ombord.

Fixpunkter etablerades på kajen i Södertäljeslussen samt på de två kajer som fartyget normalt använde i Köping. Dessa skulle användas för att koppla samman höjddata från Nätverks-RTK med rikets höjdsystem RH2000, eller med andra ord, ansluta fartygets referenspunkter till RH2000.

Som Mälarens referensnivå valdes 0,79 meter i RH2000. Skillnaden mellan RH2000 och Mälarens referensnivå beräknades för aktuella vattenståndsmärken. I januari etablerades fem vattenståndsmätare vid Sjöfartsverkets vattenståndsmärken: 183 Södertälje Övre, 185 Hjulstabron, 307 Västerås djuphamn, 305 Kvicksund och 188 Köping hamn. Dessa anslöts till Mälarens referensnivå.

Mätutrustningen som skulle användas ombord provkördes vid Karlsro i Norrköping och installerades därefter då fartyget låg till kaj i Köping.

Beskrivning av fartyg, mätsystem och sensorer

Fartyget

Fartyget BW Helen är en LPG (Liquid Petroleum Gas) tanker som går med flytande ammoniak på en 15 års charter för Norsk Hydro mellan Polen och Köping. Fartyget gör två lastresor per vecka med ca 4000 ton från Polen till Köping, i princip året om. Bemanningen består av Norsk befälhavare och maskinchef. Övriga befäl är varierande Europeisk och Filippinsk. Manskapet är från Filipinerna.

BW Helen byggdes som *Baltic Viking* år 2000 i Korea. Hon bytte namn år 2006 till *BW Helen* i samband med byte från ”*Barber Ship Management AS*” till ”*BW Gas ASA*”. Fartyget ägs av ”*Carbonor Shipping Netherlands B.V.*” som ägs av ”*BW Gas*” som ingår i ”*BW Group*”. *BW*

Helen har Norsk flagg med hemmahamn Oslo och är registrerad i NIS. Fartyget är mycket välskött och har en väl inarbetat rutin för traden mellan Polen och Köping. Sommardjupgåendet är på 7,75 meter och fartyget går alltid med slack i lasttankarna (ej helt fyllda tankar) vid ett statiskt djupgående på 6,8 meter.

FARTYGSDATA <i>BW HELEN</i>		
IMO no.: 9207039	Summer draft: 7,75 m	DW: 6875 M/T
Call Sign: LANH5	Loa: 116 m	GRT: 5831
Iceclass: 1A	Lload (7,75 m): 108,9 m	NRT: 1750
Propeller: c/ pitch	Beam: 15,96 m	Speed: ~18 kn



Bild 1. M/T BW Helen (ex. Baltic Viking)

Mätsystem och sensorer

För att kunna bestämma fartygets horisontella position, höjd och dynamiska djupgåendeförändring krävs kontinuerlig och noggrann tredimensionell positionering samt information om fartygets orientering i de tre dimensionerna: Roll (slagsida), Pitch (trim) och Heading (fartygets längskeppsriktning).

För att kunna beräkna fartygets djupgående och höjd i önskade offsetpositioner runt om i fartyget krävs en intern förflyttning av den tredimensionella positionen med hjälp av roll, pitch och heading. Beräkning kan ske online med positionsprogram eller beräknas i efterhand.

Den tredimensionella positioneringen baserades på Lantmäteriverkets SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst. Mottagarna ombord utgjordes av tre Topcon Odysse RS med L1/L2 frekvens GNSS-mottagare (*Global Navigation Satellite System*) med möjlighet att ta emot satellitsignaler från både GPS och GLONASS. Data från SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst togs emot med GSM telefonmodem ”Fargo Maestro 20” med Telia abonnemang.

Enligt den ursprungliga planen skulle mätning av Roll, Pitch och Heading ske med en MRU (Motion Reference Unit) ”Octans II”, men på grund av haveri ersattes denna med en ”TSS DMS-05” som endast ger roll och pitch. Heading beräknades i stället med funktionen ”RTK Gyro” i positionsprogrammet. ”RTK Gyro” beräknar heading med hjälp av RTK-positioner från två satellitantenner monterade på fartyget.

Som positionsprogram och insamlingsmjukvara användes Eiva Navipac NT som varje sekund transformerade Nätverks-RTK-positionen från geografiska till plana koordinater. Programmet beräknade samtidigt positioner för ett antal definierade offsetpunkter i fartyget med hjälp av roll och pitch från MRU samt heading från RTK Gyro.

Övrig utrustning bestod av PC för insamlingsprogrammet, dataloggning och uppringning med GSM modem. PC:n hade en ansluten ”Rocketport” med Com-portar. En Com-port Switch användes för att skifta mellan uppringning och mottagning av SWEPOS-data.

Se bilaga 15

Installation och kalibrering

Installation av mätsystemet

Utrustningen installerades vid två tillfällen då fartyget låg till kaj i Köping. Satellitantennerna monterades på tillverkade master som placerades på styrbord respektive babord sida nära förkant på toppbryggan och en i centerlinjen på förkant av skorsten. Masterna på toppbryggan var 3,5 meter höga vilket medförde minimal maskning av satelliter från fartygets toppmast. Den tillverkade masten på skorsten var ca 2 meter hög och monterades ca en meter för om och ungefär i höjd med skorstenspiporna. Alla satellitantennerna hade en uppskattad maskvinkel från fartygets toppmast på ca 10 grader horisontellt och 15 grader vertikalt. Antennkablarna drogs genom en nytillverkad svanhals ner till ett instrumentrum på akterkant bryggan. Vid första monteringen av antennmasterna visade det sig att dessa svajade mer än acceptabelt och dessa stagades därför upp med snedställda rör.

GSM-antennen för modemmet installerades först på styrbord sida i akterkant av toppbryggan. Detta var inte en optimal placering eftersom den var nära fartygets egna GSM-antennerna plus övriga mastkonstruktioner som troligen förorsakade problem med uppkopplingen mot SWEPOS Nätverksserver. Dessutom var antennen av en enklare modell och byttes senare ut mot en med bättre prestanda och placerades väl fri från övriga radioantennerna på babord sida av toppbryggan.

I instrumentrummet på bryggan installerades övrig utrustning såsom MRU, GNSS-mottagare, PC med insamlingsmjukvara, mm. MRU:n monterades på en 10 mm tjock aluminiumplatta i fartygets centerlinje som fixerades till de aktra skottspanten med skruvtvingar.

Se bilaga 17.1-17.3.

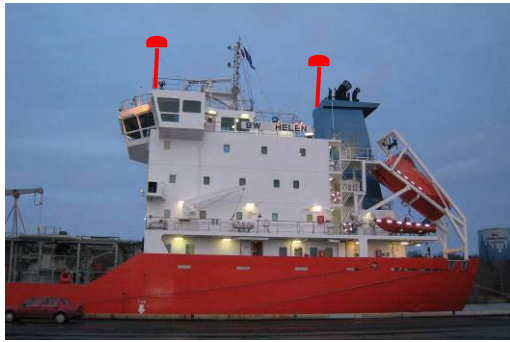


Bild 2. Placering av satellitantenner (röda)

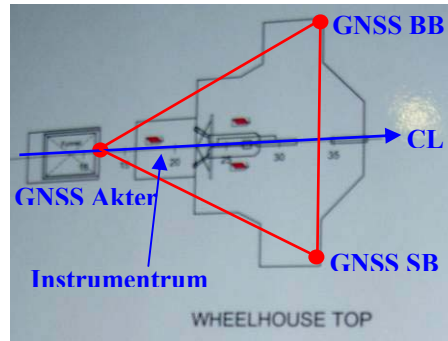


Bild 3. Placering av antenner på Toppbryggan

Kalibrering av mätsystemet

Kalibreringen utfördes då fartyget låg lastad till kaj och väntade på lossning i Köping. Vid fixeringen av MRU:n konstruerades en linje parallell med styrbordsskottet i instrumentrummet för att ensa fartygets längskeppslinje med MRU:ns interna längskeppsaxel. Vinklarna för Roll och Pitch jämfördes med beräknade vinklar från upprepade avläsningar av fartygets djupgående. För det sistnämnda utnyttjades fartygets sex åmningar: för, midskepps och akter på respektive styrbords och babordssida. Resultande vinkelkorrektioner lades in i insamlingsmjukvaran Navipac NT. Vid kalibreringen av MRU:n konstaterades att fartyget rörde sig till kaj och att det dessutom var svårt att komma åt att läsa av djupgåendet midskepps och framför allt den aktra åmningen på den sida som låg från kajen. Noggrann djupgåendeavläsning försvårades dessutom av snö och is. Trots att fartyget inte hade någon lossnings eller ballastaktivitet hann rollvinkeln förändras tillräckligt för att ha en inverkan på kalibreringsresultatet under tiden för en komplett djupgåendeavläsning. Dock lyckades det att få till några avläsningsserier då fartyget låg någorlunda stilla och avläsningarna kunde korrigeras med relativa vinkelskillnader mellan observationerna. En mindre korrigerings av roll- och pitch-vinklar gjordes efter dataloggning av den första lastresan med stöd av en efterföljande kalibreringskontroll.

Satellitantennernas inbördes baslinjer mättes in med RTK då fartyget hade nära noll i roll- och pitch-vinkel. Avståndet för baslinjen mellan styrbords och babords antenner kontrollerades med måttband. Den horisontella positionen på styrbords och babords antenner i fartygets interna koordinatsystem mättes in med tumstock från förkant och från styrbord respektive babord sida av akterbygget. Positionen för den aktra antennen beräknades med geometri från de andra antennerna med hjälp av antennernas interna baslinjer. De aktuella roll- och pitch-vinklarna var vid inmätningen så små att de inte påverkade resultatet.

Höjderna för styrbords och babords antenner över toppbryggans däck bestämdes med måttband. RTK-höjder loggades samtidigt som avvägning utfördes mellan alla tre antennerna. Höjderna korrigerades för aktuella roll- och pitch-vinklar varvid höjdrelationen mellan de tre antennerna kunde beräknas samt refereras till fartyget.

För att kunna referera fartygets RTK-höjd till höjdsystemet RH2000 gjordes höjdavvägning från en inmätt höjdfix på kajen till en punkt på fartyget. Den avvägda höjden plus avståndet upp till satellitantennen jämfördes med RTK-höjden. För att reducera den RTK-bestämda höjden över ellipsoiden till höjdsystemet RH2000 användes geoidmodellen SWEN05^{RH2000}. Se bilaga 2 för kalibreringsresultat.

Farledsbeskrivning Södertälje-Köping

Mälarfärleden börjar i Södertälje sluss efter färd från Landsort genom skärgården. Mälaren är ingen sjö i traditionell bemärkelse utan kan ses som en fortsättning av skärgården med den skillnaden att området är avgränsat med låga slussar vid två platser och att sjön består av söt-vatten. Sträckan Södertälje-Köping är 68 Nm och tar normalt mellan 6 och 7 timmar beroende på fartygsmöten och broöppningar.

Södertälje kanal är sprängd/grävd genom de centrala delarna av Södertälje. Kanalen vidgar sig sedan efter passage av Mälaron och Snäckviken passeras varefter man kommer in i Lina-sundet. Denna första del av resan är tämligen grund och farten är begränsad till 6 knop. Förbi Kiholmen och ut till Viksberg är farten begränsad till 8 knop och det blir djupare här, ca 20-25 meter. Efter Viksberg vidgar sig Södertäljeviken som sedan övergår i Björkfjärden med djupt vatten. Ingen begränsning av farten behövs förrän Totfaholmar utanför Adelsö passeras, där en frivillig hastighetsbegränsning är införd p.g.a. klagomål från sommarstugeägare.

Adelsö passeras och man kommer ut på Prästfjärden, den djupaste delen av Mälaren, med över 50 meters djup som mest. Här är det gott om manöverutrymme och leden fortsätter förbi Selaön upp mot passagen av Grönsösund. Detta sund är mellan 25-30 meter djupt men tämligen smalt och med en skyddsvärd byggnad på en brygga nära färleden, varför farten är begränsad till 7 knop. Vidare förbi Flatgarn och Bryggholmen där det blir smalare men djupet är fortfarande inte begränsande.

Hjulstabron börjar sedan närma sig där det är grunt och med många mycket kraftiga efterföljande girar. Det blir grunt redan när man passerar Koholmen, där bron kontaktas för öppning, varför farten minskas till ca 12 knop innan dess. Farten begränsas till 7 knop vid passage av brohålet. Strax innan ligger Isaksgrundet där tidigare en lokal uppgrundning (sten) på mindre än 7,6 meters djup identifierats som numera är bortplockad av dykare. Området är mycket grunt och smalt. Sug uppträder både från botten och från sidorna. Här kränger fartygen ofta p.g.a. de skarpa girarna. Efter "Hjulstasvängarna" passeras sundet mellan Toppvik och Gisselholmen där det också är grunt på östra sidan. I Hjulstaområdet måste andra fartyg passeras med stor försiktighet. Stora fartyg bör mötas utanför det grunda och smala området. Hjulstabron används ibland för möten, då det är en svängbro med två hål och dubbelriktad trafik.

Nästa lilla fjärd heter Gisselfjärden och Hallingen passeras därefter. Här är det grunt och fartminskning måste ske för att undvika kraftiga tryckstötter i skrovet från botten. Bojarna vid

Pilgrundsklack och Fagerön har utgrundningar på 7,6 meter från farledssidan och måste passeras med extra stort avstånd. Granfjärden breder sedan ut sig och är djup i början men vid bojparet Granfjärdsklack är djupet och farledsbredden begränsad och måste passeras sakta. Det är grunt hela vägen förbi Lilla Aggarö där botten består av berg och känns mycket tydligt i de flesta fartyg. Ridöfjärden söder om Västerås är också tämligen grund med flera 7,6 meters uppgrundningar. Här delar sig farleden mot Västerås och Köping. Efter passage av Sandskär viker leden av norrut mot Västerås. Leden mot Köping går söderut mellan Flaten och Högholmen där det är grunt.

Väl ute på Blacken som är en stor fjärd är det möjligt att öka farten då djupet mestadels är större än 20 meter. Dock finns uppgrundningar på flera ställen, bl.a. mellan Stavskallen och Torshälla. Här kontaktas Kvicksundsbron för att få information om när bropassage är möjlig med avseende på tågtrafiken. Hela Galten fjärden, efter Kvicksundsbron, är grund med skarpa girar. Efter Skylgrund är det i princip en bojmarkerad muddrad kanal, med synkroniserade bojljus, vilket underlättar navigeringen väsentligt. Vid minsta avvikelse från idealspåret påverkas fartyget av tydliga sug effekter. Broken rundas och därefter återstår bara en raksträcka upp emot Oljehamnen. Från Linlandet är det en hastighetsbegränsning på 7 knop som minskar till 5 knop vid Oljehamnen. Efter passage av en sista krök är man framme i Köping Djuphamn.

[Farledsbeskrivning av Stefan Petersson, Lots Mälaren/ Landsort, med mindre tillägg]



Bild 4. Farleden Södertälje – Köping

Metodbeskrivning

För positionsinsamling och för att bestämma en kontinuerlig position för respektive offsetpunkt i fartyget användes programmet Navipac NT. I detta avsnitt följer en beskrivning av den positionstransformation som utfördes i realtid, använda referenssystem och referensnivåer samt de beräkningar och analyser som gjordes på insamlat data.

Transformationer

Med stöd av Navipac NT transformeras den tredimensionella positionen (latitud, longitud och höjd över ellipsoiden) som erhållits från Nätverks-RTK till plana koordinater i meter (*Northings*=*N* och *Easting*=*E*) i SWEREF99 TM och höjd (*h*) i RH2000. Höjden över ellipsoiden reducerades till RH2000 med geoidmodellen SWEN05^{RH2000}. Därefter korrigerades höjden från RH2000 till Mälarens referensnivå genom ett fast tillägg. Tillägget var beräknat som ett medelvärde av de fem vattenståndsmärkenas relation mellan RH2000 och Mälarens referensnivå. Ytterligare korrektion för identifierade höjdavvikelser i fartyget kan läggas till om nödvändigt. Ingen korrektion behövdes i detta fall eftersom avvägningen från känd punkt på kajen i Köping respektive Södertälje visade bra överensstämmelse med Nätverks-RTK-höjderna ombord.

Referenspunkten (origo) i det interna koordinatsystemet (*x,y,z*) definierades som akterbyggets förkant i fartygets centerlinje och 6,8 meter ovanför fartygsbotten. De tre GNSS-antennerna och MRU:n definierades i det interna koordinatsystemet med de inmätta och beräknade tredimensionella avstånden relativt referenspunkten.

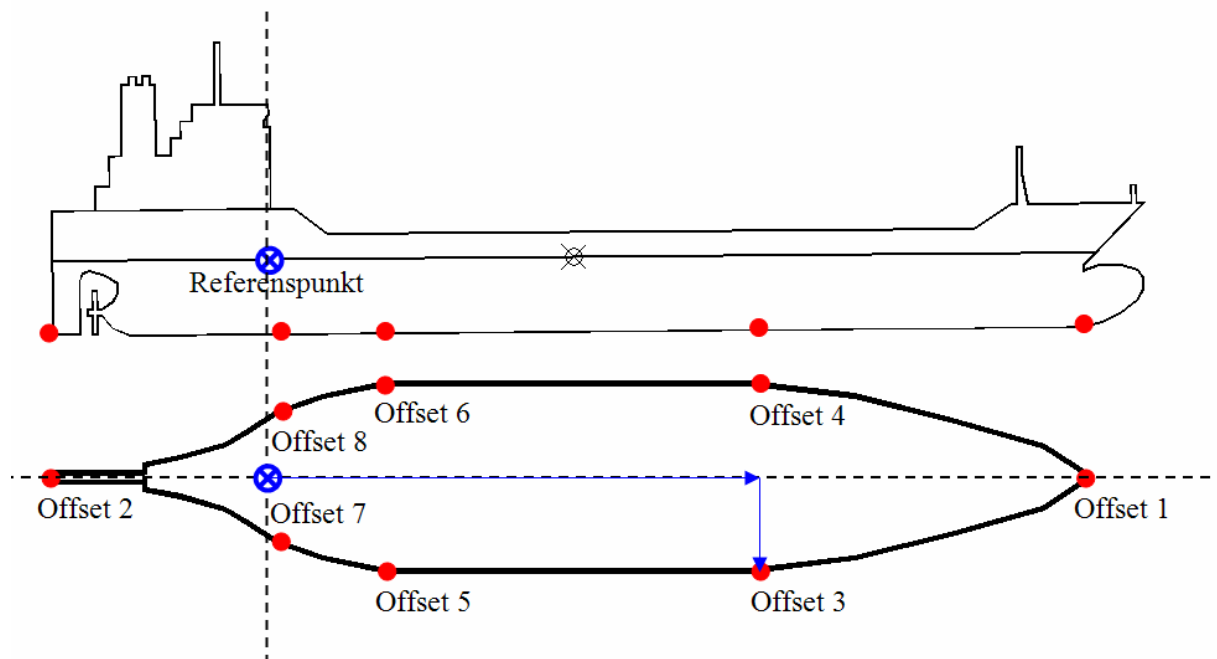
Offsetberäkningar

Åtta offsetpunkter definierades i fartygets botten, en förut och en akterut i centerlinjen samt tre offset-par bordvarts där slaget viker upp mot fartygsidan. Avstånden längskepps respektive tvärskepps från referenspunkten beräknades med hjälp av antal spant med spantavstånden tagna från konstruktionsritningen. Se figur 1.

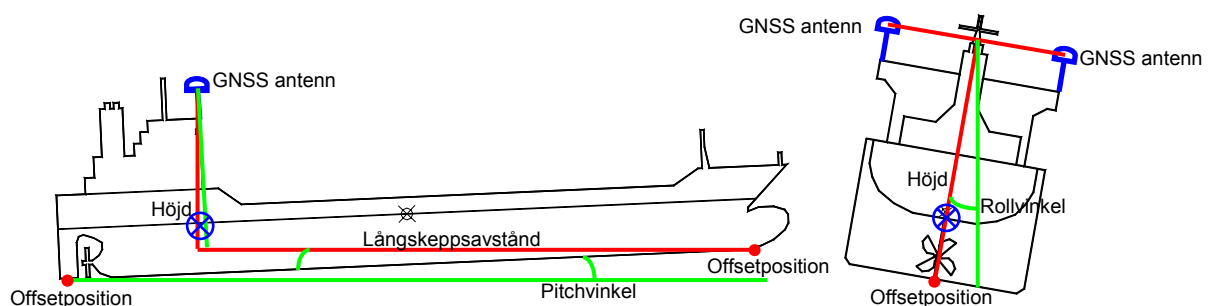
Den transformerade satellitantennens position i plan och höjd (*N,E,h*) förflyttas ner till respektive offsetpunkt. Beräkningen sker online och använder Tait-Bryant (Euler angles) transformation med vinklar för roll och pitch. För varje offsetpunkt beräknas en tredimensionell vektor som beror av fartygets roll och pitch. Vektorns vertikala komponent (*h*) ger höjdkorrigering för aktuell offsetpunkt. Vid beräkning av offsetpunkternas plana koordinater (*N,E*) används den horisontella delen av vektorn tillsammans med information om heading. Se figur 2.

De båda positionerna från styrbord respektive babords antenner slogs ihop till ett medelvärde i Navipac NT och användes för vidare beräkning av offset-positionerna. Detta medförde att mindre avläsningsfel i rollvinkel från inmätningen av antennernas höjder eliminerades. Vid enstaka tillfällen då positionen var dålig från en antenn delades positionen tillfälligt upp för

att kunna fortsätta logga bra positionsdata. Den aktra antennen användes som kontroll av den sammanslagna positionen från styrbord respektive babords antenner.



Figur 1. Referenspunkt och Offsetpositioner



Figur 2. Interna offsetberäkningar

Djup och höjder

De resulterande höjderna i referenspunkten och offset-positionerna refererar till Mälarens referensnivå. Dessa positioner kan direkt jämföras mot ett befintligt djupunderlag som har samma referenser. Se bilaga 3. Referenspunkten har en framräknad relation till fartygets åmningar. Därmed kan aktuell vattenyta, genom djupgåendeavläsningar på fartygets åmningar, refereras till Mälarens referensnivå. Aktuellt vattenstånd kan beräknas förutsatt att djupgåendet kan avläsas och förutsatt att fartyget inte utsätts för dynamisk påverkan. Omvänt, och viktigare i detta sammanhang, så kan fartygets dynamiska rörelse i vertikalled beräknas förutsatt att vattenståndet är känt. Se bilaga 4.

Vattenstånd

De etablerade vattenståndsmätarna i Södertälje, Hjulstabron, Västerås, Kvicksund och Köping etablerades till Mälarens referensnivå. Vattenståndet som loggades var 10:e minut jämfördes inbördes under hela tidsperioden och konstanta nivåskillnader som beräknades mellan mätstationerna eliminerades. Serierna jämfördes även mot data från SMHIs och SjöVs (ViVa) automatstationer.

Tillfälliga skillnader i vattenstånd mellan de olika vattenståndsmätarna skulle användas för att kunna korrigera fartygets höjder för aktuell resa och tidpunkt och därigenom kunna beräkna fartygets dynamiska djupgående. Se bilaga 4.

En avvägd vattenståndskala i anslutning till Södertäljesslussen användes då fartyget låg stilla i slussen under lastresorna för jämförelse mot fartygets beräknade RTK vattenstånd.

Loggning av data

Tre olika typer av data loggades: plana koordinater med höjd i Mälarens referensnivå, geografiska koordinater med ellipsoidhöjd samt råavstånd från satelliterna. Data loggades med en sekunds intervall.

De plana koordinaterna loggades i Navipac NT programmet och bestod av Northing, Easting och höjd för referenspunkten samt motsvarande för alla åtta offsetpositionerna. I samma fil loggades även tid, roll, pitch och heading. Se bilaga 16.1.

De geografiska koordinaterna loggades via en terminal i Navipac-programmet för alla tre satellitmottagarna. Formatet är ett internt Topcon-format, ”NP”, som är ett utökat GGA format som förutom tid, latitud, longitud, höjd över ellipsiden, HDOP, antal satelliter, mm. även innehåller kvalitetsvärden för positionen samt information om GLONASS. Dessa data skulle användas för att efterberäkna roll, pitch och heading. Det visade sig dock att denna loggning inte fungerade utan data blandades från alla tre mottagarna slumpmässigt i de tre olika loggfilerna. Se bilaga 16.2.

Satelliternas råavstånd loggades i Topcons (GNSS-mottagarnas) egen mjukvara PCCDU. Dessa data var tänkta att efterprocessas och användas för att fylla igen de hål som uppstod vid tappad RTK-position och loggades inte under de tre första resorna.

Beräkningar

Innan några beräkningar utfördes togs dåliga värden och uppenbara positionsstörningar bort (”positionshopp” orsakade av tappad RTK fixlösning). För att minimera den naturligt förekommande variationen på 2-3 centimeter i den RTK-baserade höjdmätningen så jämnades denna ut med ett flytande medelvärde under 11 sekunder. Det fungerade bra för referenspositionen och för offsetpunkterna 1 och 2 (för och akter). Olyckligtvis filterades samtidigt de rollinducerade topparna bort på de offsetpunkter som befann sig i fartygets sidor

(3-8). Vid större rollvärden gjorde detta mellan 5 och 20 cm på höjden. För att åtgärda detta problem gjordes en ny offsetberäkning (transformation) för dessa beräknad på de utjämnade referenspunktpositionerna. Resultatet blev att höjdvariation på 2-3 centimeter inte följde med ut i sidornas offsetpunkter, samtidigt som höjdvariationen som berodde på aktuella rollvärden fanns kvar.

Faktaruta

Nätverks-RTK (NRTK): GNSS-mottagaren utför bärvågsmätningar på tillgängliga satellitsignaler och tar emot motsvarande data från Nätverket. Mottagaren behöver inledningsvis bearbeta dessa data innan positioner med bästa noggrannhet (fixlösning) kan beräknas. Denna initiering kan ta upp till några minuter. Om mottagaren förlorar satellitsignalerna eller kommunikationen med nätverket så måste initieringen göras om. Mottagaren redovisar när sådan fixlösning finns tillgänglig. Det finns alltid en liten risk att mottagaren valt en falsk fixlösning. En falsk fixlösning identifieras normalt internt i mottagaren inom 30 minuter och avviker sällan mer än 30 cm från den riktiga. Användaren kan ofta välja risknivå, ju lägre risk desto längre tid tar initieringen.

Före jämförelse av offsetpositionernas höjd i förhållande till befintligt djupunderlag var det nödvändigt att transformera dessa till plana koordinater i RT90 (2,5gV RT90) eftersom djupunderlaget var uttaget ur djupdatabasen DIS i RT90. En digital terrängmodell (DTM) med minimidjup och 6 meters gridrutor tillverkades av djupdata i visualiseringsprogrammet IVS Fledermaus. I samma program jämfördes samtliga offsetpunkters dataserier mot den digitala terrängmodellen. Som resultat skapades nya dataserier med position, bottendjup och djupskillnad (djup under köl, bottenklarning) för varje enskild offsetpunkt. I detta moment tappades tiden i dataserierna eftersom denna del av programmet inte kan hantera en indexkolumn. En sökning och matchning av positionerna utfördes därför mellan de gamla och nya dataserierna för att kunna lägga tillbaka tiden på rätt datapunkt i de nya dataserierna.

Analyser

Följande analyser utfördes på dataserierna;

- Squat analys
- Analys av dynamiskt djupgående
- Bottenklarning analys
- Trim analys
- Roll analys

Squat-analys

För att kunna bestämma fartygets squat beräknades skillnaden mellan fartygets statiska höjd och aktuella (dynamiska) höjd för varje enskild position i offsetpunkt 1 och 2 (för och akter). Med en korrektion som motsvarade skillnaden mellan vattenståndet vid den statiska

mätningen och vattenståndet vid aktuell tid och position ger detta ett aktuellt dynamiskt djupgående.

Dataserierna för squat (dynamiskt minus statiskt djupgående) för respektive offsetpunkter 1 och 2 delades in med avseende på fart i en knops intervall mellan 0 och 17 knop. Ytterligare indelning av dessa intervall gjordes med avseende på djup under köl mellan 0 och 56 meter. Aktuellt djup under köl korrigerades först med skillnaden mellan dynamiskt och statiskt djupgående. Detta medför att aktuellt squatvärde kan refereras till en djup under köl för aktuellt statiskt djupgående. Därefter kunde squatkurvor tas fram som representerade de olika fartintervallen med varierande statiskt djup under köl. Notera att det enda djupgående som normalt är känt är det statiska djupgåendet. Därför är det lämpligt att referera squatkurvorna till ett känt statiskt djupgående så att ett förväntat squatvärde kan uppskattas baserat på fart och djupförhållande för beräkning av dynamiskt djupgående.

Squat-kurvor togs fram dels för enskilda resor och dels baserat på medelvärdet för flera resor med liknande lastkonditioner. Kurvorna editerades manuellt genom att eliminera effekten av - jämna ut spikar som beror på - fartförändringar under resan. Potensekvationer ($y=ax^n$) togs fram för samtliga kurvor där y är squatvärdet, x är statiskt djup under köl, a är en konstant och n är en faktor. Den snedfördelning som förekom i avståndet mellan kurvorna jämnades ut genom att fördela intervallen mellan ekvationernas konstanter (a) och faktorer (n). Dessa stoppades in i polynomekvationer och de resulterande kurvorna jämnades ut manuellt. De nya konstanterna och faktorerna användes för de slutgiltiga kurvornas potensekvationer.

Analys av dynamiskt djupgående för alla offsetpunkter

Det dynamiska djupgåendet är refererat till aktuell vattenyta och visar det verkliga djupgåendet under gång. Detta är beräknat på samma sätt som för squat-analysen ovan, d.v.s. skillnaden mellan stillaliggande höjd och höjd under gång för respektive offsetposition, korrigerat för vattenståndsskillnader. Mervärdet av denna analys är att ökat djupgående på grund av bankeffekter, och andra effekter som inte är beroende av squat, kan studeras.

Det dynamiska djupgåendet för alla last resor och enskilda offsetpunkter delades in i decimeterintervall mellan 6,8 meter och det maximalt förekommande djupgåendet för varje resa eller max 7,6 meter. Resultatet gav antal förekomster inom respektive djupgående-intervall samt dess positioner och inkluderar fartygets alla dynamiska rörelser inducerade av roll, pitch, squat och fartändringar.

Analys av marginal (bottenklarning) mellan fartygsbotten och sjömått botten

De loggade offsetpositionerna (eg. höjderna) är direkt relaterade till Mälarens referensnivå. Bottenmarginalen (bottenklarning) mellan fartygsbotten och sjömått botten kunde därmed beräknas i IVS Fledermaus.

Bottenklarning för alla lastresor och offsetpunkter delades in i decimeterintervall mellan 1,4 meter och det minsta förekommande för varje resa. Intervallen presenterades dels med

avseende på fart och dels med avseende på antal förekomster samt positioner. En tredje analys för alla full-lastresor och offsetpunkter gjordes för passage av bottendjup grundare än 8 meter med avseende på position.

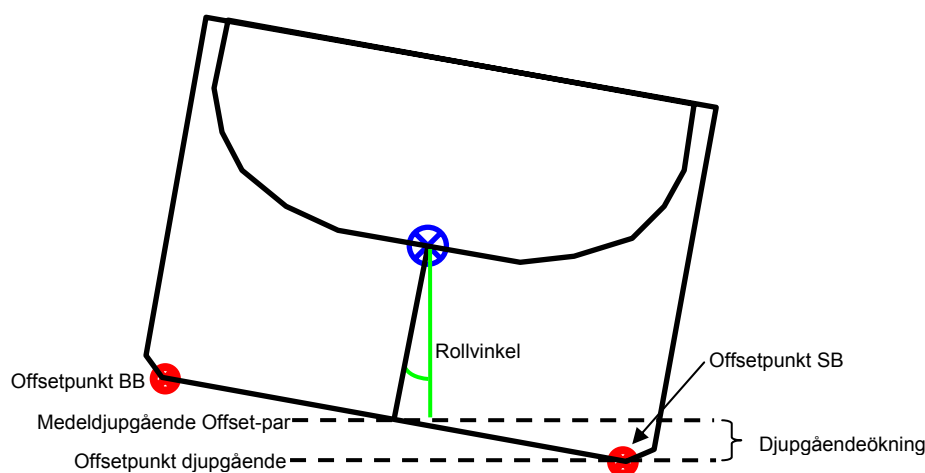
Dessutom gjordes en analys för alla lastresor i offset 1 för bottenmarginalen med avseende på fart. Marginalen delades in i decimeterintervall från 2,5 meter och till den minsta marginal som förekom. Farten delades in i 1 knops intervall. Resultatet visade antal förekomster inom olika marginal och fart -intervall.

Analys av trim

Trim analyserades på samma sätt som squat d.v.s. ett trimvärde, som är beräknat på skillnaden mellan det dynamiska djupgåendet i offset 1 och 2, indelat i fart och statisk bottenmarginal intervaller. Analys gjordes endast på lastresorna där farten var mellan 11 och 16 knop. Eftersom trim är beräknat som skillnaden på ett djupgående för och akter användes ett medelvärde av marginalen för offsetpunkterna 1 och 2 som parameter för bottenklarning under köl. De dynamiska trimvärdena reducerades med statistiskt trim. Resultatet gav kurvor för respektive fart mot reducerat trim och statisk bottenklarning. Kurvorna editerades och ekvationer bestämdes på samma sätt som för squatanalysen.

Analys av Roll

Analys av roll utfördes på alla lastresornas offsetpunkter 3 till 8. Två olika analyser gjordes; antal positioner mot varierande rollvinklar samt antal positioner mot varierande dynamisk djupgåendeökning. Rollvinklarna delades in i halvgraders intervall och djupgåendeökningen delades in i decimeterintervall mellan noll och det maximala värdet som förekom under respektive resa. Djupgåendeökningen beräknades som skillnaden mellan, ett medelvärde av aktuellt djupgående för motstående offsetpunkt-par, och djupgåendet för aktuell offsetpunkt i samma offsetpunkt-par. Djupgåendeökningen beror av rollvinkeln och är alltså relativ mot medeldjupgåendet för ett offsetpunkt-par och har inget samband med squat. Se figur 3.



Figur 3. Beräkning av djupgåendeökning vid roll

Datainsamling

Totalt loggades data under 7 resor; 3 resor på fullt djupgående Södertälje-Köping, 1 resa på halvlast Södertälje-Köping och 3 resor i ballast Köping- Södertälje.

070124: Ballastresa Köping-Södertälje

070129: Lastresa Södertälje-Köping

070201: Ballastresa Köping-Södertälje

070206: Lastresa Södertälje-Köping

070208: Ballastresa Köping-Södertälje

070214: Lastresa Södertälje-Köping (halv last)

070218: Lastresa Södertälje-Köping

Vid lastresorna bordades fartyget tillsammans med lotsen vid Landsort utom vid en resa då ombordstigning skedde i Södertäljeslussen. Vid ballastresorna skedde ombordstigning i Köping. Lastresornas dataloggning startade strax efter ombordstigning och fortsatte till ankomst Köping. Ballastresornas dataloggning startade till kaj i Köping och avslutades strax efter Linasundet för hinna med att återställa utrustningen innan avstigning i Södertäljeslussen.

Analysen av data har begränsats geografiskt till mellan Kiholmen-Tegeltorp norr om Södertälje och bojarna Linlandet, Östra och Västra, i Köpingrännan.

På den första lastresan höjdavvägdes fartyget av från känd punkt på kajen i Södertäljeslussen. Samtidigt utfördes djupgåendeavläsning och vattenståndsavläsning på skala invid slussen. På så vis kunde jämförelse ske mot beräknat RTK vattenstånd. På samma resa höjdavvägdes även fartyget i Köping på liknande sätt. På de övriga lastresorna gjordes endast avläsningar av vattenstånd och djupgående samt jämförelse mot beräknat RTK vattenstånd. Vid ballastresorna lästes inte djupgåendet av eftersom det var svårt att få någon noggrann åmning-avläsning på sjösidan till kaj i Köping. Ingen avläsning gjordes heller i Södertäljeslussen på ballastresorna eftersom detta skulle fördröja fartyget.

Vattenståndet i kanalen norr om Södertäljeslussen hade en stående våg med varierande amplitud och våglängd. Variationen i vattenståndet var ca +/- 4 cm med 5-10 minuters intervall vilket försvårade kontrollen av beräknat RTK vattenstånd i samband med djupgåendeavläsning. Djupgåendeavläsningen av de sex åmningarna gjordes omedelbart efter avläsning på vattenståndsskalan. Korrigering av djupgåendet gjordes också med rollvinkel-skillnaden mellan de individuella åmningavläsningarna för att korrigera för fartygets rörelse under tiden för djupgående avläsningen.

Under de första två resorna 070124 och 070129 var Mälaren i det närmaste isfri och inga fartbegränsningar på grund av isläggning förekom. För de övriga resorna ökade isläggningen västerifrån och på den sista resan låg isen en bra bit öster om Hjulstabron. Detta innebar en fartbegränsning på 12 knop i de områden som var istäckta. Isen ställde också till problem för vattenståndsmätaren i Köping vars stav böjdes 070213 09:50. Data efter denna tidpunkt korrigerades för den böjda staven. 070212 14:10 åkte dataloggern för vattenståndsmätaren i

Södertälje i vattnet. Det är okänt om detta berodde på isförhållandena eller annan fysisk åverkan. Data efter denna tidpunkt var korrupt och kunde inte användas.

Vattenståndsnivelleringen av alla etablerade vattenståndsmätare visade att vattenståndsmärket och vattenståndsskalan i Södertälje låg ca 3 cm fel. Detta påverkade de kontroller mot beräknat RTK vattenstånd som utfördes i slussen. Dock ligger detta fel inom variationen för skillnaden mellan avläst vattenstånd och beräknat RTK vattenstånd. Övriga vattenståndsdata stämde väl överens med SMHI vattenstånd som är ett medelvärde mellan Västerås, Södertälje och Stockholms vattenstånd. Se bilaga 5.

Vid vattenståndsavläsningarna gjordes även en rimlighetskontroll mot SjöV VIVA station i Linasundet.

Grundläggande om Squat

Det följande avsnittet baseras på teoretiska fakta som är hämtade från PIANC Technical Committee II, report 30, juni 1997 (PTC II-30). Rapporten beskriver uttömmande de dynamiska rörelsefenomen som kan förekomma då ett fartyg framförs i grunda farvatten.

Här följer en kort sammanfattning av de viktigaste orsakerna som framkallar squat.

Squat - definition

När ett fartyg gör fart genom vattnet uppkommer en relativ vattenströmning runt skrovet. På grund av friktionen mellan skrov och vattenmassan kommer vattenströmningen inte att ha samma hastighet som fartyget och orsakar ett olikformigt tryck på skrovet. Detta medför att vattenytan sänks i fartygets omedelbara närhet och fartygskroppen påverkas av en nedåtriktad kraft med en trimförändring på grund av det olikformade trycket på skrovet.

Om utrymmet runt skrovet inte är begränsat på sidorna och under kölen påverkas fartyget dynamiskt endast av farten och det olikformade trycket på skrovet som beror på undervattenkroppens hydrodynamiska utformning. Detta kan kallas ”sättning” (sinkage).

Trimförändringen, vars storlek är beroende av fartygets initialtrim, kan vara betydande.

Vid prov där squat-tabeller tagits fram för Sjöfartsverkets sjömätningarfartyg ”Nils Strömcrone”, ”Jacob Hägg” och ”Ale” har det visat sig att då djupet under köl varit större än ca 5 till 7 gånger djupgåendet så har fartygets nedsänkning inte påverkats av bottendjupet.

Då utrymmet under fartyget eller dess sidor begränsas genom minskat bottendjup eller farledsbegränsning ökar strömningshastigheten för att samma vattenmassevolym skall kunna passera runt fartyget. Ökad strömningshastighet medför ett undertryck vilket i sin tur medför en nedåtriktad kraft och fartyget ”sugs” mot botten, enligt Bernoullis princip. Om vattnets strömningshastighet inte kan öka kommer friktionen mot vattnet runt skrovet istället att öka

och därigenom minska fartygets fart. I litteraturen diskuteras endast squat som en kombinerad företeelse där sättning och effekten av eventuellt undertryck (orsakat av begränsning av utrymmet runt och under fartyget) samverkar.

Froude talet

Det hydrodynamiska motståndet på ett fartyg och dess rörelser kan definieras med det dimensionslösa Froude-talet som är en relation mellan fart och bottendjup. Froude-talet är inte beroende av fartygets djupgående eller av undervattenkroppens utformning utan beräknas på vattendjupet (avståndet från den ”ostörda vattenytan” till botten), fart och aktuell tyngdkraft. Då Froude-talet närmar sig 0,6-0,7 blir friktionen så stor att farten går ner på normala handelsfartyg. Teoretiskt verkar detta som en fartbarriär som inte kan överskridas för dessa fartyg och squat får här ett maximalt värde. De fartyg som har relativt stor maskinstyrka klarar ett högre Froude-tal innan farten begränsas och dessa fartyg påverkas därigenom mer av squat.

Blockkoefficient

Fartygets blockkoefficient är en relation mellan fartygets undervattenskropp och en fyrkantig låda med samma längd, bredd och djup. Tankfartyg brukar ha en blockkoefficient på ca 0,8 medan mer snabbgående containerfartyg har ca 0,7. Vissa färjor kan ha en koefficient på mellan 0,5 och 0,6.

Blockkoefficienten spelar stor roll för squat och trim på ett fartyg. Ett fartyg med stor koefficient och litet eller inget statiskt trim kommer normalt att trimma på fören medan ett fartyg med koefficient lägre än 0,7 normalt trimmar på aktern i grunda farvatten. Initialtrimmet avgör storleken på och om fartygets för eller akter kommer att påverkas mest av squat.

Det måste noteras att blockkoefficienten beräknas på aktuellt displacement vilket medför att t.ex. ett tankfartyg som normalt har en hög koefficient får en betydligt lägre då hon går i ballast. Ju större trim desto lägre koefficient vilket medför att trim och squat på aktern normalt ökar för ett fartyg i ballast.

Farledsutformning

Relationen mellan farledsdjup och djupgående samt mellan farledsbredd och fartygsbredd har stor betydelse för storleken på squat. Dessa tillsammans eller var för sig orsakar en begränsning av det fria utrymmet runt fartyget och därigenom uppstår trimförändring och ökat dynamiskt djupgående. Det är viktigt att notera att storleken på squat ökar betydligt då utrymmet på sidorna av fartyget begränsas av kanalkanter, muddrad ränna eller annan naturlig begränsning jämfört mot storleken på squat i grunda farvatten utan sidobegränsningar.

Fart

Farten är den faktor som har störst inverkan på storleken på trimförändring och squat.

Squatformler

De befintliga squat formler som är mest använda är Huuska, ICORELS¹ (Huuska/Guliev) och Barras. Skillnaden mellan formlerna är att de använder olika parametrar som representerar farledens begränsningar samt olika koefficienter för olika farttyper. ICORELS formel använder inga parametrar för farledsutformningen förutom Froude-talet. Se bilaga 7.11.

Resultat

Allmänt

Positions bortfall förekom under resorna. Detta orsakades främst av att GSM-förbindelsen bröts men kan även ha andra orsaker. Konsekvensen blev att GNSS-mottagarna inte kunde beräkna en fixlösning. Efter byte av GSM-antenn efter de två första resorna blev modem-förbindelsen något bättre. Problem med fixlösningen fortsatte dock vid vissa tidpunkter och i vissa områden och kan ha förorsakats av fortsatt problem med GSM-förbindelsen, tillgång till för få satelliter och/eller dålig satellitgeometri. Analys av tidpunkterna för fixbortfall mot antal satelliter och aktuell satellitgeometri visar inget direkt återkommande samband, varför man kan misstänka att det i första hand beror på problem med GSM-förbindelsen. Se bilaga 6.

Förutom tappad fixlösning förekom störningar i datainsamlingen beroende på interna problem i Navipac NT. Vid några tillfällen hoppade heading-informationen med oregelbundna intervall på ca 10-20 sekunder där kursen förställdes ca 10-30 grader. Dessa data filterades bort eftersom offset-beräkningen genererade orimliga positioner. Totalt sett låg antal accepterade positioner per resa på över 80 procent förutom en resa som hade ca 50 procent då GSM-förbindelsen var som sämst. Se tabell 1 för totalt antal accepterade positioner.

Loggstatistik						
Datum	Start	Stop	Tid	Från-Till	Resa	% OK
2007-01-24	18:14	23:39	05:25	Köping-Södertälje	Ballast	96,8
2007-01-29	13:00	18:00	05:00	Södertälje-Köping	Last	49,8
2007-02-01	18:12	23:30	05:18	Köping-Södertälje	Ballast	82,2
2007-02-06	12:35	18:13	05:38	Södertälje-Köping	Last	83,6
2007-02-08	18:08	23:21	05:13	Köping-Södertälje	Ballast	80,3
2007-02-14	19:30	00:33	05:03	Södertälje-Köping	Halvlast	93,6
2007-02-18	08:50	14:12	05:22	Södertälje-Köping	Last	80,7

Tabell 1. Loggstatistik fördelat per resa med antal accepterade positioner (%).

¹ ICORELS (International Commission for the Reception of Large Ships) formula, 1980, PIANC working group 4.

Squatanalys

Som tidigare nämnts är squat-kurvorna framtagna med hjälp av ekvationer för data i offsetpunkterna 1 och 2, belägna i för och akter. Flera typer av ekvationer provades men potensekvationen med formen $y=ax^n$ visade sig vara den som bäst fick mätresultatet att passa in. På grund av fartökningar och fartminskningar under resorna fick fartyget momentant stor förändring av trimmet, vilket försvårade inpassningen av data. Även avsaknaden av data vid liten bottenklarning gjorde det svårt att avgöra var kurvan skulle börja. För att kunna bestämma tendensen i början av kurvan vid liten bottenklarning användes initialt värdet för ICORELS formel på 0,5 meter för att få en start på kurvan. Detta värde justerades för att passa in med övriga datapunkters position på kurvan. De enskilda kurvornas datapunkter justerades så att aktuell kurva passade in med de övriga kurvornas form och position. Olika bottenklarning delades in i olika fartintervall med hela knops mellanrum vilket gör att fartkurvorna anges i halva knop (xx,5 knop). Genom att ett intervall för bottenmarginal respektive fart använts kan en viss snedfördelning av data ske. Värdena kan ligga ojämnt fördelade inom intervallet och därigenom påverka position och utseende på kurvorna samt mellanrummet mellan kurvorna. Detta har dock justerats genom tidigare beskriven utjämningsmetod under avsnittet analys.

Sammantaget bygger resultatet på verkliga observationer, korrigerade observationer och utjämnade trender.

De resulterande squat-kurvorna stämde generellt bra överens med de teoretiska diskussionerna och formlerna i PIANC. Fartyget hade mest förligt squat och trim på fullt djupgående då initialtrimmet var nära "even-keel". I ballast med ett trim på ca 1,9 meter var squat störst i aktern. Den resa då fartyget hade halv last var trimmet ca 0,8 meter och squat var störst förut men betydligt mindre än då fartyget var nära even keel. Balanspunkten för en parallell nedsänkning ligger mellan ett trim på 0,8 och 1,9 meter. Vid jämförelse mellan squatkurvorna förut på lastresorna respektive akterut på ballastresorna, alltså där squat hade störst värde, hade lastresorna ca 0,1 meter större squat vid en fart på ca 10 knop. Skillnaden ökade för högre farter och hade ca 0,4 meter mer squat på lastresorna för den högsta farten 15,5 kn. Se bilaga 7.

Jämförelse av squatkurvorna mellan de enskilda resorna, i last respektive i ballast, visar god överensstämmelse med små skillnader. Även om skillnaden i initialtrim mellan lastresorna var förhållandevis små så visar resultatet en ökad förlig squattendens då det förliga trimmet var större. Se bilaga 7.

De resulterande kurvorna visar att squat-värden över en meter förekommer då farten är över 12 knop och bottenmarginalen är liten.

De framtagna squat-kurvorna jämfördes mot ICORELS och Barras formler. Resultatet för den del av fartyget som hade störst squat och vid liten bottenklarning liknade mest ICORELS formel med koefficienten 1,7. Större bottenklarning resulterade i ett större squatvärde än ICORELS formler. Detta kan bero på att fartyget har en större sättning (sinkage), oberoende

av bottenklarning, än vad ICORELS använder i sina beräkningar. ICORELS övriga koefficienter 2,0 och 2,4 resulterar i kurvor med större squat än resultatet för BW Helen. Barras formel visade generellt för stora squat-värden men följde hela kurvformen bättre än ICORELS formel. Detta kan vara det omvända fallet jämfört mot ICORELS, att Barras räknar med en för stor sättning. Se bilaga 7.

Analys av dynamiskt djupgående

Fartygets loggade dynamiska djupgående ligger till grund för squat-analysen. Vid Squat-analysen gjordes en utjämning av det observerade dynamiska djupgåendet med avseende på fart och bottenklarning. Den dynamiska djupgåendeanalysen inkluderar även de djupgåendeförändringar som orsakats av momentan fartförändring och gir (trimförändring och rollförändring) under resorna.

Analysen omfattar lastresorna och presenterar det dynamiska djupgåendet för alla offsetpunkter indelat i djupgåendeintervall och antal förekomster (sekunder) samt djupgåendeintervall och geografisk position. Resultatet visar en skillnad i de dynamiska rörelserna vid jämförelse mellan de olika lastresorna. Det går inte att dra några direkta slutsatser baserat på resornas medelfart eftersom denna påverkas av fartminskning i samband med fartygsmöten och broöppningar. Om däremot fartintervallerna analyseras geografiskt och jämförs mellan resorna kan skillnaden i det dynamiska djupgåendet förklaras. Den första lastresan hade generellt ca 2 knop högre fart över de grundare områdena jämfört mot de andra resorna. De två övriga lastresorna på full last hade lägre fart i de grunda områdena vilket också visar sig som mindre dynamiskt djupgående för dessa resor. Se bilaga 9. Jämförelse av det dynamiska djupgåendet för samtliga offset visar också att den första lastresan hade det största medeldjupgåendet med 7,18 meter och en medelnedsänkning på 0,35 meter relativt det statistiska djupgåendet. Motsvarande för andra resan som hade minst medeldjupgående 7,02 meter med en medelnedsänkning på 0,23 meter och tredje resan som låg mittemellan med ett medeldjupgående på 7,11 meter och medelnedsänkning på 0,28 meter. Se tabell 2.

Djupgåendevariationerna var störst för offsetpunkterna 3-4 och 5-6 bordvarts samt offsetpunkt 1 förut, se figur 1. Minsta variationen var i offsetpunkt 2 längst akterut i centerlinjen. Variationen var störst för den första lastresan med högre fart. Se bilaga 8. En förklaring till fartskillnaderna är den ökande/varierande isläggnings för de olika resorna med den reglerade fartbegränsningen vid isläggning på 12 knop.

Första lastresan hade ett dynamiskt maxdjupgående på 7,94 meter för offsetpunkt 1 längst förut i centerlinjen. Denna offsetpunkt hade också flest djupgående större än 7,6 meter, totalt 1090 st (1090 sek), vilket innebär drygt 18 minuter av restiden. Offsetpunkt 2 och 7 hade inga djupgående större än 7,6 meter medan övriga offsetpunkter hade varierande antal mellan 26 och 1010 st. De offsetpunkter med störst djupgående låg förut och på babordssidan. Antal djupgående mindre än 6,8 meter varierade mellan 13 och 502 observationer med ett minsta djupgående på 6,38 meter i offsetpunkt 3. Skillnaden mellan maximalt och minimalt

djupgående för respektive offsetpunkt var som mest 1,48 meter. Under denna första lastresa var vattenståndet plus 31 centimeter.

De övriga två resorna på full last hade ett maximalt djupgående på 7,52 respektive 7,75 meter. Antalet djupgående större än 7,6 meter varierade mellan 6 och 25 observationer för offsetpunkterna 3, 4 och 6 på den sista lastresan. Antal djupgående mindre än 6,80 meter var på andra lastresan drygt 3000. Det stora antalet jämfört mot de andra resorna kan bero på att det statistiska djupgåendet i offset 1 var 6,68 och initialtrimmet var 22 cm på aktern medan de andra resorna hade ett statistiskt djupgående på mer än 6.80 meter och med ett trim nära ”even-keel”. Tredje lastresan hade som mest 255 observationer djupgående mindre än 6,80 meter. Djupgåendevariationen i enskilda offsetpunkter var lägre än för första resan och låg som mest på ca 1,2 meter. På dessa senare lastresor var vattenståndet plus 26 respektive plus 10 centimeter.

Resan på halvlast visar mindre variation i de dynamiska rörelserna än resorna på full last. Största variationen var 1,06 meter i offsetpunkt 3. Denna resa hade dock ett större dynamisk medeldjupgående (+0,34 meter) jämfört med statistiskt djupgående.

Resultatet visar tydligt att varierande bottenpografi har en omedelbar inverkan på det dynamiska djupgåendet. Enskilda grundtoppar som passeras, mindre eller större, orsakar en direkt djupgåendeökning både för och akter med det största utslaget förut. Efter passage minskar djupgåendet lika hastigt som det ökade med en tydligt överdriven svängande vågrörelse upp och ner som ebbar ut relativt snabbt. Även här är vågrörelsen mest tydlig i förskeppet. I de områden med omväxlande bottenpografi som detaljstuderats varierar det dynamiska djupgåendet 0,2-0,3 meter med toppar på ca 0,5 meter. Farten påverkades också i dessa områden med en variation på 1-2 knop. Även i de fall då fartyget inte passerade rätt över grunda toppar påverkades det dynamiska djupgåendet kraftigt av grunda områden som passerades vid sidan av fartyget. Se bilaga 9, 10 och 12.

Erfarenheter från sjömätning med RTK i Flintrännen visar att fartygspassager i trånga och grunda farledsavsnitt orsakar en momentan sänkning och höjning av den lokala vattenytan runt fartygen på upp till 30 centimeter. Detta har dock inte kunnat verifieras vid dessa prov eftersom farten vid de fartygsmöten som förekom var låg eller så inträffade dessa möten då positionen var bristfällig. Se bilaga 7.18.

Last 070129, Södertälje - Köping

Offset	Statistiskt Djupg.	Dynamiskt djupgående							
		Antal (1/s)	Medel	Diff m. stat	Stdev	Max	Median	Min	Max-Min
O1	6,84	8958	7,31	0,47	0,26	7,94	7,36	6,64	1,30
O2	6,81	8954	7,07	0,26	0,18	7,52	7,03	6,76	0,76
O3	6,83	8958	7,19	0,36	0,25	7,81	7,22	6,38	1,43
O4	6,83	8954	7,27	0,44	0,25	7,93	7,25	6,45	1,48
O5	6,82	8953	7,13	0,31	0,23	7,73	7,14	6,41	1,32
O6	6,82	8951	7,21	0,39	0,23	7,82	7,17	6,48	1,34
O7	6,82	8948	7,10	0,28	0,20	7,60	7,09	6,73	0,87
O8	6,82	8947	7,14	0,32	0,20	7,65	7,11	6,71	0,94
Alla	6,83	71623	7,18	0,35	0,24	7,94	7,15	6,38	1,56

Last 070206, Södertälje - Köping

Offset	Statistiskt Djupg.	Dynamiskt djupgående							
		Antal (1/s)	Medel	Diff m. stat	Stdev	Max	Median	Min	Max-Min
O1	6,68	16951	6,97	0,29	0,16	7,38	7,00	6,47	0,91
O2	6,90	16952	7,05	0,15	0,09	7,35	7,05	6,87	0,48
O3	6,76	16926	7,02	0,26	0,13	7,43	7,04	6,51	0,92
O4	6,76	16927	6,98	0,22	0,15	7,52	6,99	6,33	1,19
O5	6,81	16925	7,04	0,23	0,12	7,44	7,05	6,60	0,84
O6	6,81	16927	7,00	0,19	0,13	7,50	7,00	6,45	1,05
O7	6,85	16927	7,05	0,20	0,10	7,38	7,05	6,80	0,58
O8	6,85	16927	7,02	0,17	0,10	7,40	7,02	6,73	0,67
Alla	6,79	135462	7,02	0,23	0,13	7,52	7,03	6,33	1,19

Halvlast 070214, Södertälje - Köping

Offset	Statistiskt Djupg.	Dynamiskt djupgående							
		Antal (1/s)	Medel	Diff m. stat	Stdev	Max	Median	Min	Max-Min
O1	5,64	16974	5,99	0,35	0,18	6,48	6,00	5,47	1,01
O2	6,37	16971	6,62	0,25	0,16	7,12	6,58	6,34	0,78
O3	5,90	16950	6,19	0,29	0,17	6,80	6,19	5,74	1,06
O4	5,90	16952	6,23	0,33	0,17	6,80	6,22	5,83	0,97
O5	6,07	16950	6,34	0,27	0,16	6,92	6,33	6,00	0,92
O6	6,07	16952	6,38	0,31	0,16	6,96	6,36	6,04	0,92
O7	6,21	16952	6,47	0,26	0,16	6,99	6,45	6,18	0,81
O8	6,21	16952	6,50	0,29	0,16	7,03	6,47	6,20	0,83
Alla	6,01	135653	6,34	0,34	0,25	7,12	6,35	5,47	1,65

Last 070218, Södertälje - Köping

Offset	Statistiskt Djupg.	Dynamiskt djupgående							
		Antal (1/s)	Medel	Diff m. stat	Stdev	Max	Median	Min	Max-Min
O1	6,81	15601	7,20	0,39	0,13	7,59	7,19	6,44	1,15
O2	6,85	15603	7,05	0,20	0,08	7,30	7,03	6,85	0,45
O3	6,82	15581	7,11	0,29	0,12	7,63	7,10	6,59	1,04
O4	6,82	15581	7,18	0,36	0,12	7,75	7,18	6,55	1,20
O5	6,83	15581	7,07	0,24	0,11	7,58	7,07	6,63	0,95
O6	6,83	15581	7,14	0,31	0,12	7,69	7,14	6,66	1,03
O7	6,84	15581	7,06	0,22	0,09	7,32	7,05	6,79	0,53
O8	6,84	15581	7,10	0,26	0,10	7,48	7,09	6,83	0,65
Alla	6,83	124690	7,11	0,28	0,12	7,75	7,10	6,44	1,31

Tabell 2. Statistisk och dynamiskt djupgående

Bottenklarning

Ett avstånd till botten beräknades i IVS Fledermaus för varje loggad position i respektive offsetpunkt. Bottenmedeldjupet under samtliga loggade offsetpositioner och resor låg mellan 19,5 och 24,1 meter. Det minsta bottendjup (i förhållande till referensnivån) som passerades under de tre resorna på full last var 7,68, 7,61 respektive 7,80 meter. För resan på halv last var minsta passerat bottendjup 7,50 meter. De tre ballastresorna analyserades endast med avseende på offsetpunkt 1 och 2 och där var minsta passerat bottendjup 7,75 meter. Se bilaga 8. De minsta bottendjupen förekom uteslutande för de offsetpunkter som låg bordwärts längst ut i sidorna under lastresorna. Dock hade offsetpunkt 1 flest antal observationer med bottenklarning mindre än 1 meter, 59 och 24 st, på första respektive tredje resan på full last och offsetpunkt 2 flest, 2 st, på andra resan. På de tre första lastresorna (två på full last och en på halvlast) förekom de minsta djupen på styrbordssidan i offsetpunkt 3 och 5. På den sista lastresan förekom de minsta djupen på babordssidan i offsetpunkt 4 och 6. En geografisk analys med avseende på passage av djup grundare än 8 meter visar att dessa förekommer lokalt strax innan sväng runt Nybyholm, vid passage av Ryssgrund och Hjulstabron, Biskopsstenarna vid sväng runt Agneudde, vid passage av Lilla Aggarö fyr och Kvicksundsbron, vid passage av gröna bojen Klovstenen samt vid Brokensvängen in till Köpingrännan. Åtta (8) meters bottendjup valdes för att täcka in det maximala dynamiska djupgåendet (7,94 meter) som förekom under resorna. Det grundaste passerade djupet på 7,50 meter är beläget vid norra brobrinken vid Hjulstabron.

Bottenmarginalen var vid dessa grunda passager som minst 0,42 meter i offsetpunkt 3 vid Ryssgrund med en fart av 10,7 kn på första lastresan. De övriga resorna hade som minsta bottenmarginal 0,83 meter i offsetpunkt 5 vid Hjulstabron med fart 7,1 kn, 1,05 meter (Halvlast) i offsetpunkt 2 med fart 11,5 kn och 0,61 meter i offsetpunkt 4 med fart 8,9 kn vid Lilla Aggarö fyr. Se bilaga 11.

På grund av positionsbortfallen under resorna fattas data i några grunda områden på någon resa. I några områden där data finns loggade från samtliga resor har fartyget passerat över befintlig uppgrundning på endast en av resorna. Detta indikerar att det har stor betydelse för hur fartyget framförs i farleden.

Trim och Roll

Fartygets dynamiska trimvariation, som beräknades på skillnaden mellan största och minsta pitchvinkel, varierade mellan 0,88 och 1,24 meter för de enskilda lastresorna. Maximalt förligt trim var 0,80 meter, på sista lastresan, och maximalt akterligt trim var 0,64 meter, på första lastresan.

Trimvariationen kan delas in i två olika typer. Dels en typ som beror av squat som verkar under kortare eller längre tid beroende på bottenprofil/bottenklarning. Dels en kortvarig typ som beror av fartygets avsiktliga fartförändringar. Den squatindikerade trimförändringen följer samma tendenser som squatkurvorna, d.v.s. det förliga trimmet ökar då marginalen

under köl minskar. Här syns det en tydlig skillnad mellan lastresorna på full last jämfört mot resan på halv last. De tre fullastresornas trimkurvor har samma tendens som de olika resornas squatkurvor, större förligt statiskt initialtrim ger större förligt dynamiskt trim. Vid farten 11,5 knop var den förliga trimökningen mellan 0,2-0,3 meter med 2 meter statisk bottenklarning. Vid 15,5 knop var trimökningen 0,4-0,5 meter med motsvarande statisk bottenklarning. Se bilaga 10.6.

De fartförändringar som observerades under resorna orsakade en kortvarig trimförändring.

En fartminskning ökade momentant det förliga trimmet och resulterade i ett större djupgående förut och ett mindre akterut. Omvänt resulterade en fartökning ett mindre förligt trim med djupgåendeminskning förut och djupgåendeökning akterut. Djupgåendeförändringen i samband med fartförändringar var störst förut och låg mellan 0,1-0,2 meter. Akterut var djupgåendeförändringen ca hälften så stor. Se bilaga 9.6 och 12.

Storleken på rollvärden under gir kan sammankopplas med den fart som hållits under de olika resorna. Den första resan på full last som hade högst fart i de grundare områdena hade ca 21% (1867 st) rollvärden större än 1 grad. De andra två fullastresorna med lägre fart hade ca 12% (1948 st) respektive 9% (1343 st) rollvärden större än 1 grad. Lastresorna hade likvärdiga stabilitetsvärden med ett reducerat GM^2 på ca 0,48 meter [Befälhavaren, BW Helen]. Resan på halvlast hade motsvarande ca 3% (426 st) rollvärden större än 1 grad och ett betydligt större GM. Antal observationer med mer än 2 graders roll var ca 6% (523 st) på första fullastresan och ca 1% (233 st) respektive ca 2% (261 st) på de två övriga resorna. Geografiskt låg rollvärden större än 2 grader i de områden med större farledsvängar och då främst Hjulstasvängarna mellan Nybyholm och Toppvik. Det största rollvärdet, 6,0 grader, förekom under första lastresan. Största rollvärdet för de två andra fullastresorna var 3,7 respektive 4,0 grader. Vid Ballastresorna samt halvlastresan uppmättes som mest ca 2,7 grader. Det största uppmätta rollvärdet, 6 grader, motsvarar en djupgåendeökning på 0,68 meter i någon av offsetpunkterna belägna bordvarts 6,5 meter från C/L). Motsvarande djupgåendeökning med 1 grad ger 0,11 meter. Se bilaga 9.7.

Kombinerat dynamiskt djupgående

Sammantaget visar resultaten tre olika orsaker till en dynamisk djupgåendeökning; squat, fartförändring och roll. Dessa tre företeelser har inga direkta samband med varandra utan kan förekomma enskilt eller i kombination. Även om vissa insamlade data indikerar att squat minskar marginellt då fartyget har en stor rollvinkel har detta inte kunnat visas på ett övertygande sätt i analysen. Fartygets undervattenskropp förändras med en rollvinkel och därigenom förändras de hydrodynamiska egenskaperna vilket därmed bör ge andra squat-egenskaper. Ingen hänsyn har tagits till detta utan de olika typerna av dynamiska djupgående-

2 GM; Metacenterhöjd, avståndet mellan fartygets systemtyngdpunkt (G) och geometriska centrum, Metacentrum (M). Ett relativt mått på fartygets stabilitet.

ökningar har behandlats som oberoende och utan påverkan på varandra. Beroende på var i fartyget en offsetposition är belägen så får de dynamiska företeelserna olika stor inverkan. I en offsetpunkt i centerlinjen på fartygsbotten har rollen liten inverkan, teoretiskt 4 cm höjdskillnad med en roll runt långskeppsaxeln på 6 grader. Likadant påverkas det dynamiska djupgåendet mindre i området nära långskepps flytcentrum (LCF, Longitudinal Center of Flotation) av den trimförändring som uppkommer vid t.ex. en fartförändring.

För att få en uppfattning om storleken på det maximala dynamiska djupgående som kan förväntas då alla inverkan faktorer samverkar beräknades ett kombinerat dynamiskt djupgående. En aritmetisk summering av effekterna från squat, roll och fartförändring beräknades i offsetpunkt 1 och 3-4. Maxvärden för djupgåendeökning beroende på fartminskning, 0,2 meter, adderades till aktuella squatkurvor i offsetpunkt 1. För beräkning av djupgåendeökning beroende på roll i offsetpunkterna 3-4 användes de största rollvinklarna som förekom under lastresorna, 6,0 respektive 4,0 grader, som motsvarar 0,68 respektive 0,45 meter. Ett interpolerat värde för djupgåendeökning orsakat av fartminskning, 0,06 meter beräknades för offsetpunkterna 3-4. Squatkurvor för offsetpunkterna 3-4 beräknades genom interpolation av squatkurvorna i offsetpunkterna 1 och 2. Därefter adderades den rollinducerade djupgåendeökningen och djupgåendeökningen orsakat av fartminskningen till squatkurvorna i offsetpunkterna 3-4. De nya kurvorna med kombinerat dynamiskt djupgående beräknades för de farter där roll och fartminskning hade sina maximala värden, mellan 8 och 14 knop.

Resultatet visar att de nya kombinerade kurvorna i vissa fall innebär en fördubbling av det dynamiska djupgåendet jämfört mot endast de empiriska squatkurvorna. Det dynamiska djupgåendet i offsetpunkterna 3-4 ökades totalt med 1,3 meter (0,68 roll + 0,06 fart + 0,6 squat) vid 6 graders rollvinkel, 12 knop och 2 meters statiskt djupgående under köl. Den totala djupgåendeökningen vid 4 graders rollvinkel i samma offsetpunkter var drygt 1,1 meter (0,45 roll + 0,06 fart + 0,5 squat) med 12 knop och 2 meters statiskt djupgående under köl. I offsetpunkt 1 belägen förut ökades djupgåendet med 0,2 meter vilket ger ett totalt dynamiskt djupgående på ca 0,8 meter (0,2 fart + 0,6 squat) med 12 knop och 2 meters statiskt djupgående under köl. Notera att offsetpunkt 1 ligger i centerlinjen och påverkas inte av roll. Vid 14 knop ökar djupgåendet ytterligare med ca 0,3 meter för samtliga fall. De maximala värden för dynamiskt djupgående som observerats i insamlad data under resorna och som legat utanför de framräknade squatkurvorna passar bättre in i de nya kombinerade dynamiska kurvorna. Dessa kurvor kan representera dynamiskt djupgående i värsta fall. Se bilaga 7.16.

Notera att en djupgåendeökning på grund av fartygsmöten inte är medtaget i beräkningen ovan. Tidigare observationer från sjömätning i Flintrännen visar att en djupgåendeökning på ca 30 centimeter kan förekomma. Det maximala kombinerade dynamiska djupgåendet kan alltså förväntas öka med ytterligare 0,3 meter i samband med ett fartygsmöte i grunda och trånga farvatten. Se bilaga 7.18.

Noggrannhetsanalys

RTK positionen och tillgängligheten

Den horisontella positionen från Nätverks-RTK (NRTK) har vid tidigare prov i Mälaren 2005 visat sig vara mycket noggrann så länge satellitmottagaren kan leverera en så kallad fixlösning. Den horisontella noggrannheten var vid dessa prov bättre än 4,5 cm, 95 %, jämfört mot egen lokal RTK (egentligen analyserad skillnad). Den vertikala noggrannheten var vid samma prov bättre än 6,2 cm, 95 %. Vid proven från 2005 användes inte GLONASS satelliter i NRTK vilket tillkommit sedan dess. Tillskottet av GLONASS satelliter ser framför allt ut att ha förbättrat höjdnoggrannheten och den stundtals drivande höjden som förekom 2005 har inte observerats i denna undersökning. Den generella noggrannheten för NRTK är bättre än 3 cm horisontellt och bättre än 5 cm vertikalt, 95 % [LMV, 17 okt 2007].

Kontroll av RTK-höjden gjordes med avvägning från känd punkt vid etablering i Köping samt under den första lastresan i Södertäljeslussen och i Köping. Resultatet från avvägningen visade en överensstämmelse mellan avvägd höjd och RTK-höjd som var bättre än 3 cm. Jämförelse gjordes också mellan RTK-vattenstånd och vattenstånd från skala i Södertäljeslussen och Köping under samtliga lastresor med en skillnad på som mest 4 cm. Jämförelsen av RTK-vattenstånd och vattenstånd från skala påverkas av felkällor såsom djupgåendeavläsning, vattenståndsskalans nivellering och noggrannhet i avläsning av vattenstånd. Se bilaga 13.

Tillgängligheten till NRTK har som tidigare nämnts varierat under resorna. Detta har dock inte påverkat positionsnoggrannheten utan endast påverkat mängden godkända data.

Attitydmätning

Kontroll av attitydmätarens roll- och pitch-vinklar gjordes samtidigt med vattenståndskontroller i Södertäljeslussen och Köping under lastresorna. Avlästa vinklar jämfördes med beräknade vinklar baserade på samtidig djupgåendavläsning. Rollvinklarnas differens orsakade som mest en skillnad i höjd på 1 cm i de offsetpunkter som låg längst ut i sidan. Pitchvinklarnas differens orsakade som mest 6 cm skillnad i offsetpunkt 1 förut. Se bilaga 13.

Heading-informationen från RTK-gyro kontrollerades visuellt mot de två fartygsgyrona. Det var dock omöjligt att göra en noggrann jämförelse eftersom fartygsgyrona drev någon grad fram och tillbaks. En beräkning av RTK-gyrots noggrannhet ger 0,15 grader med en baslinje mellan antennerna på 16 meter och under förutsättning att positionsfelen i respektive antenn är oberoende. Om positionsfelen är starkt korrelerade (mera sannolikt), vilket förutsätter att samma satelliter och korrektionssignaler används av båda mottagarna samt att antennerna är stabila, så kan noggrannheten uppskattas till 0,05 grader eller bättre.

Vattenstånd

Skillnaden mellan de insamlade vattenståndsserierna från vattenståndsmätarna efter nivellering var under 1 cm. Jämförelse mellan SMHI vattenståndsserie under samma tid

visade som mest 2 cm skillnad. Det måste noteras att SMHI vattenståndsserie är ett medelvärde av Västerås, Södertälje och Stockholm och anges en gång per dag kl. 0800. Vädret under perioden för resorna var förhållandevis stabilt med måttliga vindar och normala lufttryck vilket indikeras av stabila vattenstånd utan större variationer. Se bilaga 5.

Ett fel i vattenstånd påverkar squatberäkningen och de dynamiska djupgåendeberäkningarna. Dock påverkar det inte bottenklarningsberäkningarna eftersom RTK-höjderna är absoluta och direkt refererade till Mälarens referensnivå vilket även djupunderlaget är relaterat till.

Sjömättningsnoggrannhet

Djupunderlagets noggrannhet uppfyller IHO:s sjömättningsstandard S44 och den svenska realiseringen SRS44, Special Order. Detta innebär att den horisontella noggrannheten är bättre än 2 meter (95%) och den vertikala noggrannheten är bättre än 26-29 cm (95%) beroende på boddjup. Insamlade positionsdata jämförs mot djupdata i en digital terrängmodell (DTM). Djupdata har delats upp i gridrutor som är 6x6 meter med det minsta djupet i varje ruta representerat (så kallat mingrid). Uppdelning i gridrutor kan innebära ytterligare försämring av den horisontella positionsnoggrannheten då rutans centrumposition ersätter det enskilda djupets position. Den vertikala noggrannheten kommer inte att påverkas eftersom en grundtopp kommer att behålla sitt ursprungliga djup och endast öka i horisontell omfattning inom en 6x6 meters ruta.

Felbudget

En felbudget har tagits fram för offsetpunkt 1 förut, offsetpunkt 2 akterut och offsetpunkt 3 förut på styrbordssidan. Felbudgeten är beräknad enligt medelfeletts fortplantningslag³ och är uppdelad i en horisontell och en vertikal komponent. Alla ingående fel som påverkar positionsnoggrannheten är indelade i systematiska respektive slumpmässiga fel. Det totala slumpmässiga felet är beräknat som kvadratroten ur summan av de olika felens kvadrater och de systematiska felen är aritmetiskt adderade.

Den horisontella noggrannheten för samtliga offsetpunkter bedöms vara bättre än 0,34 meter (95%). Den vertikala noggrannheten för offsetpunkt 1 är 0,21 meter (95%) och motsvarande för offsetpunkterna 2 och 3 är 0,13 respektive 0,17 meter. Dessa noggrannheter gäller för alla absoluta observationer som refererar till Mälarens referensnivå. De relativa observationerna som refererar till aktuell vattenyta påverkas också av noggrannheten i vattenstånd samt djupgåendeavläsningen som använts för beräkning av dynamiskt djupgående och squat. Dessa fel är dock så små, 2 respektive 4 cm, att de inte förändrar resultatet nämnvärt. Se bilaga 14.1 och 14.2.

³ http://www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/geodesi_gps_och_detaljmatning/Rapporter-Publikationer/Publikationer/Felteori_artikel_SINUS_2004_nr_3.pdf

Felbudgeten för beräkning av bottenklarning beaktar också sjömättningsnoggrannheten för djupdatat, enligt SRS44 Special Order, som är 26 cm (95%) på 10 meters djup. Den vertikala noggrannheten vid beräkning av bottenklarning är för offsetpunkt 1, 0,37 meter, och för offsetpunkt 2 och 3, 0,30 respektive 0,33 meter. Se bilaga 14.3.

De noggrannhetskontroller som utförts under datainsamling och analys har alla legat väl inom felbudget.

Utvärdering av mätmetoden

Resultatet visar att de data som samlats in uppfyller de primära målsättningarna och noggrannhetskraven enligt projektplanen, vilket innebär att mätsystem och mätmetod har fungerat tillfredställande. Även om det stundtals förekommit problem med positionstillgängligheten under resorna har tillräckligt mycket data kunnat samlas in för att få redundans och ge entydiga resultat.

Observera att vi inte med säkerhet har identifierat de mest extrema situationerna i farleden (största dynamiska djupgående, minsta bottenklarning, störst roll, etc.) då positioneringen inte varit kontinuerlig och den utnyttjade färdvägen inte täcker hela farledsbredden.

Det är också viktigt att observera att trots att den valda mätmetoden är att betrakta som extremt noggrann så närmar sig den uppskattade vertikala noggrannheten (beräknad på 95% tillförlitlighetsnivå) den minsta bottenklarning som identifierats.

Notera att det är kritiskt att modemutrustning inklusive antenn är av högsta klass för att tillgängligheten till Nätverks-RTK-tjänsten inte skall falla.

Det mätsystem som sattes upp ombord anpassades för att kunna ge redundans och för att ge möjlighet att kunna beräkna resultatet på flera olika sätt. Det var också meningen att olika mät- och beräkningsmetoder skulle kunna jämföras med avseende på resultat och effektivitet. En del av dessa metoder fallerade eller visade sig vara onödigt omständliga. Loggning av geografiska positioner och höjd för respektive GNSS-antenn blandades slumpmässigt i respektive fil på grund av problem med insamlingsmjukvaran. Dessa data skulle användas för att beräkna roll- och pitch-värden men kunde inte användas. Efterprocessning av de rådata (satellitavstånd) som loggades för respektive GNSS-antenn tog orimligt lång tid och gjordes endast för en del av en resa. Dessa positioner (höjder) användes för beräkning av roll- och pitch-värden. Jämförelsen mellan beräknade roll- och pitch-värden och insamlade värden från MRU visade god överensstämmelse med en skillnad som låg väl inom felbudgetens noggrannhet. Målsättningen var att kunna samla in data som var i det närmaste färdigt online utan att behöva genomgå en tidsödande efterprocessning. Detta lyckades endast till hälften eftersom beräkningar av alla offsetpunkter längs sidorna fick räknas om på grund av att utjämnningen av höjdvariationen i RTK-positionerna klippte av de naturliga rollrörelserna. Dessutom fick den horisontella positionen i samtliga offsetpunkter transformeras från SWEREF99 till RT90 för att få data i samma system som djupunderlaget.

De tre satellitmottagarna och dess antennplacering möjliggjorde kontroll av attitydmätarens kalibrering initialt och vid passage av Södertäljeslussen på lastresorna. Det medförde också valmöjlighet att växla mellan positionerna från de tre mottagarna för att använda den för stunden bästa positionen från någon/några av de tre mottagarna. Problem förekom också stundtals med positionsprogrammet och dataloggningen. De beräknade heading-värdena hoppade periodvis 10-30 grader under några resor vilket orsakade en del databortfall och loggning av geografiska data från satellitmottagarna blandades godtyckligt i olika loggfiler. Orsaken till detta är förmodligen den stora mängden av olika datatyper som loggades parallellt i samma PC.

Totalt sett har dock de problem som uppkommit inte påverkat noggrannhet och resultat utan gett värdefullt underlag för hur mätmetoden kan utvecklas och användas på ett effektivare sätt.

Möjligheter i framtiden

Ett mobilt mätsystem som används för liknande projekt och prov i framtiden kan utvecklas vidare och specialanpassas för ändamålet. Utvecklingen kan t.ex. bestå i:

- bättre kommunikationsutrustning för korrektionssignalen från Nätverks-RTK (NRTK) med längre räckvidd
- trådlös överföring av data mellan satellitmottagare och insamlingsdator
- mindre attitydmätare alternativt beräkning av attitydvinklar mellan satellitantenner med programvara
- anpassad programvara för datainsamling och efterprocessning.

Nya system för mobil kommunikation finns idag tillgängliga t.ex. det moderniserade digitala NMT-nätet och utökade möjligheter i befintliga GSM och 3G näten, såsom större bandbredd och fler frekvenser samt turbo-3G. Kommunikation via satellit är också en möjlighet vilket används på de flesta handelsfartyg idag. Sjöfartsverket har gjort begränsade försök med Nätverks-RTK uppkoppling via satellit med goda resultat. En bättre uppkoppling och täckning är en nödvändighet för att kunna utnyttja NRTK för de många användningsområdena inom sjöfarten.

Behovet av att kunna mäta ett fartygs dynamiska rörelser med hög noggrannhet har i princip alltid funnits och teknikutvecklingen har under de senare åren möjliggjort precisionspositionering över långa avstånd. Metoden med tredimensionell dynamisk positionering och offsetberäkning är väl beprövad i andra applikationer, t.ex. offshoreindustri och sjömätning. Tekniken kan användas för prov på fartyg av olika typer och storlekar och ligga till grund för farledsdesign, men också för precisionsnavigering i realtid för handelsfartyg i grunda och trånga farleder. Ett sådant navigationssystem kan även innehålla en bottentopografimodell

vilket ger möjlighet att direkt visualisera aktuell bottenklarning samt även presentera botteninformation längre fram i farleden. Dynamisk information från fartyget skulle även kunna skickas till en landbaserad central, t.ex. VTS, som kan vidarebefordra kritisk information som beslutsunderlag för Lots eller navigatör.

Åtminstone ett kommersiellt företag på den internationella marknaden utför ”Ship motion analysis” och ”Underkeel clearance management” för fartyg vid angöring till utvalda hamnar.

Det pågår även utveckling av digitala sjökort där bottenpografi, tidvattenmodell med aktuella djupkurvor kan visualiseras över tid⁴. Även i Sverige pågår forskning vid Mälardalens högskola med syfte att skapa beslutsstödssystem ombord som bygger på 3D-sjökort. Målet är en intuitiv, snabb och säker omvärldsvisualisering⁵.

Slutsatser

De dynamiska rörelserna för BW Helen motsvarar teorin i PIANC både vad gäller squat-tendenser och trimförändring. De data som samlats in och analyserats visar entydiga resultat och är rimliga både i jämförelse med teorin i PIANC och vid jämförelse mellan de olika resornas insamlade data. De variationer som finns mellan de olika resorna ligger alla inom den beräknade felbudgeten. Använt mätsystem och använd mätmetod har uppfyllt de krav som ställts i projektplanen. Likaså har de primära målsättningar som angivits i projektplanen uppfyllts.

Resultatet visar också tydligt att fartförändring och roll påverkar det dynamiska djupgåendet. Dessa kan verka i kombination med squat och öka djupgåendet avsevärt. I vissa fall kan den dynamiska djupgåendeökningen mer än fördubblas. Ett förslag på metod att summera de tre olika dynamiska företeelserna squat, fartförändring och roll har presenterats i rapporten. Dynamiskt djupgående har med få undantag varit som störst i de grunda delarna i farleden. Det måste poängteras att de värden som observerats och presenteras i rapporten inte kan anges som maximala eftersom det förekommit mycket databortfall, speciellt under första lastresan. Generellt har dock positioneringen med Nätverks-RTK fungerat bra i de fall då fixlösning erhållits. Däremot har tillgängligheten varit bristfällig i vissa områden och vid vissa tidpunkter. Detta kan ha berott på dålig GSM-förbindelse eller dålig satellitkonfiguration. Vissa områden i Mälaren är dock kända för att ha problem med GSM-uppkopplingen.

De största dynamiska rörelserna förekom under första lastresan. Denna resa hade det största dynamiska djupgåendet och under längst tid. Det är uppenbart att farten spelar en stor roll och vid denna resa var farten ca 2 knop högre i de grunda områdena jämfört med de två andra resorna på full last. Den relativa jämförelsen mellan lastresorna, jämförelse i samma fart-

4 http://www.thsoa.org/hy07/09_02.pdf

5 Thomas Porathe forskningsledare <http://www.idp.mdh.se/forskning/detaljprojekt.asp?id=141>

register, visade god överensstämmelse varför de dynamiska rörelserna kan anses signifikativa för en resa med samma farter som första lastresan. Slutsatsen är att dynamiskt djupgående mellan 7,60 och 7,95 meter (dynamisk djupgåendeökning 0,8-1,15 meter) med fart över 10 knop kan förekomma vid passage av de grunda områdena i farleden. Squat-kurvorna visar också att den dynamiska djupgåendeökningen för BW Helen har värden på över en meter vid liten bottenklarning.

Fler prov för att undersöka andra fartygs dynamiska rörelser bör företas för att verifiera resultaten från detta projekt och samtidigt kunna vara ett stöd i farledsdesign. Dessa prov bör förläggas i områden där kritiska farledsavsnitt med liten bottenklarning förekommer. I detta projekt samlades data in under både ballastresor och lastresor, totalt sju resor. Det är inte nödvändigt att samla in data under så många resor utan entydighet och tillräcklig redundans bör erhållas efter ca tre resor med acceptabla data.

För att etablera och hantera mätutrustningen samt för analys och utvärdering av resultatet krävs kunskap och erfarenhet. Den tekniska kunskap som finns och förvärvats om dynamiska mätsystem och mätmetoder inom Sjöfartsveket bör förmedlas till intresserade. Detta kan ske antingen som information, support eller som tillförande av kompetens i externa projekt.

Rekommenderad konfiguration av mätsystem

Ett optimalt mobilt mätsystem består av så lite mätutrustning som möjligt eftersom det måste vara lätt att transportera och gå fort att installera. Samtidigt är det av största vikt att kunna montera antenner och liknande utrustning stabilt. Kalibrering av systemet är väsentligt för att verifiera att det ger rätt värden initialt samt under mätningen genom att tillhandahålla redundans. Detta kräver i de flesta fall dubblering av en del av utrustningen. Erfarenheten från detta projekt visar att en dubblering av attitydmätning och position bör användas. Tre satellitantenner med mottagare etableras på fartyget varav två placeras tvärskepps, i rät vinkel mot längskeppslinjen längst ut på varje sida, och en i centerlinjen. Mellan antennerna tvärskepps, som skall sitta så långt förut eller akterut som möjligt, kan en rollvinkel och heading beräknas. Antennen i centerlinjen bör sitta så långt ifrån tvärskeppsantennerna som möjligt för att kunna beräkna en noggrann pitchvinkel. Stabila montage är dock ännu viktigare. Denna långa baslinje kan också användas för kontroll av heading. Notera att en lång baslinje som sträcker sig över en stor del av fartygets längd kan påverkas av fartygets interna dynamiska rörelser t.ex. ”hogging” och ”sagging”. Detta kan göra det svårt eller omöjligt att beräkna en noggrann pitch-vinkel men skulle i stället kunna användas till att beräkna fartygets interna dynamiska rörelser. Satellitantennerna måste etableras högt med så fri horisont som möjligt och med stagning för att undvika maskning av satelliter och antennrörelser. Tvärsantennerna bör sitta nära den övriga mätutrustningen för att minimera längden på antennkablarna. Längskeppsmottagaren skall ha förbindelse med insamlingsdatorn via trådlöst interface för att undvika lång antennkabel som annars behöver förstärkning. Vinklar från attitydmätare kan användas för offsetberäkning i realtid och i efterprocessning. För kalibrering och kontroll av attitydmätaren kan beräknade vinklar mellan satellitantenner

användas. Alternativt används beräknade vinklar mellan satellitantennerna och kontroll sker med attitydmätare.

Antenn för överföring av korrektionssignal från Nätverks-RTK måste sitta så högt och fritt i fartyget som möjligt för att undvika problem med mottagning. Antennen måste ha bra kvalitet och vara anpassad för frekvensen.

Stor vikt bör läggas på att mäta in och beräkna installation av satellitantenner, kalibrering av attitydmätare samt höjdetablering i fartyget. Åtgärder måste vidtas för att snabbt och noggrant kunna utföra djupgåendeavläsning runt om på alla fartygets åmningar vid kalibrering och kontroller. Data som samlas in i positionsinsamlingsprogrammet skall begränsas till referenspunkten, offsetpunkten förut och offsetpunkten akterut förutom tid, roll, pitch, heading. Övriga offsetvärden beräknas i efterprocessning. Rådata från satellitmottagarna samlas in i ett separat program.

Visualisering av dynamiska rörelser

Två presentationer av resultatet har hållits för lotsarna i Stockholm/Mälaren. Där visualiserades resultatet tredimensionellt i IVS Fledemaus med en skalenlig fartygsmodell, bottenpografi, kritiska djupkurvor och valda spår från en lastresas offsetpunkter. Fartyget följde de loggade positionerna och rörde sig dynamiskt med de insamlade attitydvärdena roll, pitch och heading samtidigt som värden för aktuell bottenklarning i varje offsetpunkt visades. Visualiseringen av fartygsmodellen sågs som mindre viktig för lotsarna. Däremot upplevdes den tredimensionella bottenpografien med valda djupkurvor, samt i vissa avsnitt spåren från offsetpunkterna, vara mycket värdefull. En komplettering med prickar och bojar längs farleden skulle vara önskvärt. Här sågs möjligheten att kunna stega sig fram längs farleden och detaljstudera kritiska passager och grundområden.

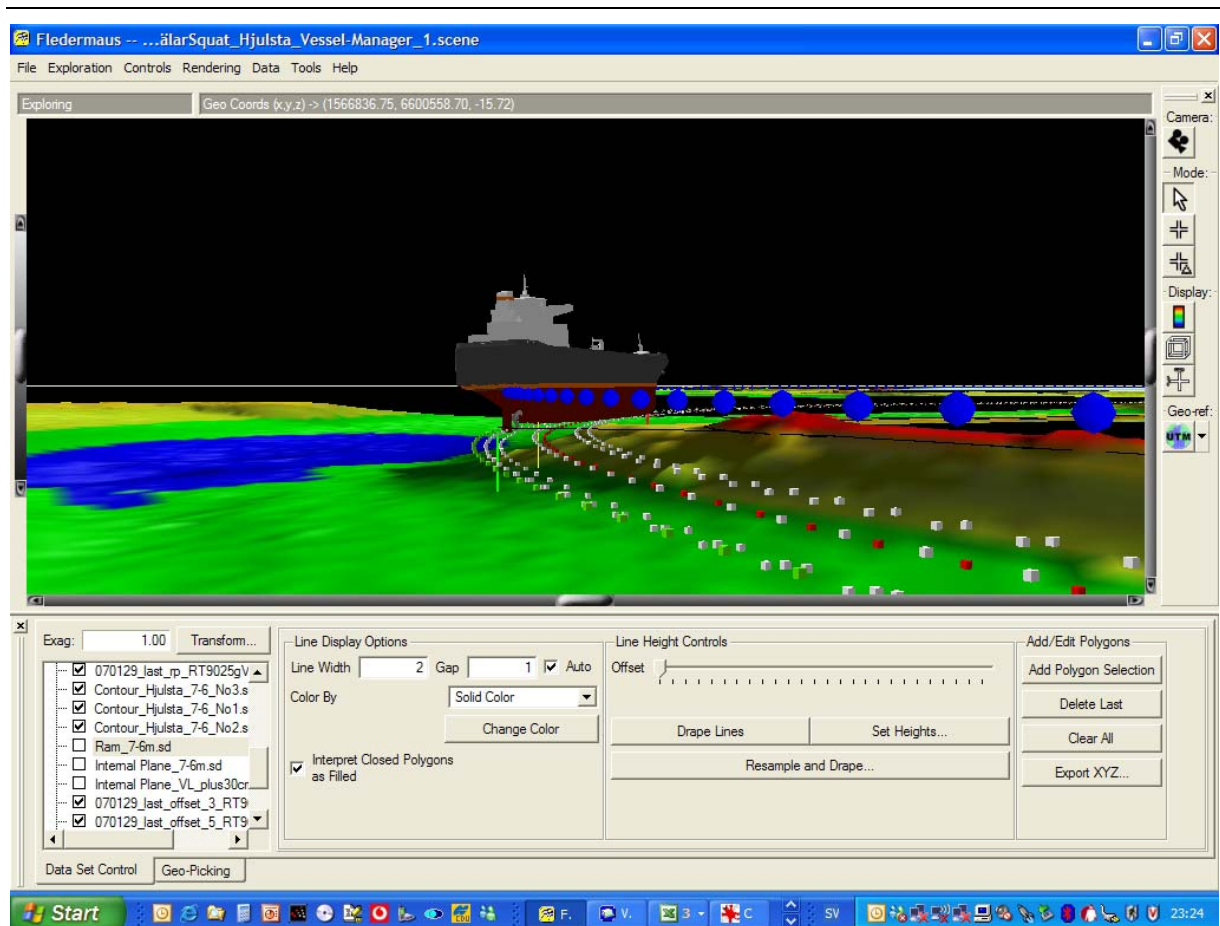


Bild 5. IVS Fledermaus, skalenlig fartygsmodell och djupdata. Blått spår är referenspunkten, rött spår är offset 1, grönt spår är offset 2, övriga spår är offset 3-8 bordvarts.

Medverkande utanför projekt och referensgrupp

Fältsamordning

Mårten Hörlin, Peter Lögdberg och Ulf-Göran Jonsson hjälpte till med etablering, installation och datainsamling.

LMV SWEPOS

Peter Wiklund, LMV, stod till tjänst med support och svar på frågor om Nätverks-RTK-tjänsten.

Mälaragent AB

BW Helens agent var mycket hjälpsam och stod till tjänst dygnet om med information om fartygets ankomst, avgång och eventuella förseningar. De hjälpte även till med tillträde inom ISPS område både i Köping och i Västerås hamn.