

PÅSEGLINGSANALYS STRIDSBERGSBRON

Projektnamn **Stridsbergsbron**
 Projektnr. **1320035329**
 Kund **PEAB Anläggning**
 PM nr. **Tekn-6**
 Version **C**
 Till **Per-Anders Gustafsson**
 Från **Rambøll**
 Kopia till
 Datum **2019-05-02**

Utarbetad av **FMR, NSLG**
 Granskad av **LC**
 Godkänd av **CMN**

Innehållsförteckning

1	Introduktion	2
1.1	Revidering, version B	2
1.2	Revidering, version C	2
2	Projektet	3
3	Sjökort och strömhastighet	5
3.1	Sjökort.....	5
3.2	Strömhastighet.....	6
4	Analys av ett års AIS-data	7
5	Dimensionerande farttyg	12
5.1	Nuvarande förhållanden	12
5.2	Framtida förhållanden	12
6	Påseglingsscenario	13
6.1	Påsegling av bron i öppet läge	13
6.2	Påsegling av bron i stängt läge	15
6.3	Påsegling av den västra tillfartsbron	15
7	Risk och sannolikhet	16
7.1	Kollisionsfrekvens	16
7.2	Individrisk	17
7.3	Osäkerheter	18
8	Påseglingskraft	19
8.1	Brostöd	19
8.2	Överbyggnad	19
9	Projektering av påseglingsskydd	20
9.1	Påseglingsskydd för brostöd	20
9.2	Förutsättningar för utformning av påseglingsskydd	20
9.3	Föreslagen utformning.....	23
9.4	Påsegling av ledverk	25
9.5	Påsegling av kassun	26
9.6	Påsegling av överbyggnad.....	26
10	Referenser.....	27

Rambøll
 Hannemanns Allé 53
 DK-2300 København S

T +45 5161 1000
 F +45 5161 1001
<https://dk.ramboll.com>

1 Introduktion

Enligt brokonstruktionsstandard Krav Brobyggande (TDOK 2016:0204) avsnitt B.5.3 skall, om byggherren så anger, risken för påsegling av broar över vattendrag med sjötrafik beaktas. Den planerade Stridsbergsbron löper över en trafikerad farled i Göta älv och byggherren, Trollhättan stad, har gett Ramböll i uppdrag att analysera påseglingsrisken.

Analysen i denna rapport kartlägger inledningsvis de aktuella förhållandena så som observerad sjöfart inklusive fartygens displacement och hastighet (AIDS-data), vattendragets strömhastighet samt brons respektive fartygens geometriska utformning i avsnitt 2-5. Eftersom farleden trafikeras av lastfartyg med en betydande storlek och hastighet och eftersom det fria avståndet mellan brostöd bedöms som litet i förhållande till fartygens storlek anses det föreligga en risk för påsegling av den rörliga bron, tänkbara påseglingsscenario framgår av kapitel 6. Under arbetet med denna rapport har dock ingen kvantifierande riskanalys utförts som kan ge svar på återkomsttider för särskilda olyckshändelser osv. Däremot är det möjligt att dra vissa slutsatser från en motsvarande påseglingsanalys som genomförts för ett projekt med liknande förutsättningar, nämligen Hisingsbroprojektet i Göteborg, avsnitt 7.

Påseglingskraftens storlek på brostöd kan bestämmas approximativt enligt europeisk beräkningsstandard, Eurocode EN1991-1-7. I en första ansats beräknas påseglingskraften för en påsegling med fören, dvs en frontalkollision mellan fartyg och brostöd, avsnitt 8, och därefter redogörs förutsättningarna för utformning av eventuellt påseglingsskydd, avsnitt 9.

1.1 Revidering, version B

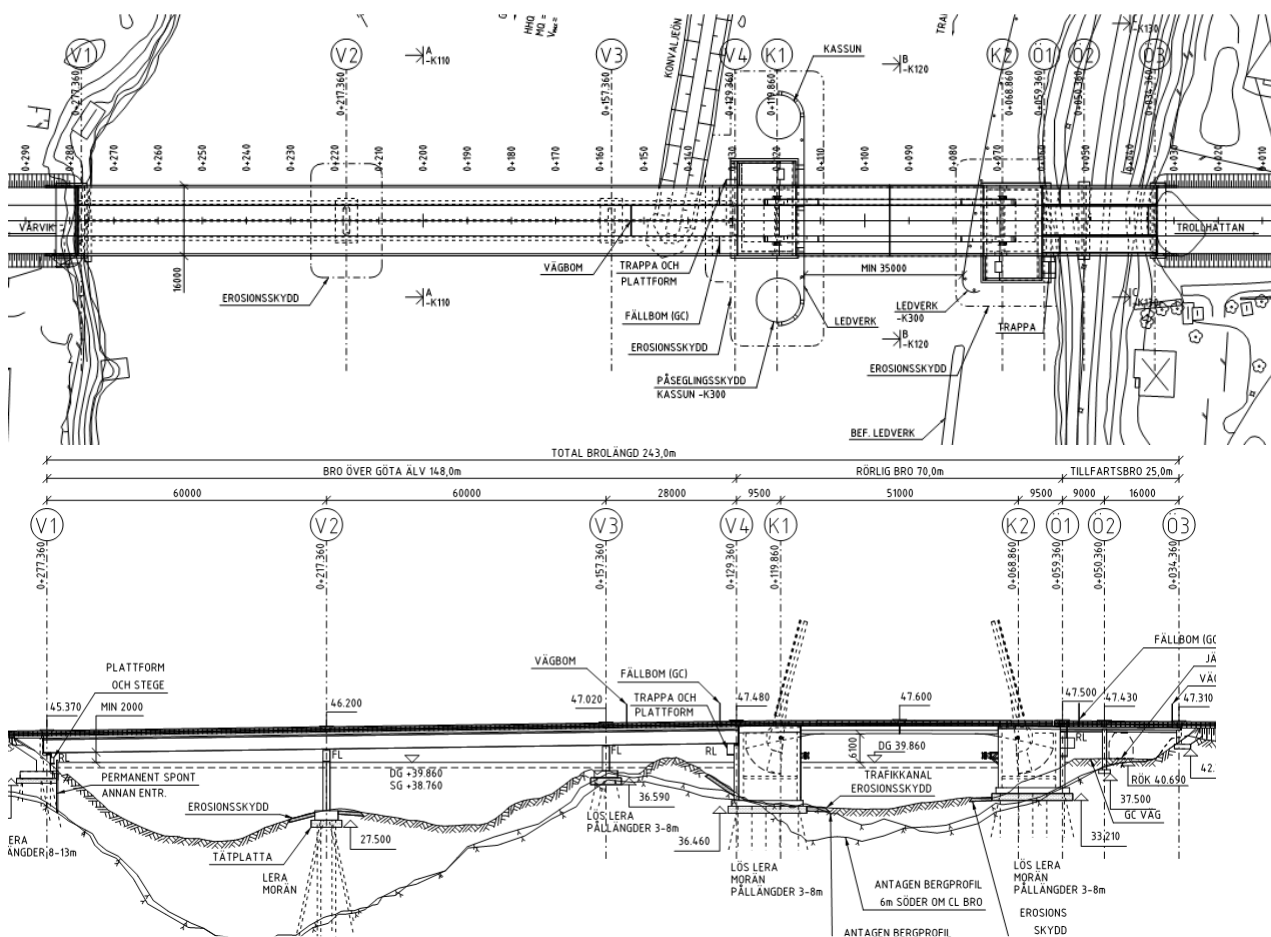
Rapporten har reviderats med hänsyn till utökad segelfri bredd i farleden och förändrad utformning av påseglingsskydd med hänsyn till isfrihållning av kanalen. Rapporten har också kompletterats med kapitel 7 som innehåller en sammanfattning av resultat från "PM Riskanalys Påsegling – samrådsunderlag" samt tillägg "PM – Ökat antal fartygspassager" med avseende på beräkning av kollisionsfrekvens och individrisk till följd av påsegling av Hisingsbron.

1.2 Revidering, version C

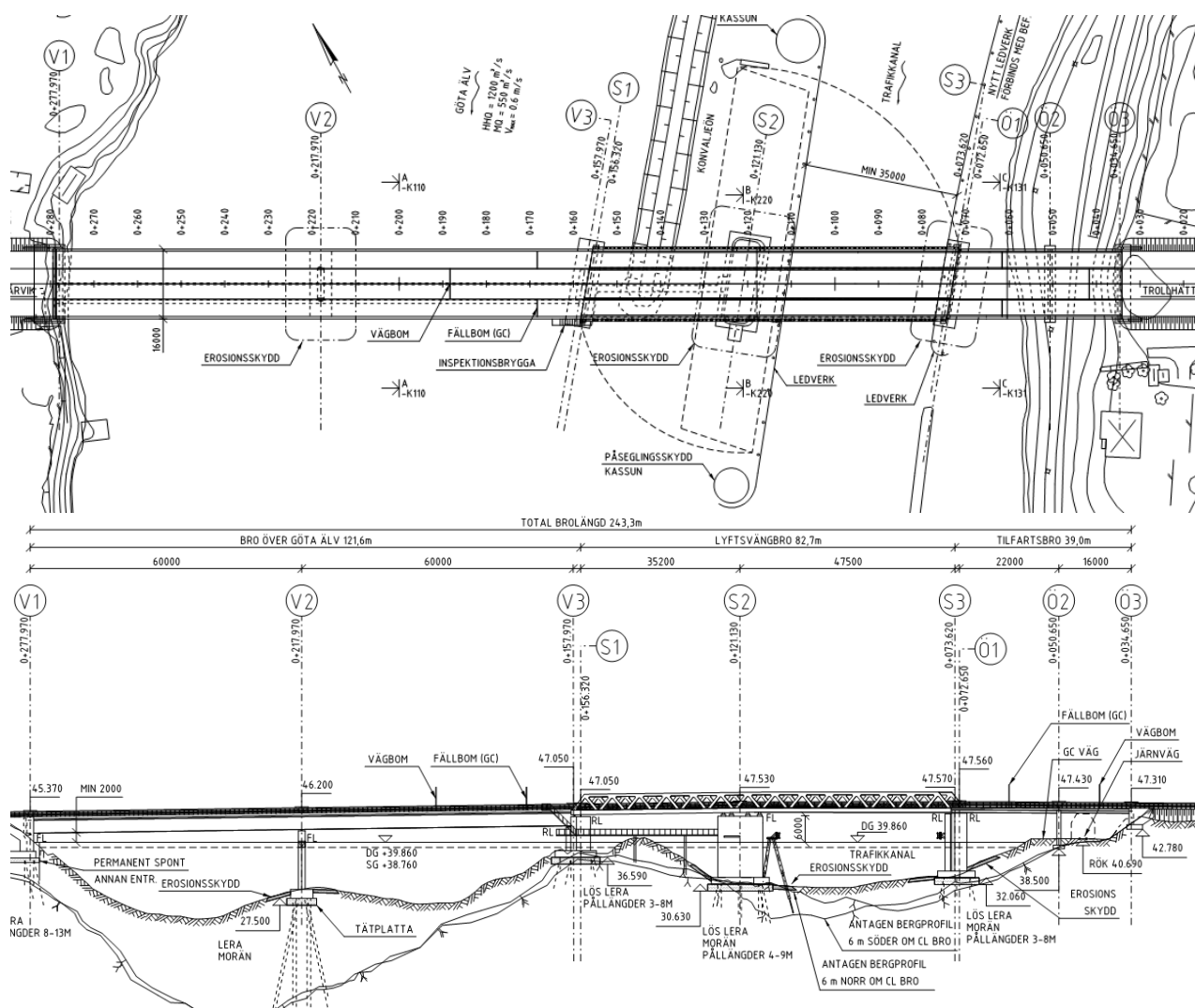
Rapporten har reviderats med hänsyn till efterfrågad information om risk för påsegling av den fasta bron i den västra älvfåran, kapitel 6.3, 7.1.1, 9.2.5. Dimensionerande fartyg har definierats med hänsyn till framtida förhållanden och en hastighet som motsvarar hastighetsbegränsning enligt sjökort, kapitel 5 och 8. Figurer i kapitel 2 har uppdaterats till senaste version av förslagsskiss.

2 Projektet

Trollhättan stad planerar att bygga en ny bro över Göta älv och den del av bron som löper över den trafikerade farleden utformas som rörlig bro: dubbelklaffbro eller lyftsvängbro. Figur 2.1 och Figur 2.2 visar förslagsskisser för båda alternativ.



Figur 2-1 Översiktlig förslagsskiss, plan och elevation för dubbelklaffalternativet.



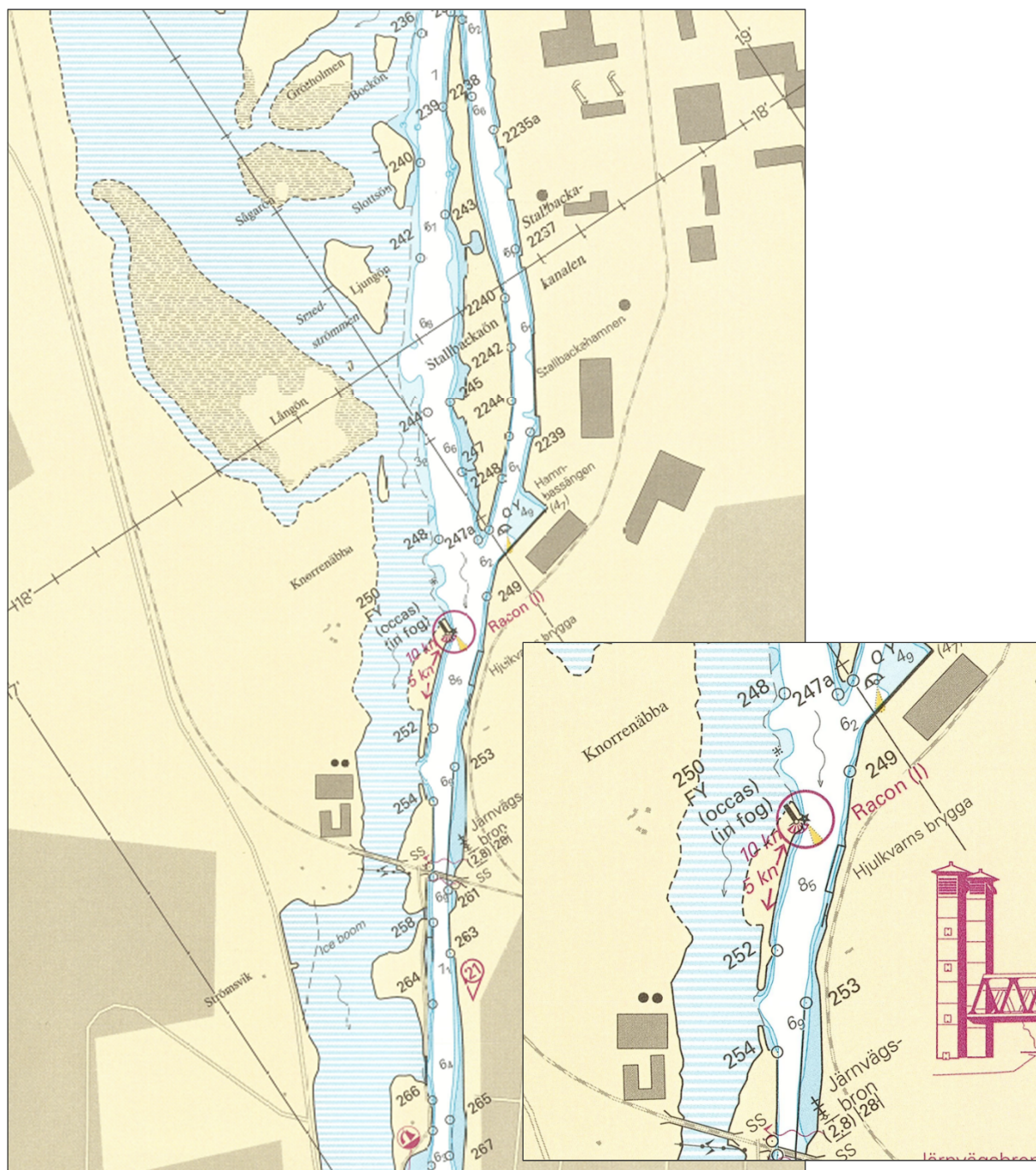
Figur 2-2 Översiktlig förslagskiss, plan och elevation för lyftsvängbroalternativet.

3 Sjökort och strömhastighet

Upplysningar på sjökort och observerad strömhastighet ligger till grund för analysen av AIS-data och val av dimensionerande fartyg.

3.1 Sjökort

Sjökort SE1353 "Göta Älv – Trollhätte Kanal, North" visar sjöförhållanden i området omkring den planerade bron (Figur 3-1).



Figur 3-1 Utklipp ur sjökort SE1353 "Göta Älv – Trollhätte Kanal, North", © Sjöfartsverket.

I sjökortets fotnot anges en generell hastighetsbegränsning om 10 knop såvida det inte finns andra anvisningar. Precis norr om järnvägsbron är hastighetsbegränsningen 5 knop som övergår till 10 knop i höjd med Konvaljeön enligt sjökort.

Av sjökort framgår också maximala fartygsdimensioner:

- Längd 87m (89m)
- Bredd 12,6m (13,4m)
- Djupgång 4,7m (5,4m)
- Masthöjd 27m

Tal inom paranets () är fartyg med dimensioner som kräver särskilt tillstånd.

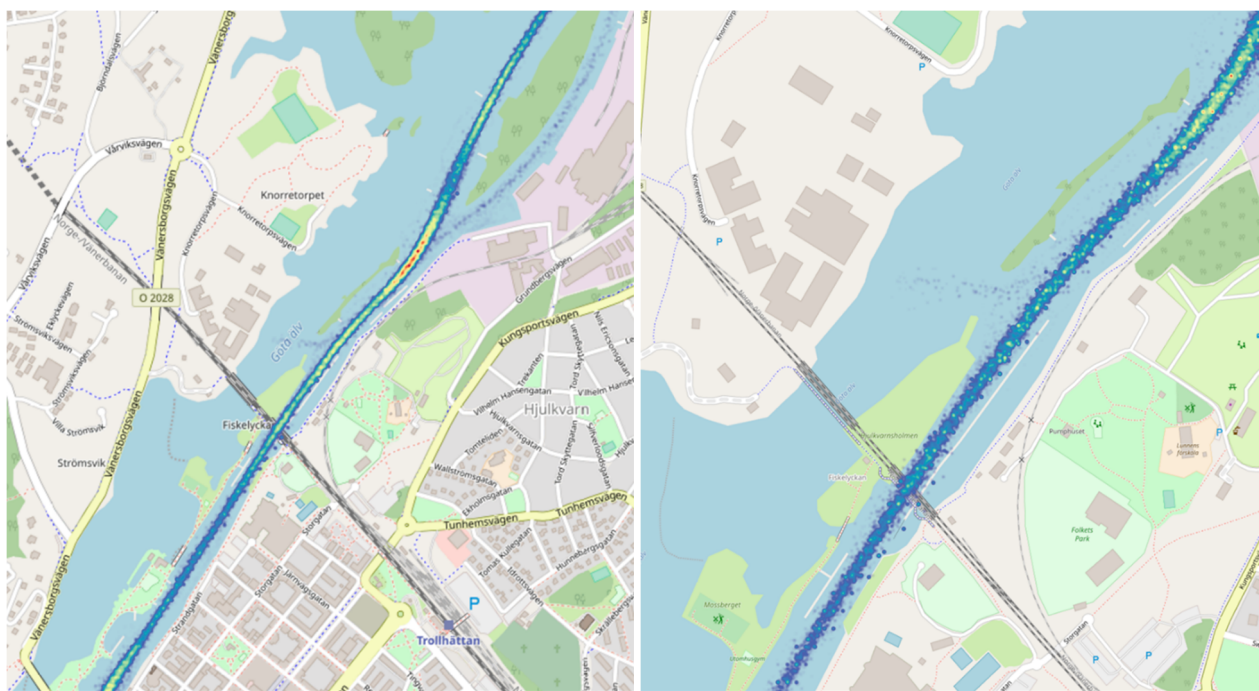
3.2 Strömhastighet

Vattnets strömhastighet i området är dokumenterat i rapporten "Hydraulisk utredning – ny bro över Göta älv", Sweco, 2018-10-05. I rapportens tabell 4 har strömhastighet under normala förhållanden uppgetts vara 0,35 m/s (motsvarande ca 0,7 knop). En så låg strömhastighet har ingen betydande inverkan på sjöfarten och styrförmågan för de större handelsfartygen vilken ligger till grund för att bestämma påseglingslastens storlek.

4 Analys av ett års AIS-data

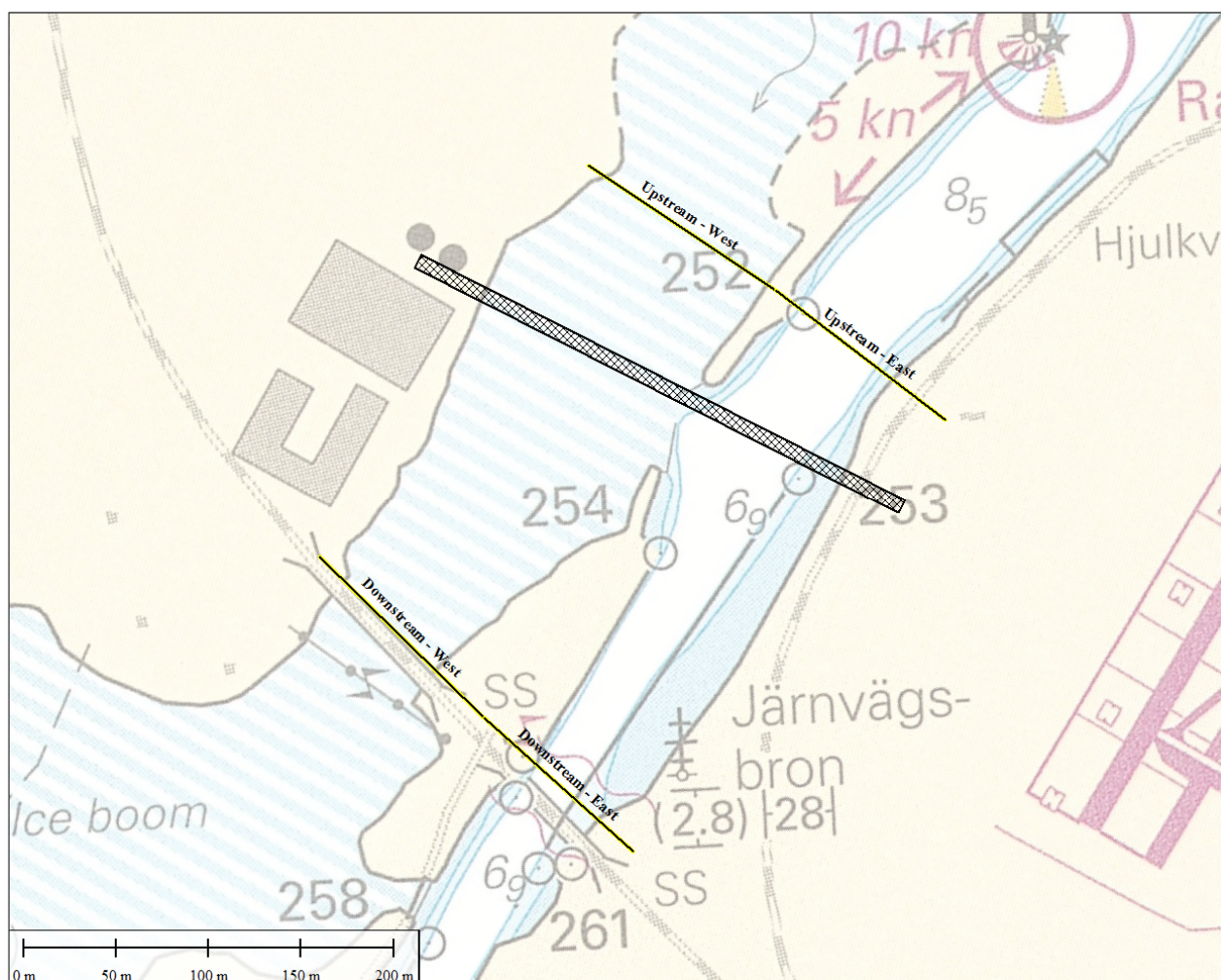
AIS (Automatic Identification System) är ett system som gör det möjligt att identifiera ett fartyg och följa dess rörelser genom att fartyget regelbundet skickar ut information om fartygets position, hastighet och kurs på en digital radiokanal. Vidare innehåller denna data också information om fartygets namn, bredd och längd. Systemet har införts för att fartyg lättare skall kunna identifiera varandra i real-tid och på så sätt öka säkerheten i sjöfarten. Fartyg i den svenska handelsflottan sänder AIS-data var 3e sekund och data lagras av Sjöfartsverket för att senare kunna användas för analys och kartläggning av sjöfarten inom ett visst område. Systemet är lagstadgat för alla färjor över 300 BRT (motsvarar fartyg med längd ca 30 m) på internationella seglatser och för alla lastfartyg över 500 BRT på nationella seglatser. AIS är frivilligt för mindre fartyg och båtar men många fartyg i denna kategori använder också AIS.

Denna påseglingsanalys baseras på ett års AIS-data för perioden 2017-10-01 til 2018-09-30. Intensiteteten av datapunkter från AIS-data i området framgår av Figur 4-1 (heat map).



Figur 4-1 Intensitet av AIS-datapunkter (heat map), i området omkring bron (2017-10-01 til 2018-09-30).

AIS-data utnyttjas för att bestämma massa, hastighet och storlek för ett dimensionerande fartyg. Datan analyseras genom att sätta upp fyra stycken passagelinjer enligt Figur 4-2.



Figur 4-2 Passagelinjer för kartläggning av sjöfart som passerar broläget. Brons placering på sjökortet är ungefärlig och dess utbredning är inte skalenlig.

De fyra passagelinjerna är:

1. "Upstream West": Passagelinje norr om bron, väster om Konvaljeön. Här bör det inte finnas någon sjöfart och registrerad AIS-data.
2. "Upstream East": Passagelinje norr om bron, över trafikkanalen, som måste passeras av all sjöfart förbi bron.
3. "Downstream West": Passagelinje söder om bron, väster om trafikkanalen framför bågbron. Här bör det inte finnas någon sjöfart och registrerad AIS-data.
4. "Downstream East": Passagelinje söder om bron, över trafikkanalen och framför lyftbron, som måste passeras av all sjöfart förbi bron.

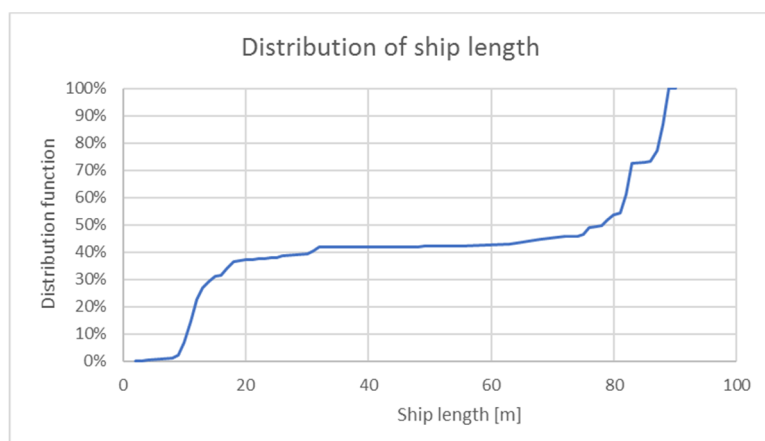
Inom utvald AIS-data, för ett år, finns det precis som förväntat inte några registrerade passager förbi passagelinje 1 och 3 vilket innebär att den fasta tillfartsbron väster om Konvaljeön inte dimensioneras för påsegling.

Förbi passagelinje 2 och 4 har det registrerats 1378 respektive 1334 passager vilket motsvarar ca 4 passager om dagen i genomsnitt. Precis som förväntat passerar de flesta fartyg båda två passagelinjer, skillnaden i antal passager (<4%) kan bero på att några fartyg (förmodligen mindre båtar) passerar linje 2 och vänder eller att AIS-datan innehåller mindre fel och avvikelser.

Följande analys baseras på passager vid passagelinje 2 vilket antas motsvara aktuell sjöfart förbi broläget och passagelinje 4.

Av de 1378 passager som finns registrerade i aktuell AIS-data har fartygets längd registrerats vid 1352 passager vilket motsvarar 98% av alla passerande fartyg vilket får anses vara en mycket god täckning. Fartyg vars längd inte registrerats är för det mesta av mindre storlek emedan större fartyg generellt sett har en mera omfattande beskrivning i AIS-data.

Observerad fördelning av fartygslängd över passagelinje 2 framgår av Figur 4-3.



Figur 4-3 Observerad fördelningsfunktion för fartygslängder över passagelinje 2 (2017-10-01 till 2018-09-30).

Figuren visar att trafiken är i huvudsak fördelad mellan små fartyg (längd <30m) och stora fartyg (längd >70m). Figuren visar exempelvis att 40% av fartygen har en längd mindre än 30m, 50% mindre än 78m och att alla fartyg har en längd som är kortare än 90m. Det längsta observerade fartyget har en längd på 89 meter vilket motsvarar den största tillåtna längden genom slussarna i Trollhätte kanal (se avsnitt 3.1). Det är viktigt att konstatera att en mycket stor andel fartyg har en längd över 80 m.

För att bestämma en dimensionerande påseglingslast på bron skall först parametrar för ett motsvarande fartyg bestämmas så som längd, bredd, djupgång, hastighet och massa.

Utvalda exempel på stora och ofta förekommande fartyg i aktuell AIS-data framgår av Tabell 1 och Figur 4-4. Dessa fartyg är allihop lastfartyg, vilket är typiskt för de större fartygen i området omkring broläget. Deras dimensioner och djupgång är mycket nära de maximalt tillåtna.

Tabell 1 Utvalda exempel på stora och ofta förekommande fartyg i aktuell AIS (2017-10-01 till 2018-09-30).

MMSI	Namn	Längd [m]	Bredd [m]	DWT [ton]	Observerad djupgång [m]	Observerad hastighet [knop]	Antal passager
231794000	NAVEN	89	13.2	4191	3.5-5.4	2.6-7.9	17
231843000	EKEN	89	13.4	4775	3.9-5.4	4.9-7.2	18
244059000	LURO	89	13.4	4919	3.3-5.4	1.0-7.0	30
244063000	LECKO	89	13.6	4775	3.6-5.4	1.9-7.0	23

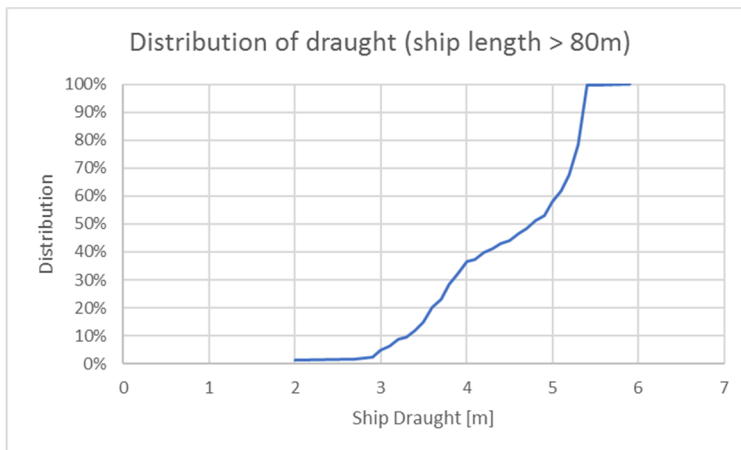


Figur 4-4 Utvalda exempel på stora och ofta förekommande fartyg i aktuell AIS (2017-10-01 til 2018-09-30). Överst: "Naven" (vänstre), "Eken" (höger). Nederst "Lurö" (vänster), "Leckö" (höger).

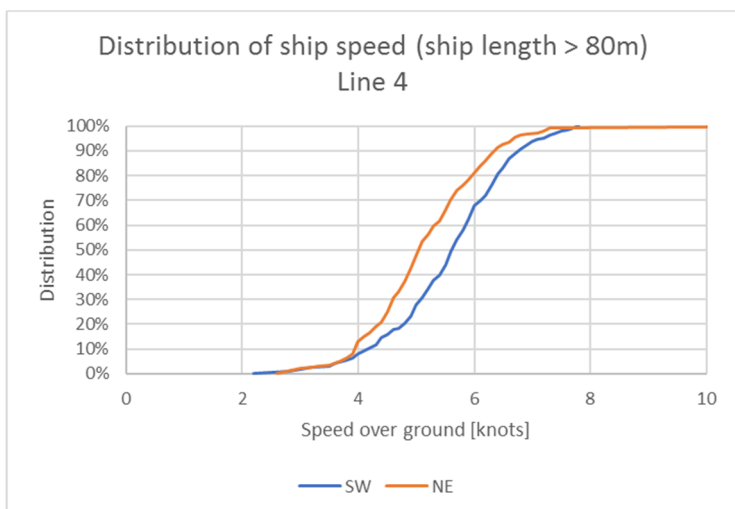
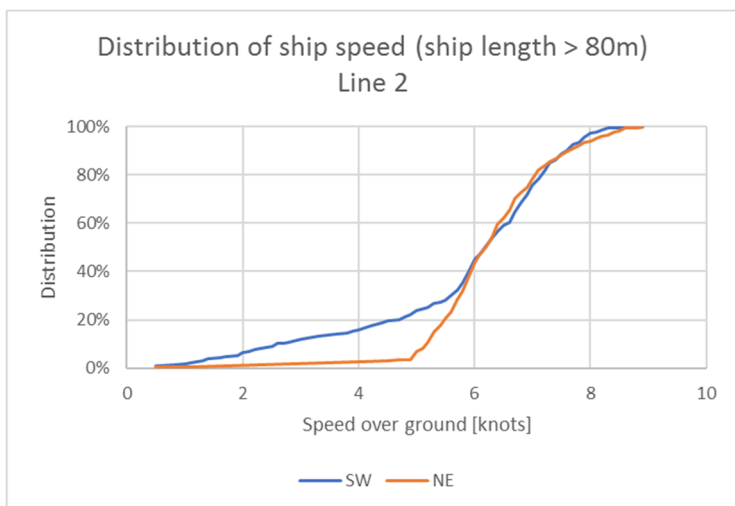
Djupgång och hastighet kan variera från fartyg till fartyg och från passage till passage. Därför är den observerade fördelningsfunktionen för djupgång och hastighet för fartyg med en längd över 80 m redovisade i Figur 4-5 respektive Figur 4-6.

Figur 4-5 visar att många av de större fartygen lastas till en motsvarande djupgång nära den maximalt tillåtna på 5,4 m (se avsnitt 3.1).

Figur 4-6 visar observerade hastigheter upp mot 8 knop (SOG) för de större fartygen. Detta gäller både vid passagelinje 2 och 4 och för både norr- och södergående trafik. Endast omkring hälften av de större fartygen håller hastighetsbegränsningen vid passagelinje 4 och med hänsyn till styrförmåga är det viktigt att påpeka att fartygen inte kan hålla en alltför låg hastighet i förhållande till vattnet. Observerad hastighet i AIS-data för de större fartygen kan tyda på att det finns en osäkerhet huruvida 5 knop är tillräckligt i broläget.



Figur 4-5 Observerad fördelningsfunktion för djupgång (fartyg med längd >80m).



Figur 4-6 Observerad fördelningsfunktion för hastighet över passagelinje 2 (överst) respektive passagelinje 4 (nederst) Orange linje markerar norrsgående, uppströms, fartyg och blå linje markerar södergående, medströms, fartyg (fartyg med längd >80m).

5 Dimensionerande fartyg

5.1 Nuvarande förhållanden

Med hjälp av upplysningar från sjökort och strömningsförhållanden i avsnitt 3 tillsammans med analysen av ett års AIS-data enligt avsnitt 4 är det möjligt att beskriva ett typiskt fartyg med hänsyn till påsegling av Stridsbergsbron under nuvarande förhållanden, dvs före en eventuell utbyggnad av slussarna i Trollhätte kanal. AIS-data visar att en betydande andel av trafiken utgörs av fartyg med dimensioner som ligger nära de maximalt tillåtna enligt sjökort (Vänermax). Hastigheter upp mot 7-8 knop har observerats. Med hänsyn till påsegling under nuvarande förhållanden antas därför ett typiskt fartyg som har maximalt tillåtna dimensioner och en hastighet av 8 knop (som också tar vattnets strömhastighet i beaktande).

Fartygets karakteristika:

- Typ: Havsgående lastfartyg (general cargo)
- Längd 89m
- Bredd 13,6m
- Djupgång 5,4m
- Displacement 5200 ton (med en block-koefficient 0,8)
- Hastighet 8 knop (Speed Over Ground, SOG)

5.2 Framtida förhållanden

Om det i framtiden blir möjligt att segla ännu större och tyngre fartyg på Göta älv är det rimligt att anta att en betydande andel av trafiken kommer att utgöras av fartyg med dimensioner som motsvarar de maximalt tillåtna. Enligt Trafikverkets rapport "Vänersjöfart och slussar i Trollhätte kanal - Byggtekniska alternativ och samhällsekonomiska effekter, slutversion 2017-02-27" kan man läsa att den segelfria höjden samt det maximala djupgåendet i farledsstråket bedöms såsom oförändrat inom överskådlig tid. Den begränsande faktorn är framför allt bredden och där är Marieholmsbroarna i Göteborg dimensionerande vilka tillåter en maximal fartygsbredd av 16,5 meter. Studien har kommit fram till att följande fartygsdimensioner (se också TRVs rapport s. 23):

Fartygets karakteristika:

- Typ: Havsgående lastfartyg (general cargo)
- Längd 110m
- Bredd 15,2m
- Djupgång 5,4m
- Displacement 7200 ton (med en block-koefficient 0,8)

5.2.1 Dimensionerande fartyg

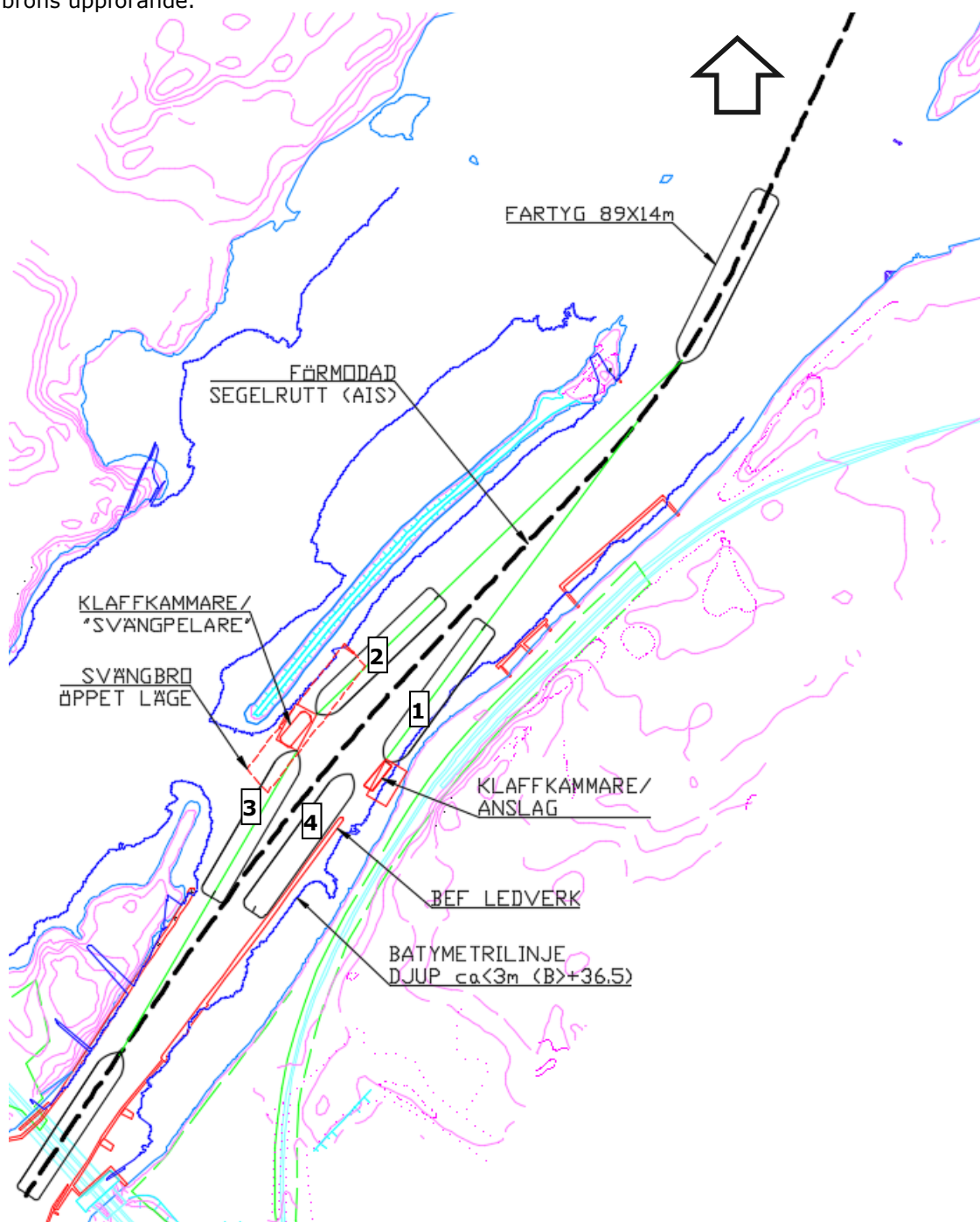
Det föreslås att brostöd och eller påseglingsskydd dimensioneras för fartyg enligt framtida förhållanden. Samtidigt antas det att den gällande hastighetsbegränsningen av 5 knop kan efterlevas efter det att en ny bro har uppförts. Med hänsyn till styrförmåga är det dock viktigt att påpeka att fartygen inte kan hålla en alltför låg hastighet i förhållande till vattnet, se avsnitt 4.

6 Påseglingsscenarion

Påsegling av bron i öppet läge anses vara mera sannolikt än påsegling i stängt läge eftersom det förutsätts att bron alltid är bevakad och att bron normalt sett kan öppnas när så krävs.

6.1 Påsegling av bron i öppet läge

Fyra olika påseglingsscenarion framgår av Figur 6-1. De norr- respektive södergående fartygens förmodade segelrutt (plottad i figuren) har definierats baserat på AIS-data och trolig rutt efter brons uppförande.



Figur 6-1 Möjliga påseglingsscenarion med avseende på brostöd för rörlig bro. Möjliga kollisionskurser har markerats med gröna linjer.

Som utgångspunkt anses påsegling vara mest sannolik i en situation som uppstår då fartyg fortsätter på inslagen kurs utan att kunna väja för brostöd (mest sannolikt på grund av den mänskliga faktorn och mindre sannolikt på grund av tekniskt haveri i maskin eller av instrument). De fyra olika påseglingsscenarierna enligt Figur 6-1 beskrivs enligt lista nedan:

1. För södergående fartyg bedöms en kollision med det östra brostödet vara mest sannolik eftersom södergående fartyg måste gira (västerut) för att klara passage av bron och en ofullbordad gir kan innebära kollsionskurs.
2. En kollision med det västra brostödet är minde sannolik jämfört 1) eftersom denna situation först uppstår efter det att fartyget girat för mycket vilket anses mindre sannolikt.
3. För norrgående fartyg är en kollision med det västra brostödet mest sannolik eftersom södergående fartyg måste gira (österut) för att klara passage av bron.
4. Sannolikheten för att det östra brostödet blir påseglat av norrgående fartyg bedöms vara betydligt mindre jämfört övriga tre scenarion. Förutom att detta scenario anses mindre sannolikt än exempelvis 3) eftersom det uppstår först efter det att fartyget girat för mycket är det också mindre sannolikt på grund av två andra och viktigare orsaker. För det första är fartygen "styrda" av ett befintligt ledverk som täcker hela sträckan från järnvägsbron t.om. de närmsta 10-15 m söder om nytt brostöd, se Figur 6-1 (i tillägg har detta ledverk uppskattningsvis en längre och olycksfri historia). Avståndet mellan befintligt ledverk och nytt brostöd är mycket litet i förhållande till de större fartygens längd vilket innebär att en påsegling av brostöd med fören är omöjlig så länge fartyget seglar längs med ledverket. För det andra visar batymetrin att bottennivån direkt innanför ledverket ligger på nivåer omkring +36.5 m vilket betyder mindre än 3 m tillgängligt vattendjup vid normalt vattenstånd, ca +39.5 m. Detta betyder att fartyg som inte går på grund efter kollision och nedbrytning av befintligt ledverk (pga. otillräcklig bärförmåga) måste ha ett mindre displacement och därmed mindre rörelseenergi jämfört dimensionerande fartyg som har en djupgång av 5.4 m. Ett sådant fartyg har uppskattningsvis endast en bråkdel av rörelseenergin kvar vid kollision med brostöd jämfört dimensionerande fartyg om man samtidigt tar i beaktande att nedbrytning av ledverket åtminstone ger en betydande reduktion av hastigheten.

6.2 Påsegling av bron i stängt läge

Den relativt sett låga segelfria höjden under en rörlig bro jämfört en fast högbro innebär att också överbyggnaden kan bli påseglad då bron är stängd.

I publikationen "Guide for vessel collision design of highway bridges" som ges ut av "American Association of State Highway and Transportation Officials" (AASHTO) ges en vägledning som gör det möjligt att uppskatta höjden för ett skeppsskrov, dvs avstånd mellan fartygets undersida till toppen av skrovet. För dimensioner som motsvarar det dimensionerande fartyget gäller att skrovets höjd är ca 13.5 m (AASHTO, Table 3.5.2.1). En djupgång av exempelvis 3,5 (se Tabell 1 i denna rapport) innebär att stäven ligger ca 10 m över vattenytan. Detta innebär att överbyggnaden är exponerad för en påsegling och kollision med de större fartygens styvare delar, dvs. skrovet, vilket i sin tur innebär en påseglingskraft i samma storleksordning som den framräknade dynamiska påseglingskraften på brostöd enligt avsnitt 8.1 (dock lägre eftersom överbygganden är mindre styv jämfört underbyggnaden).

Stridsbergsbron utformas med en segelfri höjd av minst 6.0 m (vid dämningssgräns) vilket tillåter att mindre båtar (lots etc.) kan passera bron i stängt läge. Detta är önskvärt m.h.t. arbete med isfrihållning. Större fartyg kan dock inte passera bron i stängt läge. Som jämförelse har den befintliga klaffbron i Trollhättan en minsta höjd av ca 3.9 m (mitt i farleden) och järnvägsbron motsvarande 2.8 m i stängt tillstånd.

Det är mycket oekonomiskt att utforma en broöverbyggnad för att kunna klara större tvärgående laster. Istället för att dimensionera överbyggnaden för en större påseglingskraft föreslås att denna risk hanteras genom att utrusta bron med tillräckliga varningssystem, eventuellt också med automatiska manövrar, så som tändning av varningsljus och fällning av vägbommar etc. (se också avsnitt 8.2 och 9.6).

6.3 Påsegling av den västra tillfartsbron

Risken för påsegling av den fasta bron utanför farleden, väster om Konvaljeön, anses vara betydligt lägre jämfört risken för påsegling av den rörliga bron i farleden öster om ön (se kapitel 7.1.1). Större norrgående fartyg är förhindrade att nå fram till den nya bron på grund av den befintliga bågbron (järnväg) väster om Hjulksvarnsholmen och det förhållandevis trånga sundet mellan Konvaljeön och Hjulksvarnsholmen. Enligt avsnitt 4 finns det precis som förväntat inte några registrerade fartygspassager väster om Konvaljeön, varken norrgående eller södergående. Ett södergående fartyg som navigerar fel eller mister sin manöverförmåga kan dock komma att segla på bron. Vattendjupet i den västra älvfåran är tillräckligt djupt för att också de större fartygen skall kunna nå fram till bron (även om vattendjupet direkt väster om Konvaljeön är något mindre). Konvaljeöns utsträckning norröver reducerar denna risk eftersom fartyg som först passerat öns nordspets (ca 300 m från bron) omöjligen kan styra över mot bron i den västra älvfåran.

7 Risk och sannolikhet

En påsegling av bron är i sin natur att betrakta som en exceptionell situation och en allvarigare olycka som uppstår med en mycket låg sannolikhet. Under arbetet med denna rapport har dock ingen kvantifierande riskanalys utförts som kan ge svar på återkomsttider för särskilda händelser osv. Däremot är det möjligt att dra vissa slutsatser från en motsvarande påseglingsanalys som genomförts för ett projekt med liknande förutsättningar, nämligen Hisingsbroprojektet i Göteborg. Hisingsbron är, liksom Stridsbergsbron, en rörlig bro i Göta älv med snarlik sjöfart (Hisingsbron har ett något större dimensionerande fartyg, "Surte-max") och liknande hydrologiska förhållanden. Nedan följer ett kort utdrag ur "PM Riskanalys Påsegling – samrådsunderlag, Göteborgs stad, 2012-10-22 med tillägg " PM – Ökat antal fartygspassager", 2015-11-10.

7.1 Kollisionsfrekvens

Rapporten innehåller en beräkning av kollisionsfrekvens vilken baseras på, i huvudsak, olycksstatistik från Göta älv mellan åren 1985-2011.

I kapitel 8 från rapporten 2012 kan man läsa:

"Under perioden 1984- oktober 2011 skedde 9 brokollisioner i Göta älv, av dessa var samtliga med mindre allvarlig konsekvens (SOS 2011). Med 13 broar i Göta älv ger det en kollisionsfrekvens på 1 gång per 38 år för en bro. ...för beräkning av frekvens av brokollisioner kommer dock ett snitt som representerar hela perioden från 1984-2011 att användas på cirka 2600 passager av större fartyg per år. ... Ovanstående ingångsvärden ger en kollisionsfrekvens per passage på $1 \cdot 10^{-5}$. Denna kollisionsfrekvens har god överensstämmelse med kollisionsfrekvensen i andra floder såsom Main, Mosel och Nieuwe waterweg (PIANC 2001)."

2015 genomfördes en kompletterande beräkning med hänsyn till eventuell framtida utbyggnad av slussarna i Trollhätte kanal och därmed risken för ännu större fartyg i farleden. I kapitel 3 från rapporten 2015 kan man läsa:

"I den ursprungliga analysen valdes en mycket konservativ metod för att bedöma sannolikheten för kollision mellan fartyg och bro. ...Om man räknar bort händelser som endast lett till skada på dykdalber och ledverk vid passage av öppen bro, och därmed hindrats av brons skyddsstrukturer från att skada bron, har 7 brokollisioner skett i Göta Älv mellan 1985 och 2015 (SOS, 2015)... Samtliga av dessa händelser, vilka lett till en skada på aktuell bro, har varit med mindre konsekvenser och utan dödsfall. Med 12 broar i Göta Älv ger det en frekvens på 1 gång per 52 år för en bro. Ovanstående ingångsvärden ger en kollisionsfrekvens per passage på ca $7,5 \cdot 10^{-6}$. Denna kollisionsfrekvens är lägre än vad som använts i den ursprungliga riskanalysen men har fortfarande god överensstämmelse med kollisionsfrekvensen i andra floder såsom Main, Mosel och Nieuwe waterweg (PIANC 2001). "

Sammanfattningsvis har kollisionsfrekvensen beräknats till en återkomsttid av ca 38-52 år (2012 resp. 2015 års uppskattning) varav samtliga aktuella händelser som legat till grund för denna beräkning inneburit mindre allvarliga konsekvenser och inga dödsfall.

7.1.1 Kollisionsfrekvens med avseende på bro utanför farled

Statistisk från PIANC's rapport "Ship collisions due to the presence of bridges" ger en uppfattning om sannolikheten för påsegling av de delar av bron som ligger vid sidan om farleden. I kapitel 8 från rapporten 2012 respektive kapitel 3 från rapporten 2015 kan man läsa:

"Enligt PIANC's databas sker 77 % av alla kollisioner vid passage av bron. "

..respektive:

"Endast fördelningen av antalet kollisioner i respektive utanför farled (0,77 respektive 0,23) har hämtats direkt från PIANC och bedöms som ett rimligt antagande i avsaknad av statistik för lokala förhållanden i Göta Älv."

Det bör dock påpekas att norrgående fartyg är förhindrade att segla på bron enligt avsnitt 6.3 vilket gör att sannolikheten för att den västra tillfartsbron blir påseglad borde vara mindre (möjligen halverad) i förhållande till vad som sägs ovan.

7.2 Individrisk

Statistisk enligt PIANC's sammanställning "Ship collisions due to the presence of bridges" visar att kollision mellan fartyg och bro statistiskt sett sällan innebär allvarligare personskador och dödsfall. I kapitel 8 från rapporten 2012 ges en förklaring:

"PIANC's sammanställning redovisar bland annat hur kollisionsfrekvensen kan användas till att uppskatta frekvensen av allvarliga skador på bron under dess livslängd... Från PIANC's databas erhålls uppgifter om att ~86 % av alla brokollisioner leder inte till några omkomna, vid 10 % av olyckorna är antalet omkomna 1-9 stycken och för ~4 % är antalet omkomna mellan 10-99 och för mindre än 1 % är antalet omkomna mer än 100."

För en given kollisionsfrekvens är det alltså möjligt att uppskatta risken för att en människa skadas i samband med påsegling. I rapporten från 2012 kan man i kapitel 9.1 läsa följande:

"Den ackumulerade individspecifika risken (risken för en person som passerar bron 2 ggr per dag) för samtliga skadeutfall för påsegling i denna analys blir cirka $3 \cdot 10^{-7}$ (händelsefrekvens per år, Rambölls anm.) vilket enligt acceptanskriterierna är strax över gränsen för område där risker kan anses som små".

Vidare kan man i rapporten från 2015 och kapitel 4 läsa att återkomsttiden för ett dödsfall på grund av påsegling av bron är 252 år.

Denna risk har jämförts med risker att skadas på grund av andra trafikslag på Hisingsbron och i rapporten från 2012 kan man i kapitel 9.1 läsa:

Denna individrisk bör i sammanhanget jämföras med individrisken i trafiken generellt, se figur 6. Individrisken att omkomma i trafiken är mer än 100 ggr större än individrisken att omkomma på grund av påsegling. Individrisken att omkomma i trafiken är mer än 100 ggr större än individrisken att omkomma på grund av påsegling.

Det ska dock sägas att Hisingbron också trafikeras av spårvagnar varför jämförelsen och förhållandet mellan risk för skada vid påsegling respektive risk för skada i trafik på bron är konservativ för Stridsbergsbron.

I sammanfattningen från rapporten 2012 kan man bland annat läsa följande vilket också får gälla som sammanfattning av detta avsnitt:

"Enligt beräkningarna så är antalet omkomna på grund av påsegling/brokollision i storleksordningen en femtedel av antalet omkomna på grund av övriga trafikslag på bron. Sett ur detta perspektiv kan risken att omkomma på grund av påsegling anses inte nämnvärt öka den risk som trafikanter på bron har på grund av att de rör sig i trafiken generellt."

7.3 Osäkerheter

Alla beräkningar är förstås behäftade med vissa osäkerheter som man bör vara medveten om innan man drar några slutsatser av resultatet. Osäkerhetsparameterar anges i kapitel 9.2 (2012) respektive 4.4 (2015) varav det senare avsnittet avslutas med orden: *"Sammantaget bedöms dock beräkningarna ge en konservativ uppskattning av risknivån."*

8 Påseglingskraft

8.1 Brostöd

Påseglingskraftens storlek kan approximativt bestämmas enligt Eurocode 1991-1-7, (avsnitt 4.6.3 och Annex C avsnitt C.4.2 och C.4.4).

Eftersom det fria avståndet mellan brostöd endast är ca 42 m och eftersom vattendjupet i broläget tillåter att hela det området navigeras av de större fartygen måste en påsegling med fören beaktas.

Den dimensionerande dynamiska påseglingskraften för fartyg vars storlek kan beskrivas som mellan 500 och 300 000 dödviktston (DWT) kan bestämmas med uttryck C.11, avsnitt C.4.4 (2). Uttrycket gäller för en frontalkrock mellan ett fartyg (av robustare typ som är konstruerat för att kunna segla till havs) och ett oeftergivligt hinder. Uttrycket bygger på antagandet om att all rörelseenergi hos fartyget omvandlas till deformationer i fartygsskrovet vid en kollision (detta är alltså inte giltigt för ett eftergivligt hinder såsom ett ledverk eller dylikt, för sådana konstruktioner blir påseglingskraften lägre). Med hänsyn till undanträngt vatten framför fören, s.k. hydrodynamisk massa, ökas den totala rörelseenergin med 10 % enligt EN 1991-1-7 avsnitt C.4.3 (3).

Ett fartyg med dimensioner enligt avsnitt 5.2 (framtida förhållanden) och hastighet 5 knop beräknas ge upphov till en total rörelseenergin av ca 26 MJ och en motsvarande påseglingskraft på ett brostöd som uppgår till ca 40 MN.

8.1.1 Jämförelse mot nuvarande förhållanden och uppmätt hastighet

Ett mindre och lättare fartyg kan teoretiskt sett ge upphov till en större påseglingskraft. Ett fartyg med dimensioner enligt avsnitt 5.1 (nuvarande förhållanden) och en hastighet som motsvaras av uppmätta 8 knop beräknas ge upphov till en total rörelseenergin av ca 49 MJ vilket motsvarar en påseglingskraften på av ca 49 MN (kraftens storlek, enligt uttryck C.11, är proportionell mot kvadratroten ur fartygets rörelseenergi som i sin tur är kvadratisk proportionell mot fartygets hastighet respektive direkt proportionell mot fartygets massa). Det antas dock att den gällande hastighetbegränsningen av 5 knop kan efterlevas efter det att en ny bro har uppförts.

8.2 Överbyggnad

EN 1991-1-7 avsnitt 4.6.3 (5) anger att påseglingskrafter som belastar en överbyggnad bör bestämmas med hänsyn till bärverkets höjd och förväntad fartygstyp som antas orsaka olyckslasten. I allmänhet begränsas de krafter som kan belasta överbyggnaden på en bro av fartygskonstruktionens hållfasthet. Enligt Krav Brobyggande (TDOK 2016:0204), avsnitt B.5.3 skall brons överbyggnad dimensioneras för en påseglingskraft parallellt farleden som är 5 % av påseglingskraften mot ett brostöd enligt ovan. Denna påseglingskraft ska placeras på ogynnsammaste plats inom farleden och anses angripa i underkant på brons överbyggnad. Detta antagande gäller dock endast under förutsättning om en viss segelfri höjd, dvs. att bron blir påseglad av en vekare del av fartyget, så som mast etc. och att det betydligt styvare skrovet och fören kan passera fritt under brons överbyggnad vilket inte är aktuellt i detta fall. Istället föreslås att överbyggnaden dimensioneras för en påseglingslast vars storlek baseras på tidigare Göta älv-broprojekt, så som Marieholmsbron samt järnvägsbron i Trollhättan. Ett schablonvärde av 300 kN föreslås.

9 Projektering av påseglingsskydd

9.1 Påseglingsskydd för brostöd

Med hänsyn till den beräknade påseglingskraftens storlek enligt kapitel 8 anses det inte vara ekonomiskt försvarbart att konstruera ett brostöd för en kraft som motsvaras av en påsegling med fören och följaktligen borde bron utformas med påseglingsskydd. Detta kan konstrueras på principiellt två olika sätt. Antingen kan skyddet utformas som ett ledverk som konstrueras för att styra bort fartyg från kollisionskurs snarare än att stoppa fartygets rörelse. Denna konstruktion förutsätter att kollisionen sker nästan parallellt ledverket som en glidande stöt från sidan (jämför hur en lastbil kolliderar med ett vägräcke) vilket också kräver en viss utsträckning i farleden. Det andra alternativet är att konstruera en mera robust och massiv "offerkonstruktion", exempelvis en kassun, som kan absorbera rörelseenergin i en direkt stöt och på så sätt stoppa upp fartyget eller reducera dess hastighet och därmed resulterande påseglingskraft på brostöd till acceptabel nivå.

9.2 Förutsättningar för utformning av påseglingsskydd

Utformning av påseglingsskydd för Stridsbergsbron beror på flera olika tekniska parametrar samt krav och önskemål från byggherre och myndigheter.

9.2.1 Geotekniska förutsättningar

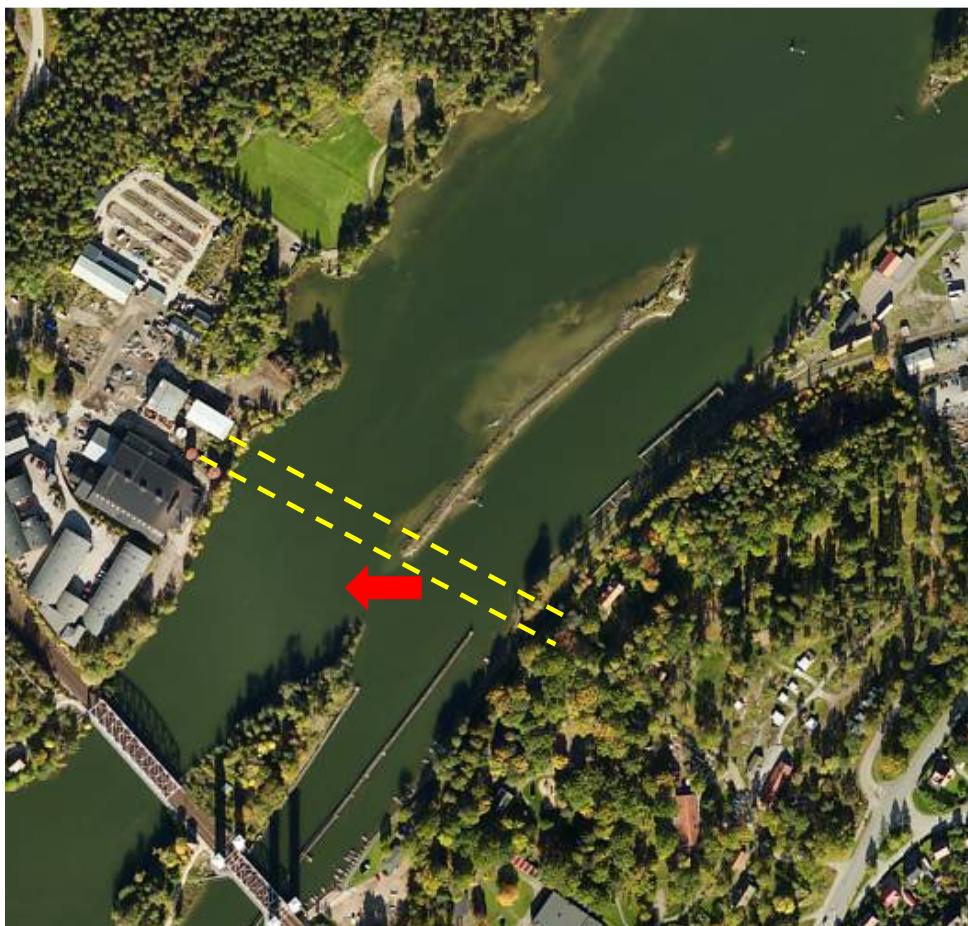
Provborrhningar längs med trafikkanalen (se MUR, Norconsult, 2018-11-15, Version 2.0) tyder på en bergyta som lutar kraftigt nedåt i medströms riktning. Norr om bron överlagras bergytan av ett tunnare lager lös lera och söder om bron av ett tjockare lager lera/morän. I älven är leran grå och siltig. Den odränerade skjuvhållfasthet har uppmätts till 20-30 kPa och leran bedöms vara högsensitiv, på gränsen till kvicklera (se PM – Geoteknik, Ramböll). Vattendjupet varierar mellan 8-10 m på den västra sidan och 6-10 m på den östra sidan. Ytterligare geotekniska undersökningar är planerade för att bestämma bergytans läge.

9.2.2 Förtöjning av fartyg

Sjöfartsverket har formulerat ett krav som gäller möjlighet att förtöja fartyg och fritidsbåtar norr om bron varför det anses lämpligt att sammanbinda befintliga ledverk norr respektive söder om bron med ett nytt ledverk längs med kanalens östra strand.

9.2.3 Hantering av is

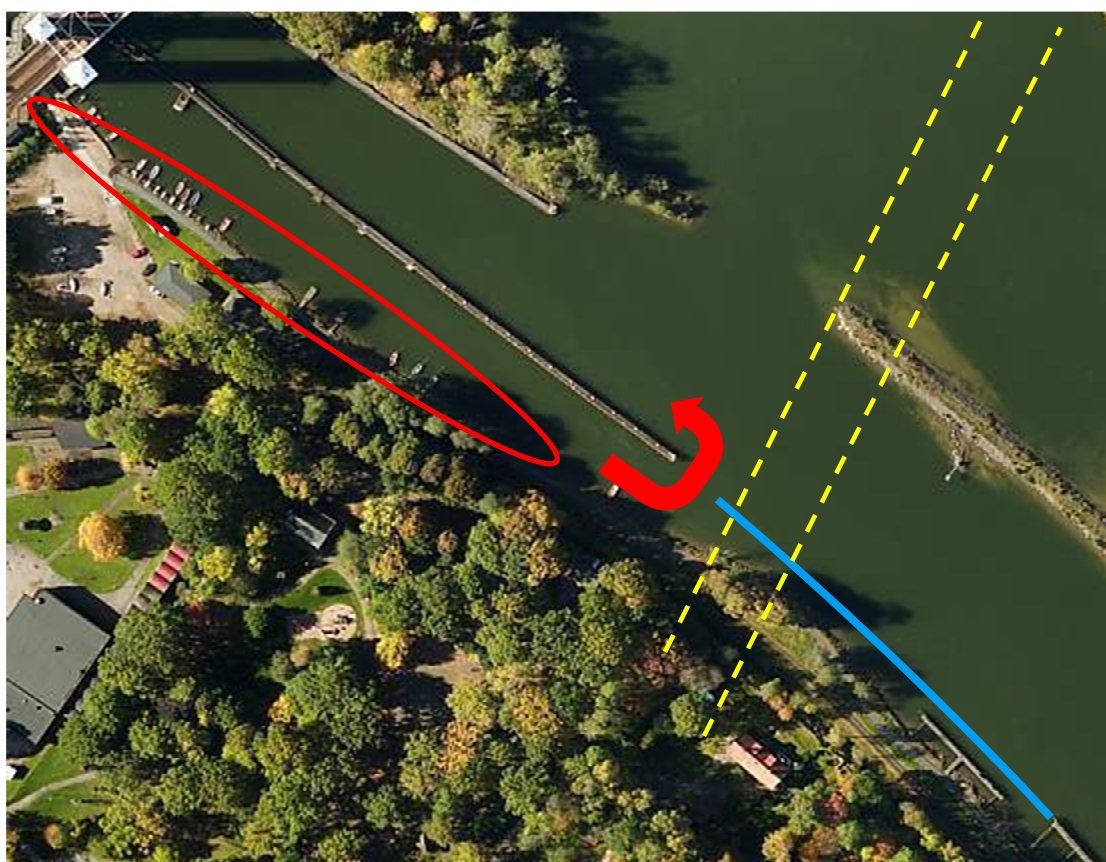
Sjöfartsverket har upplyst att drivande is som riskerar att blockera farleden vintertid flyter ut med vattenströmmen, eller tas ut manuellt, i sundet mellan Konvaljeön och Hjulksvarnsholmen, se Figur 9-1. Det är förstås oklart hur anläggandet av brostöd och eventuella påseglingsskydd kommer att påverka isfrihållningen i framtiden. Det antas dock att ett eventuellt ledverk på den västra sidan innebär ytterligare begränsningar för isfrihållningen varför det istället föreslås att påseglingsskydd utformas som exempelvis kassuner för skydd av det västra brostödet (både norr och söder om stödet). Ledverk och brostöd skall dimensioneras för istryck till följd av isfrihållning.



Figur 9-1 Drivande is som riskerar att blockera farleden vintertid tas ut i sundet mellan Konvaljeön och Hjulksvarnsholmen (röd pil).

9.2.4 Tillgänglighet för fritidsbåtar

Det framgår av Figur 9-2 att det befintliga, östra, ledverket täcker nästan hela sträckan mellan järnvägsbron och Stridsbergsbron. Innanför detta ledverk ligger ett flertal båtbygggar för fritidsbåtar vars åtkomst till dessa bygggar kräver en tillräckligt stor öppning för in och ut-passage söder om Stridsbergsbron. Med hänsyn till risk för påsegling av det östra brostödet från norrgående fartyg hade det enklaste alternativet varit att sammanbinda befintliga ledverk med ett nytt ledverk för att få en kontinuerlig barriär förbi bron. Å andra sidan framgår det av kapitel 6 att en påsegling av det östra brostödet från norrgående fartyg är det minst sannolika. Samtidigt är också konsekvensen av en sådan påsegling sannolikt mindre allvarlig eftersom den endast är möjlig för fartyg med jämförelsevis mindre displacement och lägre hastighet (se kap. 6) varför det förslagsvis kan accepteras att nytt ledverk inte förbinds med befintligt ledverk strax söder om bron (10-12 m "lucka").



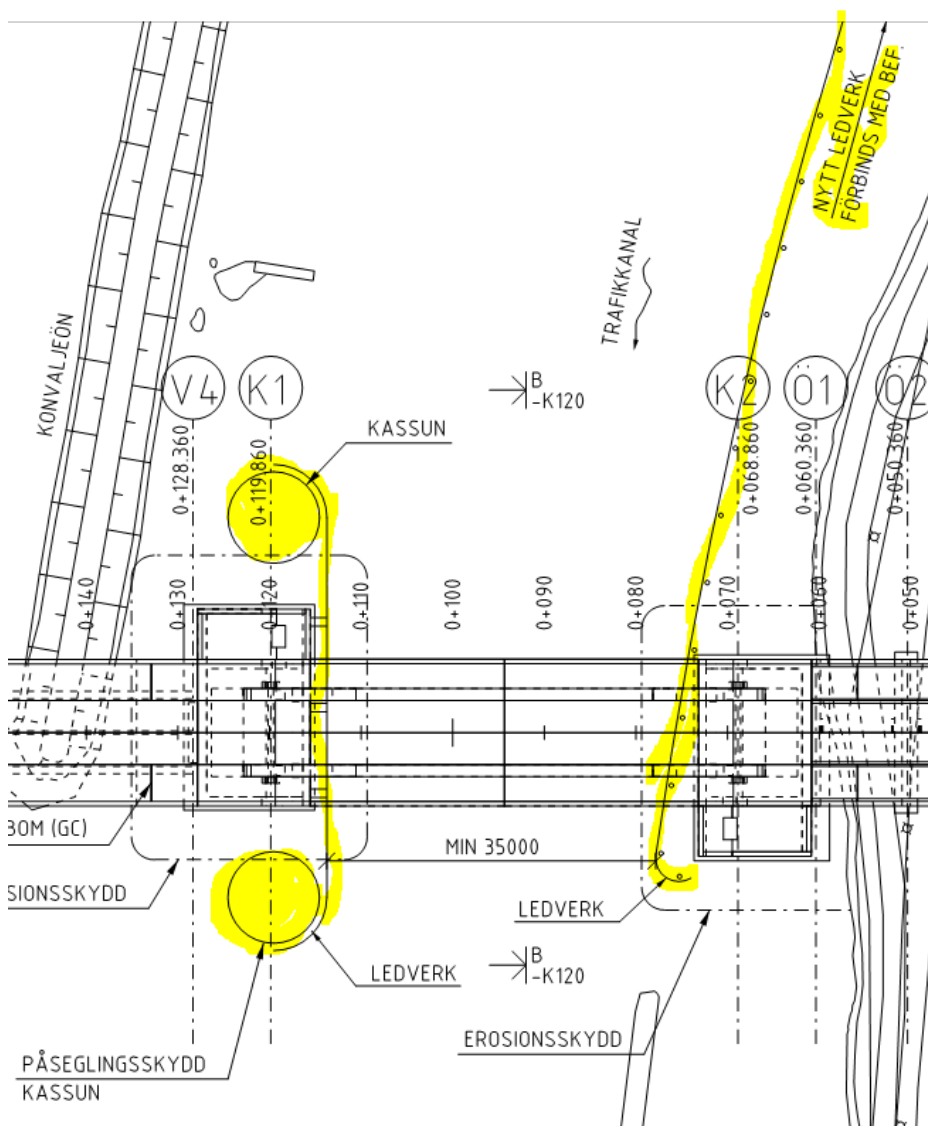
Figur 9-2 Båtbygggar bakom det befintliga, sydöstra, ledverket och nytt ledverk (blå linjer)

9.2.5 Västra tillfartsbron

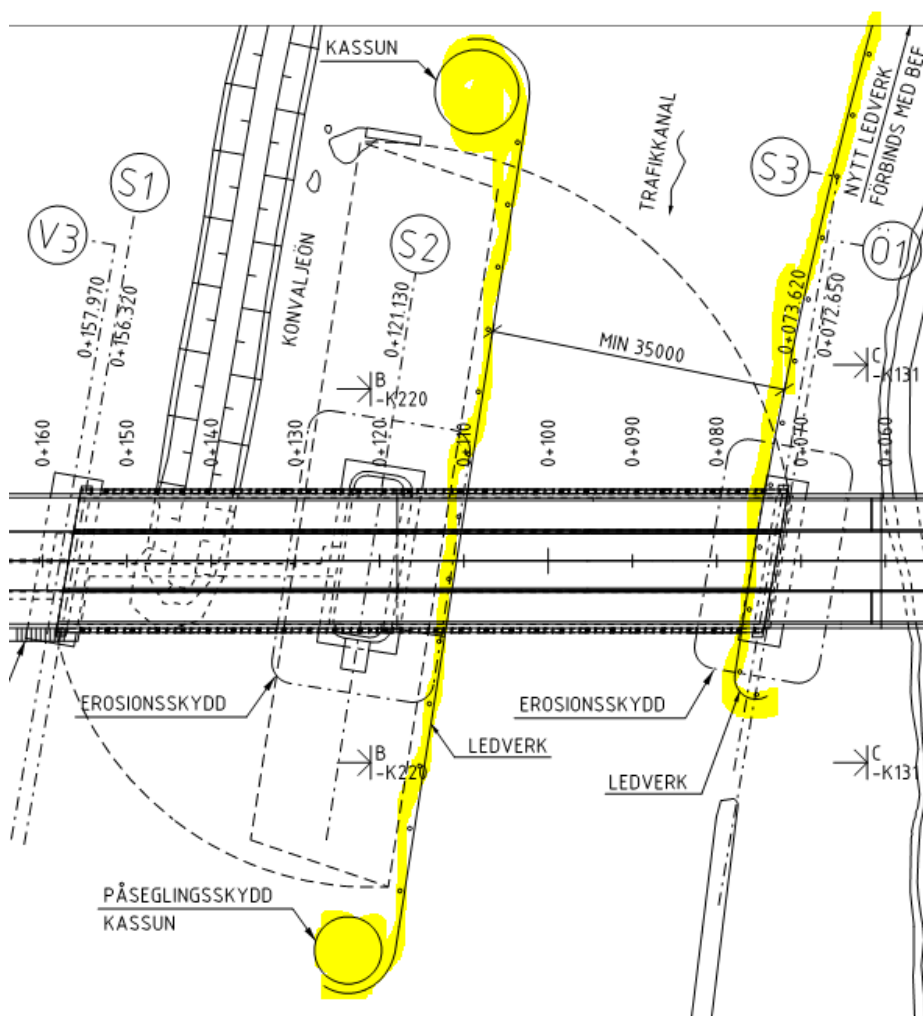
Som utgångspunkt dimensioneras inte den fasta bron, i den västra älvfåran, för påseglingslast.

9.3 Föreslagen utformning

Sammanfattningsvis föreslås det att det västra brostödet (och svängbrons överbyggnad i öppet läge) skyddas av en kassun norr respektive söder om bron. Mellan kassunerna skyddas bron av ett ledverk (båda alternativ). Det östra brostödet skyddas av ett nytt ledverk som förbinds med befintligt ledverk norr om bron och avslutas strax söder om bron, ca 10-12 m uppströms befintligt ledverk. Ledverket utformas principiellt som en längsgående balk med upplag på lutande pålar. På klaffkammare har ledverket upplag mot brostöd via energiupptagande gummifendrar vilket betyder att klaffkammare måste dimensioneras för en reaktionskraft i detta upplag (brostöd i vatten dimensioneras dock även för ett betydande istryck).



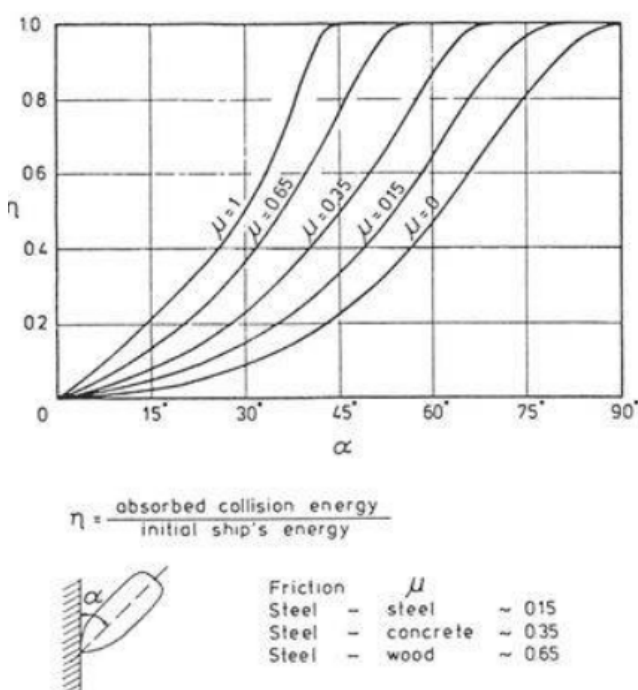
Figur 9-3 Förslag till påseglingsskydd av dubbelklaffbro



Figur 9-4 Förslag till påseglingsskydd av lyftsvängbro

9.4 Påsegling av ledverk

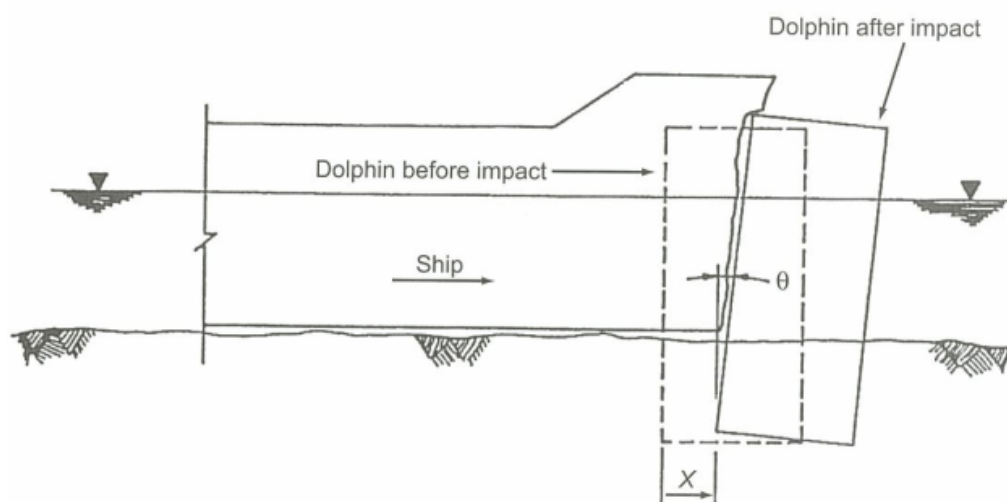
Ledverk dimensioneras för att kunna styra bort fartyg från kollisionskurs med brostöd. Det förutsätts att endast en mindre del av fartygets rörelseenergi överförs på ledverket vid kollision, i huvudsak genom friktion och deformation av ledverket. Dimensioneringsförutsättningarna med hänsyn till påseglingsanalysen ges av avsnitt 5 och 7. Den rörelseenergi som överförs från ett fartyg på ett ledverk vid en påsegling från sidan (och därmed ledverkets erforderliga energiupptagningsförmåga) kan uppskattas genom att utnyttja litteratur som avhandlar ämnet. Amerikanska brostandard AASHTO "Guide for vessel collision design of highway bridges" refererar till en artikel i IABSE Periodica 2/1982 "On the theory of ship collision against bridge piers" vilken redogör för teori som beskriver hur stor andel av den totala rörelseenergin i ett fartyg som överförs på en konstruktion vid en påsegling från sidan, se Figur 9-5.



Figur 9-5 från IABSE Periodica 2/1982. Grafen visar andel av total rörelseenergi som överförs på en konstruktion vid en påsegling från sidan som funktion av angreppsvinkeln. Fem olika kurvor har plottats i diagrammet för fem olika friktionstal mellan fartyg och konstruktion.

9.5 Påsegling av kassun

Kassuner dimensioneras, till skillnad från ledverk, för att absorbera ett fartygs totala rörelseenergi vid påsegling med fören. Rörelseenergin absorberas genom flera olika brottmoder så som friktion mellan fartyg och kassun, deformation och lyft av fartygskrovet samt deformation, rotation, glidning och stjälpning av kassun. Amerikanska brostandard AASHTO "Guide for vessel collision design of highway bridges" och avsnitt 7.3.3 ger en vägledning till hur dessa konstruktioner kan dimensioneras.



Figur 9-6 från Guide for vessel collision design of highway bridges. Illustration av påsegling av kassun och resulterande deformationer i fartyg och kassun samt, glidning och stjälpning av kassun

9.6 Påsegling av överbyggnad

Eftersom det är mycket oekonomiskt att utforma en överbyggnad för att kunna klara större tvärgående laster föreslås, med hänvisning till Banverkets Handbok för öppningsbara broar, BVH 583.13 kapitel 7.8, att bron konstrueras med en s.k. brottanvisning som gör att kopplingen mellan överbyggnaden och brostödet går till brott för större laster. På så sätt kan den kostsamma grundläggningen och underbyggnaden och förhoppningsvis en större del av maskineriet skyddas till priset av att överbyggnaden går till brott i händelse av en större påseglingskraft på överbyggnaden. Det föreslås att överbyggnaden dimensioneras för en påseglingskraft enligt avsnitt 8.2.

10 Referenser

- Krav Brobyggande (TDOK 2016:0204) version 2.0, Trafikverket, 2018
- Hydraulisk utredning – ny bro över Göta älv, Sweco, 2018
- Vänersjöfart och slussar i Trollhätte kanal Byggtekniska alternativ och samhällsekonomiska effekter Slutversion, Trafikverket, 2017
- SS:EN 1991-1-7 Eurokod 1 – Laster på bärverk – Del 1-7: Allmänna laster – Olyckslast, SIS, 2006
- Guide for vessel collision design of highway bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2009
- On the theory of ship collision against bridge piers, Saul, Reiner / Svensson, Holger, IABSE Periodica 2/1982
- Banverkets Handbok för öppningsbara broar (BVH 583.13), Banverket, 2007
- PM Riskanalys Påsegling – samrådsunderlag, Göteborgs stad, 2012 samt tillägg "PM – Ökat antal fartygspassager", 2015.