

Til: Statens vegvesen Region Vest

Fra: Alexander Kyte

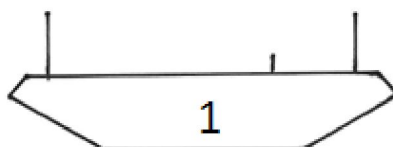
Dato/Rev: 22.05.2015/rev. 0

Notat: Utredning av høye rekkverk på Askøybrua

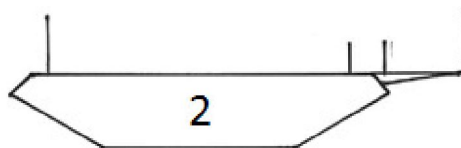
1. Innledning med konklusjoner

Notatet oppsummerer tekniske utredninger som ser på muligheten for å montere høye rekkverk på Askøybrua. Intensjonen med høye rekkverk er å hindre selvmord ved hopping fra brua. Rekkverkene utformes for å vanskeliggjøre klatring. Tre alternativer er utredet:

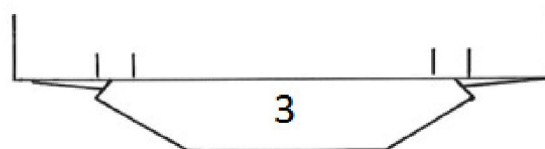
Alternativ 1: Bytte ut dagens 1,3 meter høye ytterrekkverk med 2,5 meter høye ytterrekkverk.



Alternativ 2: Påhengt gangbane med 2,5 meter høye ytterrekkverk.



Alternativ 3: To påhengte gangbaner med 2,5 meter høye ytterrekkverk.



Bredden av påhengte gangbaner er 3 meter.

Utredningen fokuserer på om Askøybrua tåler ombygging med tanke på vekt og vind. Utredningen er basert på en antatt utforming av høye rekkverk. Detaljert utforming av høye rekkverk er noe man må komme tilbake til på et senere tidspunkt. Konklusjonene i utredningen vil være gyldige selv om den endelige utformingen av rekkverkene skulle avvike noe fra det som er benyttet i utredningen.

Som en del av utredningen har Norconsult AS utført en foreløpig prosjektering av høye rekkverk og påhengt gangbane. Dette for å ta stilling til om brua tåler økt vekt og økt trafikklast. Videre har Norconsult laget et grunnlag for modellforsøk i vindtunnel ved angivelse av tverrsnittsgeometri, masseparametere og egensvingeperioder. Norconsults bidrag er dokumentert ved beregningsrapport, tegninger og illustrasjoner i vedlegg 1, 2 og 3.

Firmaet Svend Ole Hansen APS i København har utført modellforsøk i vindtunnel. Det er benyttet en seksjonsmodell i målestokk 1:50. Hensikten med modellforsøket er å undersøke virvelavløsningssvingninger. Det er også sett på aerodynamisk instabilitet – såkalt Flutter. De to svingningsfenomenene er utdypet i punkt 4 og 5 under. Som en del av utredningen er det også utført fullskalamålinger av bruas svingningssegenskaper, herunder bruas dempning. Modellforsøk og fullskalamålinger er dokumentert i vedlegg 4 og 5.

Statens vegvesen Region vest har laget et grovt kostnadsoverslag for montering av høye rekkverk.

Konklusjoner fra utredningen er:

Alternativ 1: Bytte ut dagens 1,3 meter høye ytterrekkverk med 2,5 meter høye ytterrekkverk.

Økt vekt: OK

Flutter: Kritisk vindhastighet er tilstrekkelig høy.

Virvelavløsning: Forsøkene viser at oppførselen blir lik dagens bru. Det er en god indikasjon på at ingenting vil endre seg dersom høye rekkverk monteres. Virvelavløsning er et finstemt fenomen som kan være sensitivt for små endringer. Ledeskovler og underliggende senterstiver kan ettermonteres dersom uakseptable virvelavløsningssvingninger likevel skulle oppstå etter montering av høye rekkverk. Det vurderes lite sannsynlig at det blir behov for ettermontering av ledeskovler.

Oppsummert: Alternativet vurderes greit gjennomførbart. Man kan utføre supplerende vindtunnelundersøkelser for å få et enda bedre sammenligningsgrunnlag mot dagens bru, samt å på forhånd ha dokumentert effekten av ledeskovler og senterstiver på et brutverrsnitt med høye rekkverk.

Alternativ 2: Påhengt gangbane med 2,5 meter høye ytterrekkverk

Økt vekt og økt trafikklast pga. tre kjørefelt: OK

Flutter: Gangbanen bør monteres på samme side som i dag for å oppnå tilstrekkelig høy kritisk vindhastighet.

Virvelavløsning: Dårligere oppførsel enn dagens bru, avhengig av om gangbanen ligger på nedstrøms eller oppstrøms side i forhold til vindretningen. Ledeskovler og underliggende senterstiver må monteres. Selv med ledeskovler og underliggende senterstiver blir oppførselen litt dårligere enn dagens bru (på det undersøkte tverrsnittet med ensidig gangbane).

Oppsummert: Dette alternativet vurderes å være mulig - men må optimaliseres til minst samme oppførsel med tanke på virvelavløsning som dagens bru før man bygger. Med andre ord videre utredninger, herunder optimalisering av tverrsnittet og supplerende undersøkelser i vindtunnel. Flutterstabilitet for optimalisert tverrsnitt må også påvises.

Alternativ 3: To påhengte gangbaner med 2,5 meter høye ytterrekkverk.

Økt vekt og økt trafikklast pga. tre kjørefelt og to gangbaner: OK

Flutter: Ikke tilstrekkelig kritisk vindhastighet. Nyansering: kravet til Flutter er bare så vidt overskredet.

Virvelavløsning: Bedre oppførsel enn dagens bru.

Oppsummert: Dette alternativet vurderes å være mulig - men det anbefales å se mer på kritisk vindhastighet med tanke på Flutter skulle alternativet bli aktuelt. Med andre ord videre utredninger, herunder beregninger og optimalisering av tverrsnittet. Det er trolig behov for supplerende undersøkelser i vindtunnel.

Kostnader:

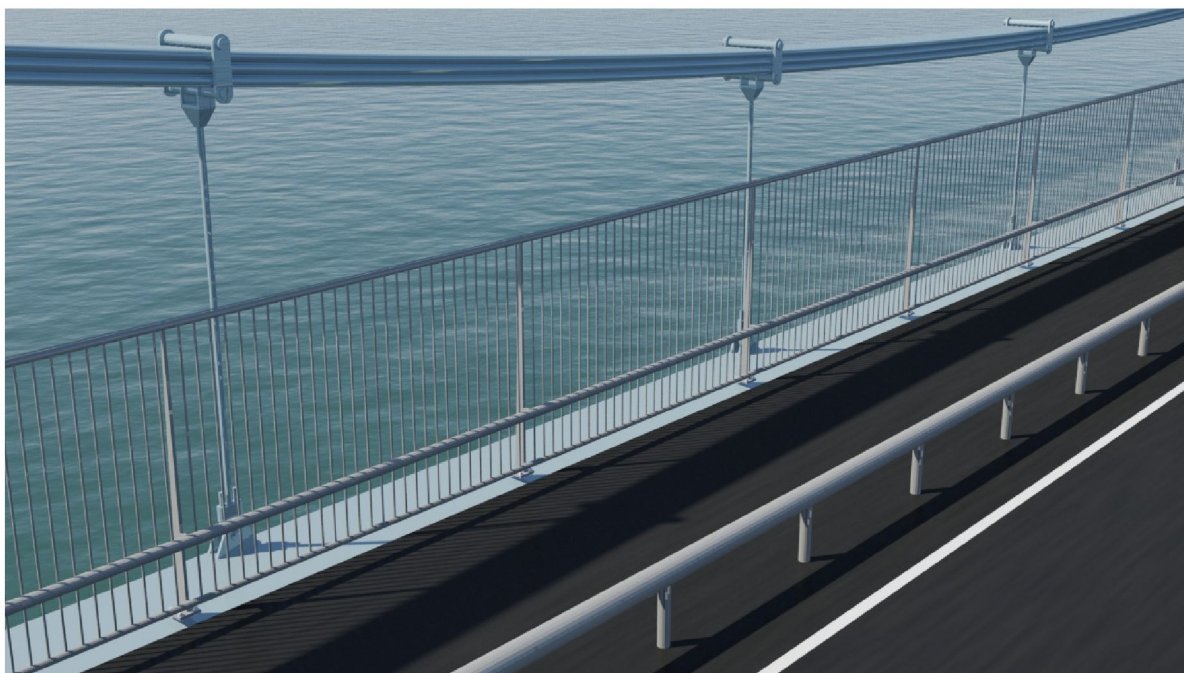
Høye rekkverk som i alternativ 1 er grovt estimert til å ha en byggekostnad på 30 – 40 mill (inkl. mva. og byggherrekostnader). Kostander for alternativ 2 og 3 er ikke estimert. Uten å ha gjort noe overslag, er det likevel på det rene at kostand for alternativ 2 eller 3 vil være mange ganger høyere enn alternativ 1.

Behov for ytterligere prosjektering, beregninger og undersøkelser i vindtunnel:

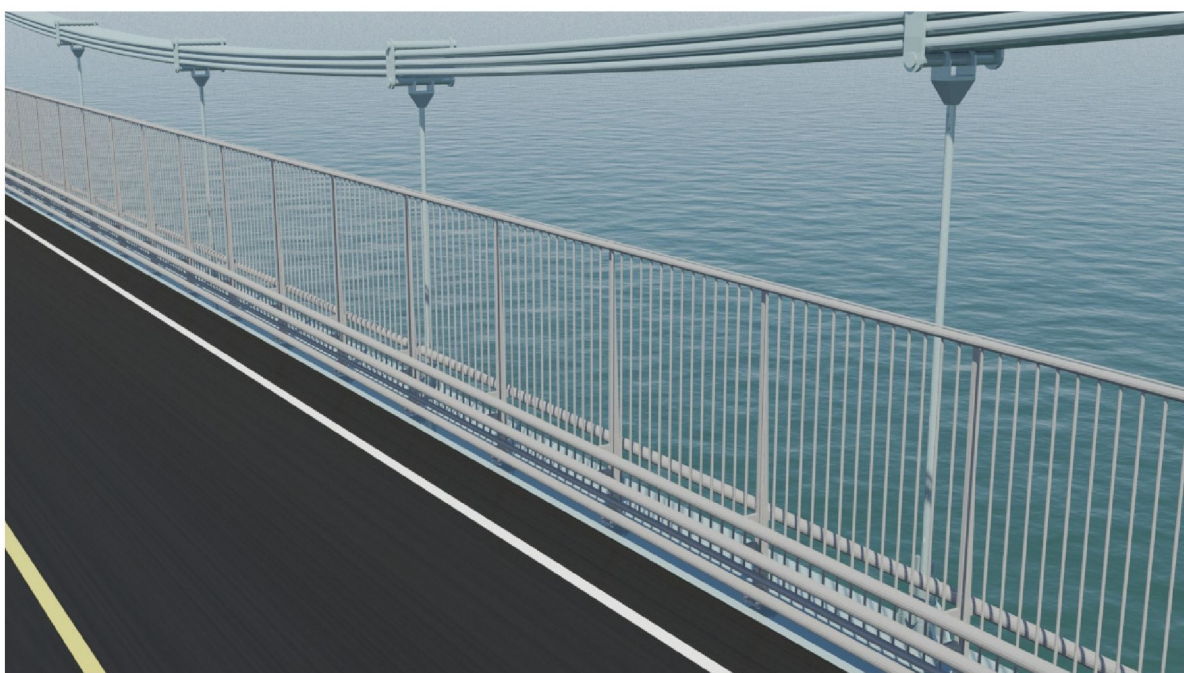
Behov kan vurderes når alternativ er valgt.

2. Utforming av høye rekkverk

Bildene nedenfor illustrerer de 2,5 meter høye ytterrekkverkene som er benyttet i utredningen. Sprossene har en diameter på 20 mm. Gangbane og kjøreareal separeres av et lavt kjøresterkt rekkverk – som i dagens situasjon. På ytterrekkverket langs gangbanesiden er det en langsgående skinne ca. 70 cm over asfalten. Denne skinnen er ment som sidestyring mot vedlikeholdskjøretøy. For å gjøre klatring enda vanskeligere, kan man vurdere å senke skinnen til et lavere nivå – f.eks. 20 cm over asfalten. På motsatt side, dvs. langs kjørebanesiden, vil det ikke være mulig å senke skinnene.



Illustrasjon: 2,5 meter høyt ytterrekkverk på gangbanesiden



Illustrasjon: 2,5 meter høyt ytterrekkverk på motsatt side

Statens vegvesens håndbok N101 krever 1,6 meter høye rekkverk med minst 1,4 meter vertikale sprosser uten stegmulighet på bruer som erfaringsmessig blir brukt til å hoppe fra. Denne utredningen ligger således over kravet da det er benyttet 2,5 meter høye rekkverk og 1,8 meter vertikale sprosser uten stegmulighet. Ideelt sett skulle rekkverkene stått med helning innover. Dette kan imidlertid føre til at vedlikeholdskjøretøy kommer borti og skader rekkverket. Detaljert utforming av rekkverkene er som nevnt noe man må komme tilbake til på et senere tidspunkt, herunder vurdere krumme sprosser, lite gripevennlig toppliste, estetisk uttrykk mm. Det vises for øvrig til vedlegg 6 og 7, som er artikler om temaet fra en konferanse i Edinburgh.

3. Økt vekt og trafikklast

Beregninger viser at hovedbærekablene har tilstrekkelig kapasitet for økt vekt i alle de tre alternativene. Det er samtidig tilstrekkelig kapasitet for økt trafikklast som følge av et tredje kjørefelt. Beregningene er basert på Statens vegvesens håndbok N400 2015, som angir hvordan man skal påvise kapasitet ved ombygging av bruer. At beregningene viser at det er tilstrekkelig kapasitet er ikke overraskende, for man tok høyde for påhengte gangbaner i den opprinnelige prosjekteringen av brua. Dog med noe lettere og smalere (2,5 m) gangbaner enn det som er benyttet i denne utredningen.

4. Virvelavløsning

Virvelavløsningssvingning er et sjenerende men ufarlig fenomen på en hengebru som Askøybrua.

Bak et objekt i en luftstrøm kan det, avhengig av objektets geometri og luftstrømmens hastighet, oppstå en rytmisk avløsning av virvler. Dette kan føre til rytmiske lufttrykksvariasjoner på over- og undersiden av objektet. På et brutverrsnitt vil dette kunne føre til en rytmisk last som i det ene øyeblikket presser brukroppen nedover, for like etterpå å presse brukroppen oppover. En vind inn fra siden mot en bru kan altså under visse forhold gi en pulserende vertikal last på brukroppen. Dette kan føre til vertikale svingninger. Slike svingninger kan være ubehagelige for publikum og for noen også virke skremmende, men svingningene er normalt ikke farlige for konstruksjonen.

Det er flere hengebruer på Vestlandet som har vært gjenstand for slike svingninger: Osterøybrua, Stordabrua, Bømlobrua og Gjemnesundbrua. På alle de nevnte bruene valgte man å ettermontere såkalte ledeskovler. Hardangerbrua ble utført med ledeskovler allerede fra starten av. Ledeskovler er således en mye brukt metode for å redusere virvelavløsningssvingninger.



Foto: Ledeskovler på undersiden av Hardangerbrua (fra montasjen)

Ledeskovler er laget av stål og bygger ca. 60 cm i høyden.

Det spesielle med Askøybrua er at den ikke har ledeskovler – likevel kommer den svært sjelden i virvelavløsningssvingninger. Virvelavløsningssvingninger er sagt å ha oppstått noen få ganger på Askøybrua siden åpningen for mer enn 20 år siden. At virvelavløsning oppstår svært sjelden på Askøybrua, har trolig å gjøre med lokale vindforhold. Ideelle forhold for virvelavløsning er laminær luftstrøm – dvs. jevn strømning med liten grad av turbulens. I et vindfelt med mye turbulens reduseres sannsynligheten for at kraftige virvelavløsningssvingninger skal kunne oppstå. Det kan tenkes at forholdene er slik at laminær luftstrøm med nødvendig hastighet svært sjelden oppstår på brustedet. Allerede ifm. med åpningen av brua på 90-tallet var man innforstått med at svingninger ville kunne oppstå ved sjeldne anledninger. Man antydte den gangen at slike svingninger ville kunne oppstå i tilfeller med jevn luftstrøm av hastighet 12–15 m/s (stiv kuling).

Endret geometri, være det seg er høye rekkverk eller påhengt gangbane, vil kunne føre til endring av hyppighet og styrke på virvelavløsningssvingninger. Ettersom Askøybrua ikke har ledeskovler, skal man utvise en viss forsiktighet når man gjør endringer på geometrien. Fenomenet kan være følsomt for små endringer.

Det er nevnt over at virvelavløsning kan føre til vertikale svingninger. Virvelavløsning kan også føre til torsjonssvingninger (vridningssvingninger).

Den opprinnelige prosjekteringen av Askøybrua omtaler ikke virvelavløsning med tanke på påhengte gangbaner eller høye rekkverk.

Modellforsøkene omtalt i punkt 6 nedenfor og oppsummert i punkt 1 foran indikerer hva endret rekkverksutforming eller påhengt gangbane betyr med tanke på virvelavløsning.

5. Flutter

I motsetning til virvelavløsning er Flutter et katastrofalt svingningsfenomen. Flutter er en instabilitet som oppstår ved en gitt vindhastighet – såkalt kritisk vindhastighet. Det er om å gjøre at bruas kritiske vindhastighet er større enn den vindhastighet som noen gang kan tenkes oppstå på brustedet – med god margin. En nyansering av fenomenet: et enkelt vindkast er ikke et nok til å skape Flutter-instabilitet. Vinden må stå på over en viss tid for at Flutter-instabilitet skal kunne inntreffe. Man relaterer derfor kritisk vindhastighet til gjennomsnittsvind i en stormsituasjon – ikke til kastvind.

Tacoma bridge i USA er et meget kjent eksempel. Tacoma bridge var utformet på en slik måte at den kritiske vindhastigheten var lav – det skulle ikke rare vindhastigheten til for å skape Flutter-instabilitet. Flutter-instabilitet kjennetegnes ved en kobling av vertikalsvingninger og torsjonssvingninger – dvs. vertikal bevegelse kombinert med vridning. I visse tilfeller kan flutter også opptre som en ren vridning av brokroppen.

Askøybrua er naturligvis prosjektert med tanke på å unngå Flutter. Av dokumentasjonen fra 90-tallet fremgår at man også dokumenterte Flutter for tilfellet med to påhengte gangbaner. Men beregningsmetoden som ble benyttet er noe grov.

Modellforsøkene omtalt i punkt 6 nedenfor og oppsummert i punkt 1 foran indikerer hva rekkverksutforming eller påhengt gangbane betyr med tanke på Flutter.

6. Vindtunnelforsøk

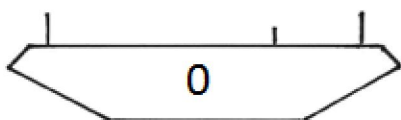
Vindtunnelforsøk med en seksjonsmodell er utført av Svend Ole Hansen APS i København:



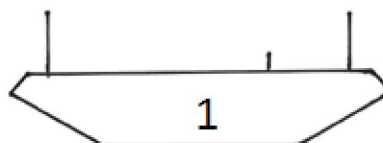
Foto: Seksjonsmodell i målestokk 1:50

En seksjonsmodell er et utsnitt av brubanen. Modellen henger opp i fjærer og kalibreres med lodd på en slik måte at bruas dynamiske oppførsel gjenspeiles. Et slikt vindtunnelforsøk kan brukes til å undersøke brutversnittets egenskaper med tanke på virvelavløsningsvingninger. Forsøket kan også brukes til å undersøke Flutter ved gradvis økning av vindhastighet frem til modellen blir ustabil.

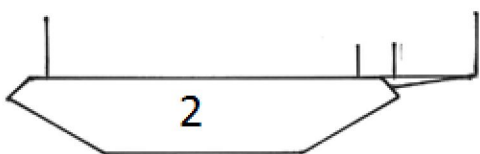
Følgende konfigurasjoner er undersøkt i vindtunnelen:



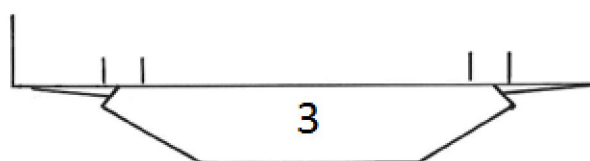
Dagens bru som referanse



Høye rekkverk



Høye rekkverk og én-sidig gangbane



Høye rekkverk og to-sidig gangbane

Dvs. at alle de tre alternativene er undersøkt, i tillegg til at dagens bru er undersøkt. Det siste som et sammenligningsgrunnlag.

Forsøkene er dokumentert i vedlegg 4.

7. Fullskalamålinger

Svend Ole Hansen APS har i løpet av våren 2015 utført fullskalamålinger på Askøybrua. Det ble montert 8 stk. mobiltelefoner på brua. Mobiltelefonene måler bruas akselerasjon i tre retninger X, Y og Z.

Målingene benyttes til å fastslå konstruksjonens dempningsegenskaper. Med dempningsegenskaper menes konstruksjonens evne til å dempe ut svingninger. Høy dempning er således gunstig. Friksjon med tilhørende varmetap til omgivelsene kan være en av flere kilder til dempning. Som et eksempel kan det nevnes at det er dempning som får en svingende pendel til etter hvert å stoppe opp. Et tenkt tilfelle med en pendel i vakuum og helt uten dempning, ville ha ført til at pendelen kunne svinge i det uendelige.

Å bestemme konstruksjonens dempningsegenskaper har først og fremst interesse med tanke på virvelavløsningsfenomenet. Høy dempning betyr at det skal mer til for at virvelavløsningsvingninger oppstår. Og dersom virvelavløsning oppstår, er høy dempning gunstig da det vil begrense størrelsen på svingningene (begrense følt akselerasjon og synlige bevegelser).

Fullskalamålingene, kombinert med vindtunnelforsøk av dagens geometri, viser at torsjon virvelavløsningsvingning (vridningssvingninger) ikke forventes å oppstå slik brua er utformet i dag. Derimot underbygger fullskalamålingene at vertikale virvelavløsningsvingninger kan oppstå (slik brua er utformet i dag). At vertikale svingninger kan oppstå er i tråd med det som blir sagt om Askøybrua – at den noen sjeldne ganger har kommet i vertikale svingninger.

Fullskalamålingene underbygger de teoretisk beregnede egensvingeperiodene som lå til grunn for vindtunnelforsøkene. Fullskalamålingene viser at reelt målte egensvingeperioder harmonerer godt med teoretisk beregnede verdier.

Fullskalamålingene underbygger også funnene som er gjort i vindtunnelen. Målingene er dokumentert i vedlegg 5.

8. Vedlegg

- Vedlegg 1: Rapport: Askøybrua, Påhengt gangbane – grunnlag for vindtunnelforsøk Norconsult AS, rev. 04 datert 23.04.2015
- Vedlegg 2: Tegninger K100,101,110,112,114,116. Juni 2014. Norconsult AS.
- Vedlegg 3: Illustrasjoner av høye rekkverk og påhengte gangbaner. Mai 2015. Norconsult AS.
- Vedlegg 4: Rapport: Askøy bridge, Wind tunnel tests and analyses, Desember 2014. Vedlegg C tilkom i januar 2015. Svend Ole Hansen APS.
- Vedlegg 5: Rapport: Askøy bridge, In-situ measurements. 20.05.2015. Svend Ole Hansen APS.
- Vedlegg 6: ICSBOC konferanse i Edinburgh 2013: Erskine Bridge Parapet Replacement.
- Vedlegg 7: ICSBOC konferanse i Edinburgh 2013: Considerations for installing Public safety Barriers on Long Span Bridges.

Bergen, 2015-05-20

Utarbeidet:


Alexander Kyte

Fagkontroll:


Eirik Wie Furunes