

SUND &amp; BÆLT HOLDING A/S

# KATTEGATFORBINDELSE - KYST-KYST ANLÆGSTEKNISKE FORUNDERSØGELSER

VURDERING AF KONSTRUKTIONER FOR TOGHASTIGHED 250 KM/T

FAGNOTAT

ADRESSE COWI A/S  
Parallevej 2  
2800 Kongens Lyngby

TLF +45 56 40 00 00

FAX +45 56 40 99 99

WWW cowi.dk

## INDHOLD

1	Indledning	2
2	Linjeføring	2
2.1	Horisontal linjeføring	2
2.2	Vertikal linjeføring	3
3	Fritrumsprofil	7
4	Bro	10
4.1	Hængebro	11
4.2	Skråstagsbro	11
4.3	Højbro, 200 m spænd	12
4.4	Lavbro, 100 m spænd	12
5	Tunnel	13
5.1	Generelt	13
5.2	Stempeleffekt	13
5.3	Sænketunnel	14
5.4	Boret tunnel	16
6	Passage af Samsø	16
7	Sammenfatning	18
8	Referencer	21

PROJEKTNR.

A134385

DOKUMENTNR.

A134385-A-NOT-002

VERSION

1.1

UDGIVELSESDATO

25. juni 2021

BESKRIVELSE

UDARBEJDET

TSH, TOOL, SSO

KONTROLLERET

PTR

GODKENDT

PTR

## 1 Indledning

Formålet med dette notat er at vurdere mulighederne for, og konsekvenserne ved, at forøge maksimum toghastighed fra 200 til 250 km/t for hhv. bro, sænketunnel, boret tunnel og kunstig ø, herunder at identificere evt. nødvendige tiltag for at gøre det muligt.

Alle priser er i omkostningsindeks 2019K2.

## 2 Linjeføring

Bane på bro og i tunnel er i Baggrundsrapport [1] forudsat forberedt for en hastighed på 200 km/t. Forudsætningen for banens tracering er Banedanmarks Sporregler, og har følgende geometriske parametre:

- > Horisontalt
  - > for radius og anvendelse af normalbestemmelserne fås
    - > 1888/2950 (200/250 km/t)
- > Vertikalt
  - > for radius og anvendelse af normalbestemmelserne
    - > 14000/22000 (200/250 km/t)

Stigningsforhold er de samme uanset hastighed.

### 2.1 Horisontal linjeføring

Mindste horisontale radius anvendt i Baggrundsrapporten [1] og som ikke opfylder kravet for 250 km/t er sammenfattet i Tabel 2-1 med fremhævet fed skrift. Heraf ses at mindste radius skal øges for 7 korridorer og løsninger for at opfylde krav for hastighed 250 km/t.

Tabel 2-1 Mindste horisontal radius anvendt i Baggrundsrapporten

Korridor	Mindste radius til havs [m]	Mindste radius i land [m]
KKØ-1.1 Nyby Øst - Besser (Hængebro/Højbro)	20.000	<b>2.940</b>
KKØ-2.1 Nyby Vest - Hjalmarsgård (Hængebro/Højbro)	<b>2.000</b>	3.000
KKØ-2.1 Nyby Vest - Hjalmarsgård (Sænketunnel)	<b>2.000</b>	3.000
KKØ-2.2 Nyby Øst - Hjalmarsgård (Hængebro/Højbro)	<b>2.000</b>	3.000
KKØ-3.2 Asnæs Nord - Kunstig ø - Vesborg Fyr (Boret tunnel/Lavbro)	8.000	<b>2.000</b>
KKØ-4.3 Asnæs Syd - Hjalmarsgård (Skråstagsbro/Højbro)	<b>2.000</b>	3.000
KKØ-4.3 Asnæs Syd - Kunstig ø - Hjalmarsgård (Sænketunnel/Lavbro)	<b>2.000</b>	3.000

For de 2 korridorer KKØ-1.1 og KKØ-3.2 kan radius i land øges til krævet 2950 m uden nævneværdige konsekvenser.

For de 5 øvrige korridorer skyldes den lille radius til havs at korridorerne efter ilandføring ved Hjalmarsgård er forudsat ført syd om Ørby, se Figur 2-1.



Figur 2-1 Korridorer med horizontal radius 2000 m nær Hjalmarsgård

Med denne forudsætning skal linjeføringen ændres til havs over en større strækning for at hastigheden kan øges til 250 km/t. Pristillæg herfor er angivet i Tabel 2-2. Pristillæg er baseret på enhedspriser i Baggrundsrapporten [1].

Tabel 2-2 Længde- og pristillæg for øget horizontal radius for øget hastighed 200 til 250 km/t i forhold til Baggrundsrapporten (inkl. korrektionstillæg og PTA)

Korridor og konstruktion der skal forlænges	Øget længde [m]	Pristillæg 4+2 [mio. kr.]	Pristillæg 4+1 [mio. kr.]
KKØ-2.1 højbro	100	249	226
KKØ-2.1 sænketunnel	100	259	215
KKØ-2.2 højbro	100	249	226
KKØ-4.3 højbro	100	249	226
KKØ-4.3 lavbro	50	88	79

Alternativt skal ilandføringspunkt Hjalmarsgård flyttes sydligere mod Brattingsborg skov, men dette kan have miljømæssige konsekvenser.

## 2.2 Vertikal linjeføring

Hvis hastigheden øges fra 200 til 250 km/t skal den vertikale minimumsradius øges fra 14.000 til 22.000 m. Dette har i det heri beskrevne forslag især indvirkning på længden af kunstige øer samt længden af ilandføring af tunneler i trug. Vertikal radius vil ikke påvirke længden af cut & cover tunnel og trug på den kunstige ø. Et alternativ til at forlænge den kunstige ø vil være at lade den forlængede overgangskurve fortsætte ud på broen således at bropillerne og dæmning på den kunstige ø må forhøjes. Disse konsekvenser evalueres i følgende to afsnit, a) forhold omkring overgange ved kunstige øer og b) forhold ved ilandføring (Sjælland, Samsø og Jylland).

Der er i Baggrundsrapporten [1] anvendt vertikal radius 20.000 m ved bestemmelse af længde af kunstige øer samt længde af ilandføring af tunneler i cut & cover tunnel

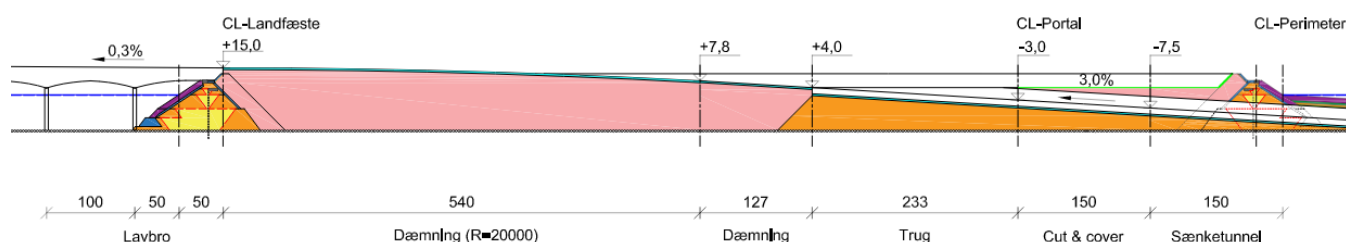
og trug på Sjælland, Samsø og Jylland. Dette er konservativt i forhold til toghastigheden 200 km/t; men blev valgt tidligt i forundersøgelserforløbet for at sikre en robust udformning af kunstige øer og ilandføringszoner med hensyn til pladsbehov i miljøundersøgelserne. I de følgende beregninger af pristillæg for at øge hastigheden fra 200 til 250 km/t angives derfor både et teoretiske pristillæg ved en forøgelse af minimumsradius fra 14.000 til 22.000 m, samt et pristillæg for at øge fra 20.000 til 22.000 m. Sidstnævnte således med udgangspunkt i forudsætningerne for anlægsoverslagene i Baggrundsrapporten [1].

### 2.2.1 Kunstige øer

Længden af kunstige øer er bestemt af følgende parametre:

- > Kote ved overgang fra sænke- eller boret tunnel til cut&cover tunnel
- > Om man vil minimere længden af i) kunstig ø eller ii) tunnelbeskyttelsen
- > Maksimum gradient 3%
- > Overgangskurve (vertikalradius)
- > Kote broendevederlag (fra krav om minimumsafstand fra vandoverflade til brolejer)
- > Minimumsgradient 0.3% på bro

Eksempel på kunstig ø for overgang fra sænketunnel til lavbro på KKØ er vist i Figur 2-2. Overgangskurven er valgt placeret hvor vej/bane er på dæmning.



Figur 2-2 Længdesnit af kunstig ø for overgang sænketunnel til lavbro KKØ (overdrevet vertikal skala)

I denne forundersøgelse har vi ved overgang mellem ø og tunnel valgt at minimere længden af den kunstige ø og derfra udarbejde den dertil svarende tunnelbeskyttelse for sænketunnel eller boret tunnel. Ved overgang mellem ø og bro forlænges den kunstige ø i tilfælde af en større vertikale radius.

Længde af kunstige øer er sammenfattet i Tabel 2-3. Til sammenligning er længderne som ligger til grund for anlægsoverslagene i Baggrundsrapporten [1] også anført.

Tabel 2-3 Længde af kunstig ø afhængig af toghastighed

Toghastighed [km/t]	Vertikal radius [m]	Længde kunstig ø ved sænketunnel [m]	Længde kunstig ø ved boret tunnel [m]
200	14.000	960	1.395
250	22.000	1.080	1.515
Baggrundsrapport	20.000	1.050	1.500

Længdeforøgelse af kunstige øer er sammenfattet i Tabel 2-4.

Tabel 2-4 Længdeforøgelse af kunstig ø

I forhold til	Ændring af vertikal radius [m]	Længdeforøgelse af kunstig ø ved sænketunnel [m]	Længdeforøgelse af kunstig ø ved boret tunnel [m]
Hastighed 200->250 km/t	14.000->22.000	120	120
Baggrundsrapport	20.000->22.000	30	15

Længdeforøgelsen i nederste linje ovenfor skulle teoretisk være den samme. Forskellen skyldes at længden af de borede tunneler i Baggrundsrapporten er oprundet, så en del af længdeforøgelsen allerede er medtaget.

Den større vertikale radius betyder at længden af de kunstige øer teoretisk skal øges med 120 m og længden af tilstødende lavbro reduceres tilsvarende. Længden af cut & cover tunnel er upåvirket af den større vertikale radius på den kunstige ø.

Enhedspriser per længde af kunstig ø og lavbro med 100 m fag inkl. jernbaneinstallationer er fra Baggrundsrapport [1] og vist i Tabel 2-5.

Tabel 2-5 Enhedspriser for kunstige øer og lavbro 100 m fag inkl. BEST (ekskl. korrektionstillæg og PTA)

Konstruktion	Enhedspris 4+2 [kr./m]	Enhedspris 4+1 [kr./m]
Kunstig ø - KKØ	2.099.483	2.079.591
Kunstig ø - KKV	1.099.483	1.079.591
Lavbro 100 m fag	1.006.583	920.291

Prisforskellen mellem kunstig ø og lavbro er meget lille for KVV, men betydelig for KKØ hvor vanddybden og dermed prisen på kunstig ø er større. Det samlede teoretiske pristillæg inklusiv korrektionstillæg og PTA for 120 m længere kunstig ø (og tilsvarende reduktion af længde af lavbro), krævet for at øge hastigheden fra 200 til 250 km/t, er vist i Tabel 2-6.

Tabel 2-6 Teoretisk pristillæg for kunstige øer for øget hastighed 200 til 250 km/t (inkl. korrektionstillæg og PTA)

Korridor	Pristillæg 4+2 [mio. kr.]	Pristillæg 4+1 [mio. kr.]
KKØ	220	234

KKV	19	32
-----	----	----

Da den vertikale minimumsradius som ligger til grund for Baggrundsrapporten [1] herunder anlægsoverslagene konservativt blev sat til 20.000 m for 200 km/t), er størstedelen af prisforøgelsen ved at gå fra 200 til 250 km/t allerede indregnet i anlægsoverslagene. Pristillægget for 250 km/t i forhold til anlægsoverslagene i Baggrundsrapporten [1] er vist i Tabel 2-7.

Tabel 2-7 *Pristillæg for kunstige øer og lavbro 100 m fag for øget hastighed 200 til 250 km/t i forhold til Baggrundsrapporten (inkl. korrektionstillæg og PTA)*

Korridor og konstruktion	Pristillæg 4+2 [mio. kr.]	Pristillæg 4+1 [mio. kr.]
KKØ kunstig ø sænketunnel til lavbro	55	58
KKØ kunstig ø boret tunnel til lavbro	28	29
KKV kunstig ø sænketunnel til lavbro	5	8

Et alternativ til at forlænge den kunstige ø vil være at lade den forlængede overgangskurve fortsætte ud på broen således at bropillerne og dæmning på den kunstige ø må forhøjes.

## 2.2.2 Ilandføring af tunneler

Den større vertikale radius betyder at længden af trug (for både sænketunnel og boret tunnel) teoretisk skal øges med ca. 120 m svarende til forøgelsen ved kunstige øer. Den præcise længdeforøgelse afhænger af gradient af tunnel ved ilandføring samt gradient af bane i terræn, hvilke varierer for de undersøgte korridorer. Enhedspriser for trug er estimeret til 25% af prisen på cut & cover tunnel kombineret med sænketunnel taget fra Baggrundsrapporten [1] og er vist i Tabel 2-8. Prisen på baneinstallationer (BEST) er næsten den samme i trug og på terræn og er derfor holdt ude af følgende priser da forlængelse i trug opvejes af kortere bane i terræn.

Tabel 2-8 *Enhedspris for trug (ekskl. korrektionstillæg og PTA)*

Konstruktion	Enhedspris 4+2 [kr./m]	Enhedspris 4+1 [kr./m]
Trug	310.000	269.750

Det samlede teoretiske tillæg for 120 m længere trug inklusiv korrektionstillæg og PTA er vist i Tabel 2-9.

Tabel 2-9 *Teoretisk pristillæg for trug ved ilandføring Sjælland, Samsø og Jylland for øget hastighed 200 til 250 km/t (inkl. korrektionstillæg og PTA)*

Trug kombineret med	Pristillæg 4+2 [mio. kr.]	Pristillæg 4+1 [mio. kr.]
Sænketunnel eller boret tunnel	62	54

Vertikal radius anvendt i Baggrundsrapporten [1] er 20.000 m, hvorved størstedel af prisforøgelsen ved at gå fra 14.000 m til 22.000 m allerede er indregnet. Prisforøgelse i forhold til anlægsoverslag i Baggrundsrapporten er sammenfattet i Tabel 2-10.

Tabel 2-10 *Pristillæg for trug ved ilandføring Sjælland, Samsø og Jylland for øget hastighed 200 til 250 km/t ift. Baggrundsrapportens anlægsoverslag (inkl. korrektionstillæg og PTA)*

Trug kombineret med	Pristillæg 4+2[mio. kr.]	Pristillæg 4+1 [mio. kr.]
Sænketunnel	16	14
Boret tunnel	8	7

Når boret tunnel her giver et lavere tillæg end sænketunnel i modsætning til tillægget vist i Tabel 2-9, skyldes det at længden af de borede tunneler i Baggrundsrapporten er oprundet, så en del af længdeforøgelsen allerede er indregnet i anlægsoverslaget.

### 3 Fritrumsprofil

Fritrumsprofil for jernbane er bestemt af sporafstand, vandret sikkerhedsafstand til faste genstande og frihøjde. Banedanmarks krav hertil er sammenfattet i Design basis [2] og i Tabel 3-1 nedenfor for gældende EBa profil og antaget direkte sporbefæstelse (slab track) med 615 mm højde af sporsystem.

Tabel 3-1 *Krav til fritrumsprofil for jernbane jfr. EBa profil*

Hastighed [km/t]	Sporafstand [m]	Vandret sikkerhedsafstand [m]	Frihøjde fra top af konstruktion, bro [m]	Frihøjde fra top af konstruktion, tunnel [m]
200	4,25	2,60	6,495	6,545
250	4,25	2,60	7,505	7,555

Tværsnittene i bro- og tunnelløsningerne er bestemt ud fra disse krav svarende til 200 km/t toghastighed. Den eneste forskel ved 250 km/t toghastighed er 1,01 m øget fritrumshøjde. Denne ekstra højde er til stede i to-etagers broløsningerne, hvor højden er dikteret af hensynet til broens stivhed, men det vil forøge omkostningen for en sænketunnel, både på grund af den umiddelbart forøgede mængde konstruktionsbeton, men også at det giver øget opdrift og dermed behov for mere ballastbeton.

Fordyrelsen hvis sænketunnelen skal gøres 1 m højere og antageligt så også graves 1 m længere ned (se afsnit 5.2 og 5.4.2) vil eventuelt kunne reduceres ved en revurdering af normkravet efter gennemførelse af studier af tekniske løsninger efterfulgt af en eksplicit risikoanalyse.

For en boret tunnel ville diameteren ligeledes blive forøget. Afhængig af placeringen af impulsventilatorer vil denne forøgelse være i størrelsesorden lidt mindre end 1 m. En større diameter vil kræve en tilsvarende større dybde af tunnel ved overgang til cut & cover tunnel, som derved også vil skulle forlænges. Det skal nævnes at den valgte diameter til 200 km/t for bane allerede er at betragte som stor i international

sammenhæng. Et tillæg på diameteren på omkring 1 m ville selvklart medføre at den yderligere nærmer sig grænsen for velafprøvet teknik.

### 3.1 Hvad angiver andre landes normer

Som det fremgår af Tabel 3-1 kræver Banenormen umiddelbart et tillæg i frihøjden på 1,010 m. Et sådant krav vil for Kattegatforbindelsens tunnellsninger være særdeles bekosteligt at respektere. Vi har derfor som eksempel set på, hvad f.eks. de svenske og tyske normer kræver.

Til sammenligning skal tages i betragtning at både Tyskland og Sverige har spænding på elektrificeringen på 15 kV, mens vi i Danmark anvender 25 kV. Det kan have indflydelse på den nødvendige grundafstand for isolering som ligger til grund for afstandskrav ved 200 km/t, men bør ikke være voldsomt afhængigt af hastigheden og dermed ikke foranledige øget isolationskrav ved øget hastighed. Der vurderes således at et eventuelt krav om forøget plads til køreledninger skyldes evt. ekstra styrke relateret til et øget kontaktryk fra pentografen ved høje hastigheder.

#### 3.1.1 Sverige - Trafikverket

Trafikverket opgiver i norm TDOK 2014:0555 [3] og TRVINFRA-0004 [4] afsnit 6.4 tabel 1 følgende mindste højde under faste konstruktioner:

Tabel 3-2 Trafikverkets Sammenfattede krav til frihøjde fra SO til underside konstruktion.

Højde fra SO til underside af faste konstruktioner (tag)	>130-200 km/t [m]	>200-360 km/t [m]
Minimum	6,5	6,7

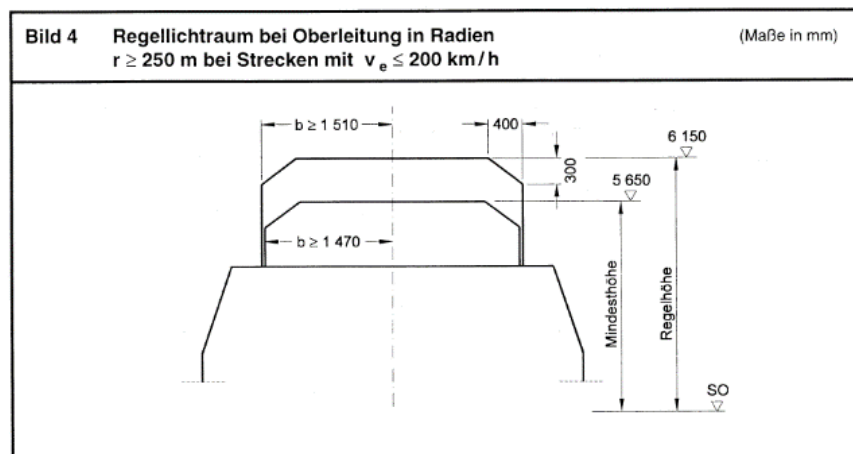
Det ses af ovenstående af de svenske normer således kun kræver en forøgelse med 0,200 m i tilfælde af øget hastighed fra 200 km/t til 250 km/t.

Med et tillæg af en sporopbygning på 0,615 m vil kravet for frihøjde bund til top være 7,315 m. Det skal dog her også bemærkes at en stor del af forskellen mellem den danske tilgang og den svenske, er et højere svensk krav til hastigheder under 200 km/t end i Danmark.

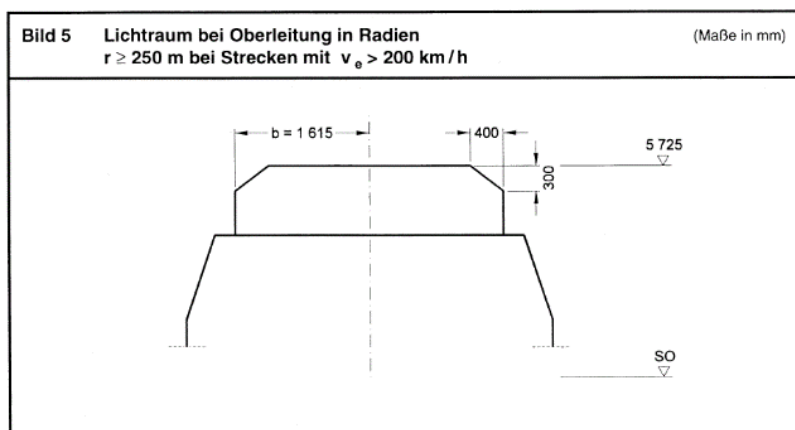
#### 3.1.2 Tyskland - Deutsche Bahn

Deutsche Bahn norm 800.0130 [5] omkring fritrumskrav på bane i terræn specificerer to forskellige højdekrav til GC-profilet for hhv  $\leq 200$  km/t og  $> 200$  km/t. Disse er gengivet i figurene nedenfor.





Figur 3-1 DB Fritrumsprofil GC for hastigheder op til og med 200 km/t



Figur 3-2 DB Fritrumsprofil GC for hastigheder over 200 km/t

Sammenfattet ser det således ud:

Tabel 3-3 Deutsche Bahn Sammenfattede krav til frihøjde fra SO til top af strømaftager i relation til tilladt hastighed på banen.

Højde fra SO til top af strømaftager	$\leq 200$ km/t [m]	$> 200$ km/t [m]
Minimum	5,650	5,725
Standard	6,150	

Som det ses, er der i selve fritrumsprofilen kun et tillæg på 75 mm for  $> 200$  km/t i forhold til Minimumshøjden for  $\leq 200$  km/t.

Umiddelbart har det ikke været muligt at identificere kravet til den faste installation ovenover. Ikke desto mindre vurderes det at man efter DB normen ville kunne undgå den forøgelse af højden på 1,010 m som fremgår af Banenormen.

## 4 Bro

I det følgende beskrives konsekvenserne ved forøgelse af toghastigheden fra 200 til 250 km/t for følgende brotyper:

- > Hængebro, gitterbro i to etager
- > Skråstagsbro, gitterbro i to etager
- > Højbro, 200 m gitterbro i to etager
- > Lavbro, 100 m kassedragerbro i en etage.

Nærværende afsnit om broløsninger bygger i høj grad på erfaringerne fra Femern Bælt, hvor der blev udarbejdet et notat: "Side Study 4, 250 km/h Train Speed", se reference [6].

På Femern Bælt beregnede man en merudgift på 5,1% ved øget toghastighed, men det var øgningen fra 160 til 200 km/t, der medførte dette, idet bredden af togdækket skulle øges fra 12,2 til 14,1 m. På Kattegat er udgangspunktet 200 km/t, og der sker ingen yderligere øgning af dækbredden ved at gå fra 200 til 250 km/t.

Det afgørende krav af hensyn til passagerernes komfort er kravet til maksimalt vinkelknæk i lodret plan ved ekspansionsfuger, se Figur 4-1 og Tabel 4-1. Dette krav undersøges i de følgende afsnit. De øvrige komfortkriterier er enten direkte opfyldt eller kan opfyldes uden betydende merudgift.



Figur 4-1 Vinkeldrejninger.

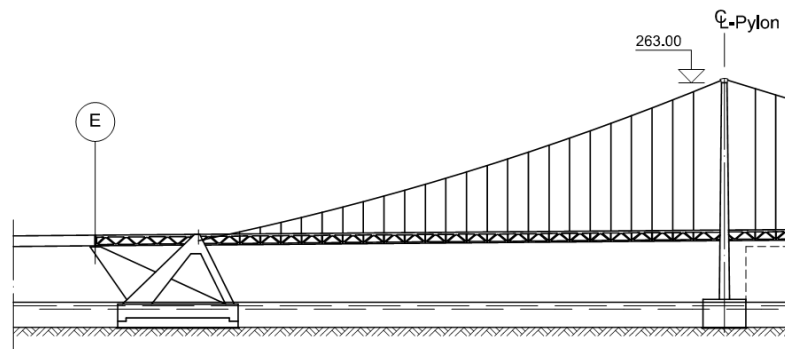
Tabel 4-1 Krav til vinkeldrejninger.

Hastighed [km/t]	En dragerende Maks. rotation [mrad]	To dragerende Maks. rotation [mrad]
200	$\theta \leq 3,0$	$\theta_1 + \theta_2 \leq 4,0$
250	$\theta \leq 2,5$	$\theta_1 + \theta_2 \leq 3,0$

Dynamisk faktor på toglast afhænger også af hastigheden. Den dynamiske faktor for forudsatte brotyper vil skulle bestemmes ved dynamiske analyser, noget der er tidskrævende og ikke udført i nuværende fase. Simple håndberegninger indikerer dog en meget lille forøgelse af dynamisk faktor for globale analyser ved at øge hastigheden til 250 km/t. Dette er i overensstemmelse med erfaring for tidligere projekter.

## 4.1 Hængebro

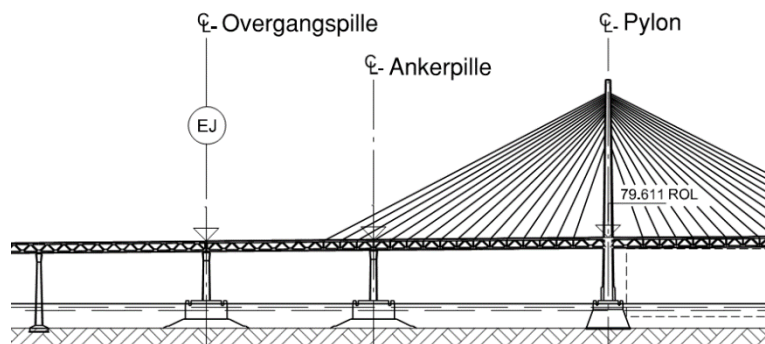
For en hængebro med passagertog, der kører 200 eller 250 km/t, er det ikke muligt at have ekspansionsfuger ved pylonerne eller ved ankerblokkene, da broens stivhed ikke er tilstrækkelig til at begrænse vinkelknæk ved disse placeringer. I stedet udføres et eller to tilslutningsfag kontinuerte med hovedbroens drager, så forholdene ved ekspansionsfugerne bliver de samme som for de andre ekspansionsfuger i tilslutningsbroerne, se eksempel i Figur 4-2. Der er dermed ingen merpris for 250 km/t for denne løsning. Den beskrevne løsning er velkendt fra adskillige japanske hængebroer med toglast.



Figur 4-2 Eksempel et tilslutningsfag kontinuert med hovedbroens drager, hængebro.

## 4.2 Skråstagsbro

For skråstagsbroen er kravet til vinkelknæk ved ekspansionsfugen vanskeligt at opfylde, da sidefaget i en skråstagsbro er væsentligt slappere end et 200 m bjælkefag med lignende geometri. En mulig løsning er at flytte ekspansionsfugen fra ankerpillen til den første pille i tilslutningsbroen, se eksempel i Figur 4-3. Dette medfører en højere pris på de to ekspansionsfuger ved skråstagsbroen, men en næsten lige så stor besparelse for to andre fuger, der skal tage en tilsvarende mindre vandret bevægelse. Det samme gælder for lejernes pris. En yderligere fordel ved denne løsning er, at det ekstra fag øger reaktionen på ankerpillen fra egenvægt betydeligt, hvilket reducerer omfanget af lodrette forspændingskabler i ankerpillen til sikring mod opløft af drageren.



Figur 4-3 Eksempel et tilslutningsfag kontinuert med hovedbroens drager, skråstagsbro.

### 4.3 Højbro, 200 m spænd

På Femern broen fandt man, at 250 km/t for persontog nødvendiggjorde en reduktion af endefagene op til en ekspansionsfuge fra 200 til 180 m. Dette resultat kan ikke umiddelbart overføres til Kattegat, da det skyldtes, at komfortkriteriet skulle være opfyldt, når der var et tungt godstog i værst tænkelige position i det andet spor.

På Kattegat kan der kun være et persontog i det andet spor, så belastningen, der medfører et vinkelknæk i ekspansionsfugen reduceres til 46% i forhold til Femern. De 46% fremkommer som forholdet mellem vægten af to persontog (48 kN/m) og vægten af et godstog + et persontog (80 + 24 kN/m). Når der tages hensyn til, at Kattegats drager ikke behøver at have samme stivhed (og styrke) som Femerns, findes at vinkelknækket bliver 60% af Femerns, hvorfor det ikke er nødvendigt at reducere spændvidden fra 200 til 180 m. For Femern broen var vinkelknækket ved 200 m endefag mindre end 4,0 mrad, så med reduktionsfaktoren 0.60 for det dominerende bidrag fra vertikal toglast er knækket med sikkerhed mindre end 3,0 mrad for Kattegat.

Det kunne tænkes, at kravet til begrænsning af vinkeldrejning ved ekspansionsfuger medførte ekstra krav til modvirkning af differenssætninger. Imidlertid skal disse begrænses til 20 mm af hensyn til statiske forhold, og sådanne differenssætninger giver højst en vinkeldrejning på  $4 \cdot 10^{-4}$  hvilket er ubetydeligt i forhold til grænsen på  $3 \cdot 10^{-3}$ . Det er således udelukkende statiske forhold, der kan nødvendiggøre justering af lejer til udligning af differenssætninger.

Hvis støjen fra persontog, der kører 250 km/t, er mere generende end støjen fra persontog, der kører 200 km/t, anbefales det at indbygge støjdæmpning i den direkte sporbefæstelse, hvilket er billigere end opsætning af støjskærme.

Hvis der anvendes støjskærme vil de skulle dimensioneres for et større lufttryk fra passerende tog der kører 250 km/t.

Det er sandsynligt, at øget toghastighed medfører krav om hyppigere sporjusteringer for at opretholde "very good" passagerkomfort, men dette har ingen betydning for anlægsoverslaget.

### 4.4 Lavbro, 100 m spænd

Endefaget på 100 m er simpelt understøttet ved fugen, men delvist indspændt ved den næste bropille, så vinkeldrejningen er ca.  $1/30 \cdot p \cdot L^3 / (E \cdot I)$  hvilket med  $p = 0.048$  MN/m,  $L = 100$  m,  $E = 30000$  MPa og  $I = 60$  m<sup>4</sup> giver  $0,89 \cdot 10^{-3}$  rad eller 1,78 mrad fra begge endefag. Øvrige bidrag til vinkelknækket er ubetydelige, idet sporjustering af statiske grunde påregnes nødvendig ved 10 mm differens sætning, så forholdene er som ved 200 m fag. Kravet om maksimum 3,0 mrad er således opfyldt uden reduktion af endefagenes længde.

De øvrige forhold for 200 m fag gælder også for 100 m fag.

## 5 Tunnel

### 5.1 Generelt

Der findes relativt få undersøiske tunneller til højhastighedsjernbane.

### 5.2 Fritrumsprofil

Jf. afsnit 0 vil en forøgelse af hastigheden fra 200 til 250 km/t i henhold til gældende banenorm medføre en forøgelse af højden af fritrumsprofillet.

Da omkostninger forbundet med en forøgelse af tværsnittet vil være væsentlige, vil det være på sin plads undersøge baggrunden for et forøget krav til fritrum og mulighed for en dispensation for en afvigelse fra normen.

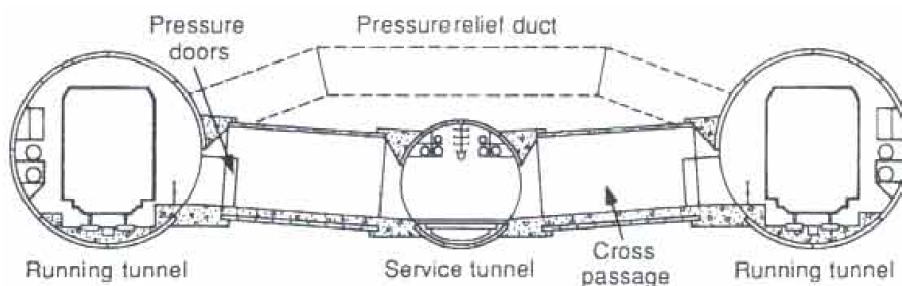
Anlægsomkostninger forbundet med et 1 m højere fritrumsprofil for henholdsvis sænketunnel og boret tunnel er derfor ikke analyseret i dette fagnotat. Skønsmæssigt vil forøgelsen ligge i størrelsesordenen 5-10%.

### 5.3 Stempeleffekt

Generelt for både sænketunnel og borede tunnelstrækninger kræves der er en gradvis overgang fra fri kørsel udenfor tunnel til kørsel i tunnel for at begrænse ubehagelige trykforskelle for passagererne.

Genen kan begrænses ved et større fritrumsprofil over en strækning i den første del af cut & cover tunnelen evt., del af sænketunnel og boret tunnel eller ved at forbinde de to kørerør. Fastlæggelse af den nødvendige strækning kræver analyse af trykforholdene. Grundet den ekstra luft i en boret tunnellostning, sammenlignet med en rektangulær sænketunnel, forventes det at overgangstrækningen er marginalt længere for en sænketunnel end den er for en boret tunnel.

På hovedstrækningen af tunnelen forbindes de to tunnelrør med en luftforbindelse til trykkudligning. Ved anlæg af Kanaltunnellen mellem England og Frankrig blev der bygget trykreducerende forbindelsesrør mellem de to tunneller for at reducere stempeleffekten, se Figur 5-1. Det skal bemærkes at stempeleffekten i Kanaltunnellen er stor, da der anvendes dobbelt-dæk togvogne til transport af biler og fritrumsprofillet kun er en smule større end toget.



Figur 5-1 – Eksempel på trykkudligning system "Pressure relief duct" fra Kanaltunnellen

For både sænketunnel og boret tunnel er det p.t. forudsat at tunnelrør til jernbane lægges lige ved siden af hinanden, og det vil derfor ikke være besværligt af etablere trykudligning.

## 5.4 Sænketunnel

### 5.4.1 Vinkeldrejning

Krav til vinkeldrejningen i bevægelsesfugen mellem to tunnelelementerne skal sikre den samme funktion til understøtning af skinner, som gælder for fugerne til broløsningerne.

Det antages at afstanden imellem bevægelsesfuger for en Kattegat sænketunnel vil være den samme, som for Femern sænketunnelen. Det vil sige bevægelsesfuger (såkaldte immersion joint) placeres for hver 220 m, svarende til længden af et tunnelelement.

Et tunnelelement består af 9 monolitiske segmenter af 24.2 m, hvor en mindre segmentfuge mellem disse monolitiske segmenter vil kunne optage (i denne sammenhæng) en væsentligt mindre vinkeldrejning.

Tabel 5-1 og tilhørende Figur 4-1 (under det tidligere broafsnit) beskriver krav til maksimale vinkeldrejninger i fuger for Femern sænketunnel, hvor projekteringshastighed for tog er 200 km/t. Forskellen imellem krav til bro og sænketunnel er p.t. ukendt for en hastighed på 250 km/t.

Tabel 5-1 Krav til vinkeldrejninger.

Hastighed [km/t]	I forhold til vandret Maks. rotation [mrad]	Samlet relativ Maks. rotation [mrad]
200	$\theta \leq 3,5$	$\theta_1 + \theta_2 \leq 5,0$

Vinkeldrejninger i fugerne afhænger af i) konstruktionens geometri, ii) stivheden af funderingen, som resultat af jordbundsforhold samt eventuel udskiftning/jordforbedring og iii) vertikal belastning på tunnel eksempelvis fra sedimentation (eller en på anden vis dynamisk havbund), last fra vægten af tunnelbeskyttelse ved overgangssøer og ilandføring. Disse parametre vil i samspil bidrage til differencesætninger med dertil tilhørende vinkeldrejninger i fuger.

Fugebevægelser fastlægges specifikt for ethvert sænketunnelprojekt. På grund af samspillet af de forskellige parametre, er der usikkerhed forbundet med at overføre erfaring fra et sænketunnelprojekt til et andet.

Da tunnellens geometri for Kattegatforbindelsen forventes af være stort set den samme for Femern sænketunnel og geologien for de to områder er sammenlignelig, er det ikke urimeligt at se på erfaringer fra Femern sænketunnel til en Kattegat sænketunnel.

Femern sænketunnel er funderet på moræneler, sand og plastisk ler, mens geologien for Kattegat (for dette formål) er sammenlignelig med Femern. Det antages derfor at

sætninger og stivhedsvariationer i langsgående og tværgående retning for Kattegat vil ende med at være i samme størrelsesorden, som for Femern.

Erfaring fra projektering af andre sænketunneller har vist, at vinkeldrejninger som følge af differencesætninger ikke er uvæsentlige i forhold til krav fra jernbaner, specielt jernbaner til høje hastigheder f.eks. i Holland. Det skal bemærkes at krav til maksimal vinkeldrejning minimeres ved forøgelse af projekteringshastigheden.

Da tunnelkonstruktion, geologi og belastning for en Kattegat sænketunnel antages at være sammenlignelig med forholdene på Femern, hvor vinkeldrejninger har vist sig at være acceptable for en projekteringshastighed på 200 km/t, vurderes risikoen p.t. for at overskride krav til vinkeldrejning ved 200 km/t, at være acceptabel.

Baseret på erfaring fra andre sænketunneller med højhastighedsjernbaner vurderes risikoen for at kunne projektere en sænketunnel for jernbane Kattegat med 250 km/t at være forhøjet i forhold til 200 km/t. Om det er muligt, må afgøres på baggrund af flere jordbundsundersøgelser.

Det kan ikke udelukkes at nyudviklede justeringssystemer af skinnehøjde vil kunne tilpasses lokalt til en højere projekteringshastighed, geologi og belastning. Ligeledes kunne vinkeldrejningen muligvis begrænses ved introduktion af kabler placeret over elementfugerne til reduktion af fugeåbning og dermed mindre vinkeldrejning. Kabler over fuger kunne tænkes placeret på samme vis som i Japanske sænketunneller udsat for store jordskælv.

Undersøgelser baseret på aktuelle jordbundsforhold vil afklare om risikoen ville kunne reduceres.

## 5.4.2 Udgravning

Udgravningsdybde varierer jf. den vertikale linjeføring. Hvis sænketunnelen skal gøres 1 m højere for at øge hastigheden fra 200 til 250 km/t må det antages, at tunnelen også skal graves 1 m længere ned. Udgravningsmængder for både 200 og 250 km/t samt forøgelsen er sammenfattet i nedenstående tabel.

Tabel 5-5-2 Udgravningsmængder [ $m^3$ ]

Korridor	200 km/t	250 km/t	Forøgelse
KKV-1.1 Onsbjerg Nord - Kunstig ø - Hou (Sænketunnel/Lavbro)	15.000.000	16.700.000	1.700.000
KKV-1.2 Onsbjerg Syd - Kunstig ø - Hou (Sænketunnel/Lavbro)	15.700.000	17.500.000	1.800.000
KKØ-2.1 Nyby Vest - Hjalmsgård (Sænketunnel)	30.200.000	33.400.000	3.200.000
KKØ-3.1 Asnæs Syd - Kunstig ø - Vesborg Fyr (Sænketunnel/Lavbro)	22.500.000	25.000.000	2.500.000
KKØ-3.3 Asnæs Syd - Kunstig ø - Samsø Syd (Sænketunnel/Lavbro)	22.500.000	25.000.000	2.500.000
KKØ-4.3 Asnæs Syd - Kunstig ø - Hjalmsgård (Sænketunnel/Lavbro)	25.500.000	28.200.000	2.700.000

Den gennemsnitlige forøgelse af udgravningen er 11%. Dette er dog ikke medtaget i den samlede konklusion, da det her vurderes, at der vil kunne opnås hel eller delvis dispensation fra kravet om 1,010 m øget frihøjde ved 250 km/t.

## 5.5 Boret tunnel

### 5.5.1 Vinkeldrejning

Boret tunnel vil bestå af meget korte segmenter, hvor vinkeldrejningen på grund af linjeføringen vil være meget lille sammenlignet med bro og sænketunnel.

Differensbevægelser og krumninger vil i givet fald udelukkende skyldes variationer i geologien. Det forventes ikke, at geologien vil medføre store krumninger af tunnelen.

Som referenceprojekt kan angives Green Heart tunnellen, som er en boret højhastigheds jernbanetunnel i Holland med diameter 14,2 m. Tunnellen er anlagt i perioden 2000-2005. Det er en højhastighedsbane, forventeligt med projekteret hastighed på 250 km/t.

### 5.5.2 Udgravning

Ved et krav om en større boret tunneldiameter vil kravet til dybden af tunnellen ved start- og slutkamre for TBM ligeledes være tilsvarende højere. Hvis man som udgangspunkt kræver 1 x diameter jorddække ved overgangen fra boret tunnel til cut & cover tunnel, vil en større tunneldiameter kræve en dybere skakt og en længere cut & cover tunnel.

## 6 Passage af Samsø

De skitserede mulige linjeføringer på Samsø anvender en minimumsradius på 3000 m, hvilket muliggør 250 km/t. Det øgede krav til vertikalradius ved 250 km/t gør den vertikale geometri "mere stiv", hvilket kan medføre længere dæmninger og udgravninger og dermed behov for mere jordflytning. Da de mulige linjeføringer i dette



stade af forundersøgelserne kun er behandlet i 2D er det ikke muligt at kvantificere dette; men meromkostningerne antages at være beskedne.

En station på Samsø til 250 km/t for gennemkørende tog vil skulle have sidespor med sideperroner, så hurtige gennemkørende tog kan passere i hovedsporet uden at komme tæt på perroner. Dette vurderes at medføre en meromkostning i størrelsesordenen 120 mio. kr.

## 7 Sammenfatning

Overordnet set vil en ændring af den maksimale hastighed fra 200 til 250 km/t medføre en fordyrelse på under 1 % (ved at gå fra en minimumsradius på 14.000 m til 22.000 m). Afhængig af hvilken korridor der er tale om varierer dette tal dog imellem ca. 0 og 2%. Dette er baseret på de forudsætninger for linjeføringerne, der har ligget til grund for arbejdet med Baggrundsrapporten. Det forventes at tillægsprisen vil kunne reduceres ved optimering af designet af linjeføringerne. For korridorer der indeholder tunneler, er det forudsat, at der vil kunne opnås dispensation fra et krav i banenormerne om øget frihøjde.

For samtlige undersøgte broløsninger gælder, at komfortkriterier for tog med hastighed 250 km/t kan opfyldes uden merudgift til anlæg.

I tilfælde af et ønske om 250 km/t bør det undersøges om krav til øget fritrumsprofil skal fastholdes, eller om der kan tillades en dispensation under nøjere specifikke forudsætninger. I fald afvigelser ikke accepteres, vil det medføre en betydelig fordyrelse af både en sænketunnel og en boret tunnel løsning, som ikke er medtaget her.

Fastholdes tunneltværsnittet fra 200 km/t vil trykstigningsforøgelsen ved at forøge hastigheden fra 200 km/t til 250 km/t kun medføre en marginal meromkostning, da denne effekt er lokal ved indkørsel til tunnelen.

For sænketunnelløsninger kan det ikke udelukkes at aktuelle jordbundsforhold og belastning vil medføre en merudgift for tog med hastighed 250 km/t. Dette forhold er ikke gældende for en boret tunnel.

En ændring af toghastigheden fra 200 til 250 km/t vil medføre en skærpelse af den minimale vertikalaradius, hvilket vil medføre en forlængelse af kunstige øer imellem bro og tunnel, samt af trugstrækninger ved ilandføring på Sjælland, Samsø og i Jylland.

Et alternativ til at forlænge den kunstige ø vil være at lade den forlængede overgangskurve fortsætte ud på broen, således at bropillerne og dæmning på den kunstige ø må forhøjes og længden af øen hermed ikke forøges. På land vil man afhængig af de lokale geometriske forhold også kunne optimere på konstruktionslængden ved f.eks. at flytte den konvekse del af det vertikale længdeprofil uden for konstruktionerne.

For 5 KKØ korridorer med ilandføring i Hjalmarsgård, vil skærpede krav til den minimale horisontalradius medføre en forlængelse af korridorerne til havs.

En station på Samsø til 250 km/t for gennemkørende tog vil skulle have sidespor med sideperroner, så hurtige gennemkørende tog kan passere i hovedsporet uden at komme tæt på perroner. Dette vurderes at medføre en meromkostning i størrelsesordenen 120 mio. kr.

Pristillæggene som følger af ovenstående er sammenfattet i Tabel 7-1 og Tabel 7-2 **Error! Reference source not found.** for en kombineret vej- og jernbaneløsning (4+2). Her er kun 4+2 vist, idet det vurderes som usansynligt at man ville vælge at kombinere en hastighedsforøgelse til 250 km/t med en ét-sporsløsning. Meromkostningen til ekstra sidespor på stationerne på Samsø er lagt ind under KKV-korridorerne.

Der er i tabellerne ikke taget højde for en eventuel forøgelse af tunneltværsnit som konsekvens af en hastighedsforøgelse. Det er således forudsat, at der vil kunne opnås dispensation fra Banenormens krav for såvidt angår fritrumsprofilens højde.

Tabel 7-1 Sammenfatning af pristillæg (4+2) for øget hastighed fra 200 til 250 km/t (inkl. korrektionstillæg og PTA)

Korridor og løsning	Tillæg horizontal radius [mio. kr.]	Tillæg ø vertikal radius [mio. kr.]	Tillæg trug vertikal radius [mio. kr.]	Samsø Station 2 ekstra spor	Tillæg i alt [mio. kr.]
KKV-1.1 Onsbjerg Nord - Kunstig ø - Hou (Sænketunnel/Lavbro)	0	19	62	120	201
KKV-1.2 Onsbjerg Syd - Kunstig ø - Hou (Sænketunnel/Lavbro)	0	19	62	120	201
KKV-2.1 Onsbjerg Syd - Hou (Højbro/Lavbro)	0	0	0	120	120
KKV-2.1 Onsbjerg Syd - Hou (Boret tunnel)	0	0	124	120	244
KKV-2.2 Onsbjerg Nord - Hou (Højbro/Lavbro)	0	0	0	120	120
KKV-2.3 Fogedmark - Hou (Højbro/Lavbro)	0	0	0	120	120
KKV-3.1 Kolby Kås - Gylling Næs (Højbro/Lavbro)	0	0	0	120	120
KKV-3.3 Kolby Kås - Søby (Boret tunnel)	0	0	124	120	244
KKV-3.4 Fogedmark - Gylling (Højbro/Lavbro)	0	0	0	120	120
KKV-3.5 Fogedmark - Søby (Boret tunnel)	0	0	124	120	244
KKØ-2.1 Nyby Vest - Hjalmarsgård (Hængebro/Højbro)	243	0	0		243
KKØ-2.1 Nyby Vest - Hjalmarsgård (Sænketunnel)	253	0	124		377
KKØ-2.2 Nyby Øst - Hjalmarsgård (Hængebro/Højbro)	243	0	0		243
KKØ-2.5 Røsnæs Syd - Kunstig ø - Hjalmarsgård (Boret tunnel/Lavbro)	0	220	62		282
KKØ-2.6 Nyby Øst - Hjalmarsgård (Sænketunnel)	0	0	124		124
KKØ-3.1 Asnæs Syd - Kunstig ø - Vesborg Fyr (Sænketunnel/Lavbro)	0	220	62		282
KKØ-3.2 Asnæs Nord - Kunstig ø - Vesborg Fyr (Boret tunnel/Lavbro)	0	220	62		282
KKØ-3.3 Asnæs Syd - Kunstig ø - Samsø Syd (Sænketunnel/Lavbro)	0	220	62		282
KKØ-3.4 Asnæs Nord - Kunstig ø - Samsø Syd (Boret tunnel/Lavbro)	0	220	62		282
KKØ-4.1 Asnæs Nord - Hjalmarsgård (Boret tunnel)	0	0	124		124
KKØ-4.1 Asnæs Nord - Kunstig ø - Hjalmarsgård (Boret tunnel/Lavbro)	0	220	62		282
KKØ-4.2 Asnæs Forskov - Kunstig ø - Hjalmarsgård (Boret tunnel/Lavbro)	0	220	62		282
KKØ-4.3 Asnæs Syd - Hjalmarsgård (Skråstagsbro/Højbro)	243	0	0		243
KKØ-4.3 Asnæs Syd - Kunstig ø - Hjalmarsgård (Sænketunnel/Lavbro)	85	220	62		367

Den vertikale linjeføring er i Baggrundrapporten [1] baseret på en vertikal minimumsradius på 20.000 m både mht. tegninger, tabeller og anlægsoverslag. Det er konservativt i forhold til hastigheden på 200 km/t som kun kræver 14.000 m; men er valgt for at sikre robusthed under udvikling af korridorerne. Der vil således kun skulle en beskedent ændring til for at løfte de 20.000 m til de 22.000 m, som er minimumsradius for 250 km/t. Omvendt betyder det, at de vertikale længdeprofiler vil kunne optimeres, såfremt 200 km/t fastholdes med en lille besparelse til følge.

Pristillæg til Baggrundrapportens anlægsoverslag ved at gå fra 200 til 250 km/t er sammenfattet i Tabel 7-2.

Tabel 7-2 Sammenfatning af pristillæg (4+2) for øget hastighed fra 200 til 250 km/t i forhold til Baggrundrapportens anlægsoverslag (inkl. korrektionstillæg og PTA)

Korridor og løsning	Tillæg horizontal radius [mio. kr.]	Tillæg ø vertikal radius [mio. kr.]	Tillæg trug vertikal radius [mio. kr.]	Station Samsø 2 ekstra spor	Tillæg i alt [mio. kr.]
KKV-1.1 Onsbjerg Nord - Kunstig ø - Hou (Sænketunnel/Lavbro)	0	5	16	120	141
KKV-1.2 Onsbjerg Syd - Kunstig ø - Hou (Sænketunnel/Lavbro)	0	5	16	120	141
KKV-2.1 Onsbjerg Syd - Hou (Højbro/Lavbro)	0	0	0	120	120
KKV-2.1 Onsbjerg Syd - Hou (Boret tunnel)	0	0	16	120	136
KKV-2.2 Onsbjerg Nord - Hou (Højbro/Lavbro)	0	0	0	120	120
KKV-2.3 Fogedmark - Hou (Højbro/Lavbro)	0	0	0	120	120
KKV-3.1 Kolby Kås - Gylling Næs (Højbro/Lavbro)	0	0	0	120	120
KKV-3.3 Kolby Kås - Søby (Boret tunnel)	0	0	16	120	136
KKV-3.4 Fogedmark - Gylling (Højbro/Lavbro)	0	0	0	120	120
KKV-3.5 Fogedmark - Søby (Boret tunnel)	0	0	16	120	136
KKØ-2.1 Nyby Vest - Hjalmarsgård (Hængebro/Højbro)	243	0	0		243
KKØ-2.1 Nyby Vest - Hjalmarsgård (Sænketunnel)	253	0	32		285
KKØ-2.2 Nyby Øst - Hjalmarsgård (Hængebro/Højbro)	243	0	0		243
KKØ-2.5 Røsnæs Syd - Kunstig ø - Hjalmarsgård (Boret tunnel/Lavbro)	0	28	8		36
KKØ-2.6 Nyby Øst - Hjalmarsgård (Sænketunnel)	0	0	32		32
KKØ-3.1 Asnæs Syd - Kunstig ø - Vesborg Fyr (Sænketunnel/Lavbro)	0	55	16		71
KKØ-3.2 Asnæs Nord - Kunstig ø - Vesborg Fyr (Boret tunnel/Lavbro)	0	28	8		36
KKØ-3.3 Asnæs Syd - Kunstig ø - Samsø Syd (Sænketunnel/Lavbro)	0	55	16		71
KKØ-3.4 Asnæs Nord - Kunstig ø - Samsø Syd (Boret tunnel/Lavbro)	0	28	8		36
KKØ-4.1 Asnæs Nord - Hjalmarsgård (Boret tunnel)	0	0	16		16
KKØ-4.1 Asnæs Nord - Kunstig ø - Hjalmarsgård (Boret tunnel/Lavbro)	0	28	8		36
KKØ-4.2 Asnæs Forskov - Kunstig ø - Hjalmarsgård (Boret tunnel/Lavbro)	0	28	8		36
KKØ-4.3 Asnæs Syd - Hjalmarsgård (Skråstagsbro/Højbro)	243	0	0		243
KKØ-4.3 Asnæs Syd - Kunstig ø - Hjalmarsgård (Sænketunnel/Lavbro)	85	55	16		156

## 8 Referencer

- [1] COWI, »Kattegatforbindelse - Kyst-Kyst - Anlægstekniske Forundersøgelser, Baggrundsrapport,« Februar 2021.
- [2] COWI, »Kattegatforbindelse - Kyst-Kyst - Anlægstekniske Forundersøgelser, Design basis, Fagnotat,« April 2021.
- [3] Trafikverket, »BVS 1586.20 - Banöverbyggnad - Infrastrukturprofiler "Krav på frittutrymme utmed banan",« Trafikverket, April 2015.
- [4] Trafikverket, »Ban- och stationsutformning - Infrastrukturprofiler,« Trafikverket, April 2020.
- [5] D. Bahn, »Steckenquerschnitte auf Erdkörpern - 800.0130,« Deutsche Bahn, Februar 1997.
- [6] COWI, »Femern Bælt: Side Study 4, 250 km/h Train Speed,« April 2010 (work in progress).